

GEOTRON-ELEKTRONIK R. Krompholz Leite 2, 01796 Pirna	Partner: COBET-Ingenieurbüro Prof. Gebauer / Prof. Käßner Dorfstraße 7, 03054 Cottbus
CONSONIC 60 Meßgerät und Meßmethode zur zerstörungsfreien Prüfung von Betondruckfestigkeiten mit Ultraschall	
Bewertung von Prüfergebnissen Repräsentativität der Prüfergebnisse – Normgerechte Auswertung	
Vorbemerkung zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit	Vorbemerkung zur zerstörungsfreien Bestimmung der Betondruckfestigkeit
<ul style="list-style-type: none"> • Die Normen des Betonbaus fordern Nachweise durch Prüfungen, bei denen der Bestimmung der Druckfestigkeit die überragende Bedeutung zukommt. • Als gesicherte Methode zur Bestimmung der Druckfestigkeit gilt nur die zerstörende Prüfung (Würfelprüfung). • Bei genauer Betrachtung unterliegt die Aussagekraft der Würfelprüfung erheblichen Einschränkungen. • Die Würfelprüfung erfolgt nicht direkt am Bauteil, sondern an separat hergestellten Probekörpern als „Stellvertreter der Bauteile“. Es besteht die Hoffnung, daß die Qualität des Bauteils der Qualität seines Stellvertreters entspricht. • Die Würfelprüfung erlaubt keine kontinuierliche Bestimmung der Druckfestigkeitsentwicklung des Betons und gibt damit keine Information über den jeweils aktuellen Erhärtungszustand. • Die Kenntnis des aktuellen Erhärtungszustandes ist für viele Entscheidungen des modernen Betonbaus unerlässlich. • Sie gestattet die frühestmögliche Erkennung von Qualitätsmängeln und dient damit der Vorbeugung bzw. Begrenzung von Schäden beim Betonbau. • Zerstörungsfreie Prüfungen erlauben bei Schadensverdacht schnelle Klärung mit geringem Prüfaufwand. • Die normativen Festlegungen zu den Qualitätsnachweisen der Betonproduktion sind streng gefaßt. Die produzierenden Unternehmen erfüllen die normativen Bedingungen mit erheblichem Aufwand, wobei für progressive Entwicklungen neuer Prüfverfahren wenig Spielraum zu bestehen scheint. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstörungsfreie Prüfungen durch Schlag, Penetration, Ausziehen und Abreißen sind Behelfsmethoden in Ermangelung besserer Verfahren. Sie sind nicht kontinuierlich gestaltbar. • Die Bestimmung der Druckfestigkeit auf der Grundlage von US-Geschwindigkeiten wird nach jahrzehntelangen erfolglosen Versuchen nur in Verbindung mit aufwendigen Korrelationsprüfungen für die jeweilige Betonrezeptur und das jeweilige Meßgerät empfohlen (DIN ISO 8047: Festbeton – Bestimmung der US-Geschwindigkeit, DAfStB / Heft 422: Prüfung von Beton). • Mit der Entwicklung des Gerätes CONSONIC 60 wurden sowohl die meßtechnischen als auch die auswerteseitigen Probleme gelöst. • Die Auswertung der US-Geschwindigkeit zur Berechnung der Druckfestigkeit erfolgt rezepturspezifisch, wodurch die für jedes Einzelbauteil laufend erforderlichen Korrelationsprüfungen als entscheidendes Anwendungshemmnis entfallen. • Für das Gerät CONSONIC 60 wurden verbesserte Lösungen für alle bekannten meßtechnischen Probleme entwickelt (das betrifft u.a. die Kopplung Meßsonden-Prüfobjekt, die Zugängigkeit des Prüfobjektes, den Einfluß der Bewehrung, die Präzision der Laufzeitmessung). • Die Druckfestigkeit eines Betonbauteils ist zu jedem Zeitpunkt zugänglich. • Die Messungen erfolgen automatisch. • Die Meßwerte können an beliebigen Orten abgefragt werden. • Das Gerät ist für die unterschiedlichsten Baustellenanforderungen gestaltbar.

1 Grundlagen der Bewertung der Ergebnisse

Im Ergebnis der US-Messung erhält man auf der Grundlage einer rezepturspezifischen Auswertung der Geschwindigkeit das Ergebnis für die Druckfestigkeit zum Meßzeitpunkt. Die Messung kann auch kontinuierlich erfolgen, so daß Druckfestigkeiten in beliebig engen zeitlichen Abständen zugänglich sind. Sie gelten für einen Würfel mit 200 mm Kantenlänge. Die Ergebnisse können für die interne Nutzung aufgrund der Angaben des Geräteherstellers oder aufgrund eigener statistischer Auswertungen bewertet werden. Für einen Nachweis von Druckfestigkeiten oder Betonfestigkeitsklassen gelten Unterlagen des DAfStB und DIN 1048 Teil 4/06.91.

1.1 Interne Bewertung von Ergebnissen

Die patentrechtlich geschützte Meß- und Auswertemethode macht aufgrund der rezepturspezifischen Auswertung der US-Geschwindigkeiten Regressionsuntersuchungen überflüssig. Das heißt, daß die Regressionsbeziehungen interner Bestandteil der Auswertesoftware sind.

Damit besteht der entscheidende Vorteil der Meßmethode darin, daß nicht für jeden Beton bzw. jedes Bauteil bzw. jedes Bauwerk eine aufwendige Korrelationsprüfung über US-Messungen und Würfel- oder Bohrkernprüfungen erfolgen muß, sondern mit vollzogener US-Messung sofort die Druckfestigkeitsergebnisse vorliegen. Bei kontinuierlicher Prüfung sind die Druckfestigkeitsergebnisse laufend aktuell verfügbar.

Da bei der Berechnung der Druckfestigkeit die Betonrezeptur einbezogen wird, gelten die folgenden Angaben für alle üblichen Normalbetone, wenn die Messungen nach Anleitung ordnungsgemäß erfolgen. Eine Selbstkontrolle durch Vergleich mit Würfel-Druckfestigkeiten ist selbstverständlich nötig, solange noch keine eigenen Erfahrungen vorliegen. Das Gerät bietet auch Eingriffsmöglichkeiten über die Software für außergewöhnliche Rezepturen und abweichende Betonkomponenten (z.B. Zuschläge).

- Die gemessenen Druckfestigkeiten können gemäß Geräteanleitung mit einer Abweichung $\leq 20\%$ vom wahren Wert bewertet werden, wenn sie als Mittelwert aus ≥ 3 Meßwerten gewonnen wurden.
- Die Ergebnisse können aufgrund der Angaben im Folgekapitel statistisch über Standardabweichung und Vertrauensbereich bewertet werden.
- Die Ergebnisse können aufgrund eigener – wenig aufwendiger – statistischer Auswertungen über Standardabweichung und Vertrauensbereich bewertet werden.

1.2 Normgerechte Bewertung nach DAfStB-Heft 422 und DIN 1048 Teil 4/06.91

Gemäß Angaben des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton; Heft 422:

Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048

S.22 ff., Abschnitt 3.2: Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen –

US-Laufzeitmessungen in Verbindung mit Bohrkernen

ist die Auswertung von US-Ergebnissen nach DIN 1048 Teil 4/06.91 entsprechend Empfehlung ausdrücklich gestattet. Folgende wesentliche Aussagen gelten:

Die statistisch zu ermittelnde Beziehung zwischen den Kenngrößen Druckfestigkeit und US-Geschwindigkeit darf für ein zu prüfendes Bauteil nur dann aufgestellt werden, wenn es sich um Beton gleicher Zusammensetzung handelt. Die gefundene Regressionsgerade ermöglicht es, Werten der Schallgeschwindigkeit die jeweilige Druckfestigkeit zuzuordnen.

Die an den einzelnen Meßstellen eines Bauwerks oder Bauteils aus Laufzeiten berechneten Schallgeschwindigkeiten v werden mit der unteren Grenzlinie des Vertrauensbereiches der Regressionsgeraden in Druckfestigkeiten umgerechnet. Diese Betondruckfestigkeiten sind auf den Würfel mit 200 mm Kantenlänge bezogen.

Der untersuchte Bauwerksbeton kann in Anlehnung an DIN 1048 Teil 4/06.91 einer Festigkeitsklasse zugeordnet werden.

Die Druckfestigkeit an weiteren, ausschließlich zerstörungsfrei untersuchten Meßstellen wird mit der unteren Grenze des Vertrauensbereiches abgeschätzt. Zunächst ist je nach der zu fordernden Sicherheit der Aussage zur Druckfestigkeit die Signifikanzschranke der Student-Verteilung (Angaben zu den Schranken in der Unterlage) durch Wahl der statistischen Sicherheit S festzulegen. In Anlehnung an DIN 1048 Teil 2/06.91 sollte sie zu $S = 50\%$, für eine größere Sicherheit zu $S = 80\%$ gewählt werden.

Für die weitere Auswertung gilt damit gemäß DIN 1048 Teil 4/06.91 Abschnitt 5 (2): Für den Tragfähigkeitsnachweis darf der geprüfte Bauwerksbeton zum Zeitpunkt der Prüfung einer Festigkeitsklasse nach DIN 1045 zugeordnet werden, wenn

- a) der kleinste Einzelwert und der Mittelwert 85 % der für diese Festigkeitsklasse in DIN 1045, Ausgabe 07.88, Tabelle 1, Spalten 3 (=Nennfestigkeit) und 4 (=Serienfestigkeit), festgestellten Werte nicht unterschreiten,
- b) eine entsprechende statistische Auswertung vorgenommen wird (Einzelheiten siehe dort).

2 Bewertung der Ergebnisse

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu differenzieren. Einerseits können die Messungen der eigenen Information über den Erhärtungsfortschritt oder die erreichte Druckfestigkeit dienen, um technologische Entscheidungen treffen zu können oder Sicherheit über den Zustand des Bauteils zu gewinnen. In diesem Fall wird die Bewertung zwar auch nach objektiven Kriterien erfolgen, die aber nicht im Detail einer Norm genügen müssen, sondern Ermessensspielräume frei lassen.

Andererseits können zusätzliche Festigkeitsnachweise erforderlich werden, die aufwendig werden können, wenn kein sicheres und praktikables Verfahren verfügbar ist. Hier schließt diese US-Methode eine wesentliche Lücke in der Verfügbarkeit einer geeigneten Meßmethode. In diesem Fall muß die Auswertung natürlich den normativen Anforderungen genügen.

2.1 Interne Bewertung von Ergebnissen

Auf die Möglichkeit einer nichtstatistischen Bewertung ist unter 1.1 hingewiesen worden. Eine statistische Bewertung gibt in jedem Fall größere Sicherheit, zumal sie mit geringem Rechenaufwand verbunden ist. Gegenüber der herkömmlichen US-Methode hat sie den großen Vorteil, daß sie nicht objektbezogen erfolgen muß, da die Rezepturspezifität Bestandteil der Auswertung ist. Das heißt, eine einmalig für mehrere Betone erfolgte Auswertung ist von universeller Gültigkeit. Im folgenden wird die Auswertung anhand von Ergebnissen für ein großes Rezepturspektrum (Anlagen 1 und 2) gezeigt. Die Ergebnisse sind prinzipiell übertragbar, wenn die Meßtechnik gemäß Anleitung betrieben wird und keine Betone außergewöhnlicher Zusammensetzung oder mit stark abweichenden Komponenten zur Anwendung kommen. Eine Selbstkontrolle sollte selbstverständlich sein.

Untersuchungsumfang bezüglich Rezepturen und Druckfestigkeitsbereich:

Rezepturen / Zahl: 15,

Zemente: CEM I 32,5 R, CEM I 42,5 R, CEM III/B 32,5-NW,

w/z bzw w/bm: 0,37...0,61, Sieblinien: A...C 16, Sand / Kiessand / Splitt

Zusatzstoffe und Zusatzmittel: Steinkohleflugasche, Kalksteinmehl, Microsilica, BV,

Geprüfte Druckfestigkeiten: 66, Druckfestigkeitsbereich: 1,7-64,8 N/mm².

Überprüfung der Korrelation

Die vorliegenden Ergebnisse wurden genutzt, um die Repräsentativität der US-Ergebnisse nachzuweisen. Die Beziehung zwischen US-Ergebnissen und Würfeldruckfestigkeiten lautet

$$\beta(\text{cal}) = -0,15 + 0,97 \cdot \beta(\text{US}).$$

Das Ergebnis besagt, daß die als Meßergebnis vom Gerät ausgewiesene Druckfestigkeit $\beta(\text{US})$ über die angeführte Regressionsgleichung zu einer berechneten Druckfestigkeit $\beta(\text{cal})$ führen kann, die eine geringfügige Korrektur über die Korrelation zu den gedrückten Würfeldruckfestigkeiten beinhaltet.

Entscheidend an diesem Ergebnis ist der Nachweis, daß die Relation zwischen US-Druckfestigkeit und Würfeldruckfestigkeit für einen großen Bereich von Rezepturen und Druckfestigkeiten nahezu 1 : 1 ist, was die Aussagen über die Qualität der Methode bestätigt. Das bedeutet praktisch, daß das US-Ergebnis keiner Korrektur bedarf.

Standardabweichung

Da neben den US-Ergebnissen ohnehin Würfeldruckfestigkeiten geprüft werden, sind entsprechende Ergebnisse für die Auswertung verfügbar.

Dem entsprechend wird man die Auswertung sinnvoll auf Wertepaare von Druckfestigkeiten beziehen, wobei der eine Wert mittels Druckversuch, der andere durch US-Messung bestimmt wurde.

In diesem Fall kann man die Standardabweichung für m Proben (Wertepaare) mit $n = 2m$ Ergebnissen berechnen nach

$$s = \text{Quadratwurzel aus } (1/2 (x_1 - x_2)^2 / m)$$

mit $f = m$ Freiheitsgraden.

Die Auswertung soll sich auf Proben mit ähnlichen Zufallsfehlern beziehen.

Für die Ergebnisse der 15 Rezepturen mit den bereits angeführten Rezepturbereichen und unterschiedlichen Prüfterminen ($m = 66$) wurden die Standardabweichungen daher bereichsweise mit folgenden Ergebnissen berechnet:

Druckfestigkeitsbereich 0...20 N/mm² : $s = 1,4$ N/mm² für $f = 8$,

Druckfestigkeitsbereich 20...40 N/mm² : $s = 2,4$ N/mm² für $f = 36$,

Druckfestigkeitsbereich 40...60 N/mm² : $s = 3,0$ N/mm² für $f = 22$.

Das entspricht der Tatsache, daß für unterschiedliche Druckfestigkeiten nicht die Standardabweichung, sondern der Variationskoeffizient etwa konstant ist. Für normgerechte Festigkeitsnachweise rechnet man nicht mit Standardabweichungen < 3 N/mm². Damit kann man aber beispielsweise keine Druckfestigkeitsergebnisse < 10 N/mm² korrekt bewerten. Insofern sollte man bei internen Bewertungen die zutreffende Standardabweichung nutzen. Im vorliegenden Fall beträgt sie für einen gemessenen Druckfestigkeitswert:

$$s = 1,20 + 0,04 \cdot \beta(\text{US}) \text{ N/mm}^2.$$

Damit liegt bereits eine wesentliche Aussage für die Bewertung vor.

Vertrauensbereich

Im Normalfall werden mehrere Meßergebnisse für eine interessierende Druckfestigkeit vorliegen, so daß mit der unteren Grenze des Vertrauensbereiches ein Kriterium mit höherer Aussagekraft benutzt werden kann. Diese ergibt sich nach der t-Verteilung gemäß

$$-\Delta\beta = -t(S, f) \cdot s / n^{0,5}$$

aus den Integralgrenzen der t-Verteilung für die statistische Sicherheit S und den Freiheitsgrad $f = n-1$ sowie der Standardabweichung s und der Zahl der Prüfwerte n.

Im vorliegenden Fall würde sich für $\beta(\text{US}) = 30$ N/mm² als Mittelwert aus 3 Prüfwerten ergeben

$s = 1,20 + 0,04 \cdot 30 = 2,4$ N/mm². Mit $n = 3$, $f = 2$ und $S = 80$ % (gewählt) wird $t = 1,886$ und

$$-\Delta\beta = -2,6 \text{ N/mm}^2.$$

Das Ergebnis besagt, daß bei sehr vielen Messungen dieser Druckfestigkeit 80 % der Ergebnisse im Bereich $30 \pm 2,6$ N/mm² liegen würden bzw. die Schranke von $30-2,6 = 27,4$ N/mm² (untere Grenze des Vertrauensbereiches) nur von 10 % der Ergebnisse unterschritten würde.

2.2 Normgerechte Bewertung nach DAfStB-Heft 422 und DIN 1048 Teil 4/06.91

Die normgerechte Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich eines Nachweises von Druckfestigkeiten bzw. Betonklassen muß sich auf die Bedingungen von DAfStB-Heft 422 und DIN 1048 Teil 4/06.91 beziehen.

Im vorliegenden Fall beinhalten allerdings die US-Ergebnisse bereits die Auswertung der Rezeptur, so daß im Ergebnis keine US-Geschwindigkeit erhalten wird, die nur für das untersuchte Betonobjekt typisch ist. Im Ergebnis liegt die für jedes untersuchte Betonobjekt zutreffende Druckfestigkeit als Ergebnis vor.

Insofern erscheint es logisch, daß die in DAfStB-Heft 422 vorgeschriebene Auswertung nicht von Fall zu Fall erfolgen muß, sondern allgemeingültig für den relevanten Rezepturbereich des jeweiligen Anwenders vorgenommen werden kann. Da neben den US-Ergebnissen ohnehin Würfeldruckfestigkeiten anfallen, ist kaum ein zusätzlicher Versuchsaufwand zu verzeichnen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf DAfStB-Heft 422 Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048

S.22 ff., Abschnitt 3.2: Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen – US-Laufzeitmessungen in Verbindung mit Bohrkernen.

Der Unterschied der CONSONIC-Ergebnisse zu traditionellen Meßergebnissen besteht darin, daß keine US-Geschwindigkeiten, sondern direkt US-Druckfestigkeiten ausgewertet werden und daß die zerstörende Druckfestigkeitsprüfung in der Regel an Würfeln erfolgen wird. Dabei ist die Festigkeit des Würfels mit 200 mm Kantenlänge zu benutzen, auch das US-Ergebnis gilt für diesen Würfel.

Regressionsgleichung der Bezugsgeraden

Bei einem Nachweis von Betonfestigkeitsklassen ist die exakte Beziehung zwischen Meßwert, hier $\beta(\text{US})$, und Bezugswert, hier $\beta(\text{Wü})$, heranzuziehen. Damit kann eine geringfügige Korrektur des US-Ergebnisses $\beta(\text{US})$ zum Berechnungsergebnis $\beta(\text{cal})$ erforderlich werden.

Die Auswertung der 66 Wertepaare $\beta(\text{US}) / \beta(\text{Wü})$ (Anlage 2) gemäß Vorschrift ergibt

$$\beta(\text{cal}) = -0,15 + 0,97 \cdot \beta(\text{US}).$$

Die Aussage dieses Ergebnisses über die Qualität der US-Ergebnisse wurde bereits diskutiert.

Standardabweichung

Nach Vorschrift wird die Standardabweichung für die mit der Regressionsgleichung ermittelten Druckfestigkeitswerte (Anlage 2) zu $s(\beta) = 3,3 \text{ N/mm}^2$ berechnet.

Es wurde in diesem Fall der gesamte Wertebereich herangezogen, im Normalfall werden kleinere Bereiche interessieren, die durch die Standardabweichung dann noch präziser charakterisiert werden. Allerdings ist die hier für diesen großen Wertebereich zu $3,3 \text{ N/mm}^2$ berechnete Standardabweichung schon fast am unteren Limit, denn DIN 1048 Teil 4 läßt keine Auswertungen mit Standardabweichungen $< 3 \text{ N/mm}^2$ zu.

Vertrauensbereich – untere Grenzlinie

Der Nachweis für Betonklassen ist mit der unteren Schranke des Vertrauensbereiches zu führen.

Nach DAfStB-Heft 422 bzw. DIN 1048 Teil 2 kann die statistische Sicherheit mit 50 oder 80 % gewählt werden. Die Zahl der Wertepaare wird in diesem Fall mit n bezeichnet ($n=66$), es gilt $f = n-2$ (hier 64). Werte der t-Verteilung sind nur bis $f = 24$ vorgesehen, sie betragen für $S = 50 \%$ $t = 0,685$ und für $S = 80 \%$ $t = 1,318$.

Mit $-\Delta\beta = -t(S, f) \cdot s(\beta)$ und $s(\beta) = 3,3$ gilt für $S = 50 \%$ $-\Delta\beta = -2,3 \text{ N/mm}^2$
und für $S = 80 \%$ $-\Delta\beta = -4,3 \text{ N/mm}^2$.

Damit wird der für die Beurteilung heranzuziehende Druckfestigkeitswert $\beta(\text{VB})$ berechnet für $S = 50 \%$ nach $\beta(\text{VB}/50) = -0,15 + 0,97 \cdot \beta(\text{US}) - 2,3 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ und für $S = 80 \%$ nach $\beta(\text{VB}/80) = -0,15 + 0,97 \cdot \beta(\text{US}) - 4,3 \text{ (N/mm}^2\text{)}$.

Bewertung

Für den Nachweis einer Betonklasse gilt nach DIN 1048 Teil 4/06.91 für $\beta(\text{VB})$, daß Einzelwerte $\geq 0,85 \cdot \beta_{\text{WN}}$ und Mittelwerte $\geq 0,85 \cdot \beta_{\text{WS}}$ liegen müssen.

Beispiel (alle Werte in N/mm^2):

$\beta(\text{US}1)=32$	$\beta(\text{cal}1)=30,9$	$\beta(\text{VB}/50/1)=28,6$	$\beta(\text{VB}/80/1)=26,6$
$\beta(\text{US}2)=35$	$\beta(\text{cal}2)=33,8$	$\beta(\text{VB}/50/2)=31,5$	$\beta(\text{VB}/80/2)=27,2$
$\beta(\text{US}3)=29$	$\beta(\text{cal}3)=28,0$	$\underline{\beta(\text{VB}/50/3)=25,7}$	$\underline{\beta(\text{VB}/80/3)=21,4}$
		$\beta(\emptyset) = 28,6$	$\beta(\emptyset) = 25,1$

Für B 25 wäre nachzuweisen $\beta(i=1) \geq 0,85 \cdot 25$, d.h. $\geq 21,3 \text{ N/mm}^2$
und $\beta(\emptyset) \geq 0,85 \cdot 30$, d.h. $\geq 25,5 \text{ N/mm}^2$.

Für $S = 50 \%$ wäre B 25 in diesem Fall nachgewiesen. Für $S = 80 \%$ erfüllen zwar alle Einzelwerte das Kriterium, nicht aber der Mittelwert.

Es kann auch ein statistischer Nachweis geführt werden.

3 CONSONIC – Stand und Perspektiven

Die Versuchsergebnisse gemäß Anlage 1 und 2 wurden von Personen gewonnen, die keine professionellen US-Experten sind, aber in die Meßmethodik eingewiesen wurden. Die fast 1:1-Übereinstimmung der US- und Würfel-Ergebnisse für unterschiedliche Rezepturen bestätigt die US-Methode eindrucksvoll.

Es ist erkennbar, daß die an anderen Stellen gewonnenen Ergebnisse, die in Anlage 3 dargestellt sind, mit diesen Ergebnissen konform sind.

Bewertungen der Ergebnisse für die interne Nutzung sind höchst einfach, da das Verfahren keine Auswertung der Schallgeschwindigkeit erfordert, sondern unter Berücksichtigung der Rezeptur des Betons sofort Druckfestigkeits-Ergebnisse liefert. Statistische Bewertungen der Meßergebnisse können aus dieser Darstellung übernommen werden, sollten aber bestätigt werden. Ihr Gültigkeit betrifft den untersuchten Rezeptur- und Druckfestigkeitsbereich generell und nicht nur ein jeweils einzelnes Untersuchungsobjekt wie bei den traditionellen US-Meßmethoden.

Die Bestätigung von Betonklassen mit der Methode CONSONIC unterliegt den üblichen normativen Forderungen. Diese können aufgrund der Allgemeingültigkeit dieser Meßergebnisse hinsichtlich der Auswertung wesentlich einfacher als mit den traditionellen US-Verfahren erfüllt werden (wenn man überhaupt davon sprechen kann, daß traditionelle US-Messungen zur Bestimmung von Betondruckfestigkeiten eine Rolle spielen). Ein übermäßig positives Interesse von produzierenden und überwachenden Unternehmen und Institutionen für diese innovative Meßmethode (die erste echte zerstörungsfreie und kontinuierlich einsetzbare Meßmethode zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit überhaupt) ist allerdings nicht zu verzeichnen. Insofern muß man auch mit Akzeptanzproblemen bei der Überwachung von Beton rechnen, obwohl die begrenzte Aussagekraft der Würfelprüfung bekannt ist.

Wenn Ergebnisse in größerem Umfang gewonnen und systematisch ausgewertet werden, sind weitere Vereinfachungen bei der Bewertung naheliegend. Obwohl die Methode bei einigen Hochschulen und Unternehmen Anwendung findet, wurden die Ergebnisse bisher weniger konkret publiziert als verbal bewertet, zum Beispiel:

Silbereisen, R., Wassmann, K., Readymix Beton Berlin-Brandenburg GmbH:

Grundlagen einer innovativen Prozeßsteuerung in der Transportbetonindustrie,

7. Kolloquium Betontechnologie der Fachhochschule Lausitz, Cottbus, November 1999 (Vortrag / Tagungsband):

„Eignungsprüfungen werden bei neuen Sorten oder wesentlich veränderten Ausgangsstoffen durchgeführt. Neben dem Messen der normierten Frischbetoneigenschaften wie Konsistenz, LP-Gehalt usw. hat es sich als sinnvoll erwiesen, das Programm jeder Eignungsprüfung für anspruchsvolle Betone um die US-Messung im Meßgerät CONSONIC zu erweitern. Daraus ergeben sich zusätzliche wertvolle Informationen wie die Verzögerungszeit aus verschiedenen Betonzusatzmitteln, Temperaturverläufe sowie Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung. Wir ersetzen unscharfe, in ihrer Aussage beschreibende Prüfverfahren durch exakte Messungen und erhalten dadurch ein umfassendes Bild der neuen Betonsorten. Diese Messungen können auch am Bauteil erfolgen, wodurch auch Einflüsse aus Schalung, Umgebungstemperatur, Wärmeentwicklung im Bauteil erfaßt werden. Beispielhaft wird die Vorplanung eines hochfesten Brückenbetons vorgestellt.“

Vergleich Druckfestigkeitsbestimmung zwischen Würfelprüfung und Ultraschallmessungen mit Gerät CONSONIC 60 an FH Lausitz, 1998/99 Zusammenfassende Angaben (Einzelergebnisse nächste Seite)		
Ort	Fachhochschule Lausitz, Cottbus, Laboruntersuchungen	
Zeit	Sept.-Okt. 1998, März-April 1999	
Prüfungen	15 Rezepturen 4 Prüftermine pro Rezeptur (i.d.R. nach 1, 2, 3 und 7 Tagen) pro Meßtermin 2 Würfel mit 15cm Kantenlänge Umrechnung mit $f = 0,95$ auf 20-cm-Würfel pro Meßtermin 1 US-Messung mit Tauchsonde in einer Balkenform (Stahl, 12cm x 12cm x 36cm)	
Betonkomponenten	CEM I 32,5 R, CEM I 42,5 R, CEM III/B 32,5 – NW Sand 0/2, Kiessand 2/8, Splitt 8/16 Steinkohlenflugasche, Microsilica, Kalksteinmehl Betonverflüssiger	
Rezepturbereiche	Zement: 292...450 kg/m ³ w/z bzw. w/bm: 0,37...0,61 SFA: 80 kg/m ³ , KSM: 80 kg/m ³ , MS: 30 kg/m ³ BV: 0,36...1,5 % Konsistenz: KP...KF	
Materialherkunft	CEM I 32,5 R CEM I 42,5 R CEM III/B 32,5 – NW Sand 0/2a Kiessand 2/8 (Granit-)Splitt 8/16 SFA Kalksteinmehl Microsilica Betonverflüssiger	Deuna Zement Rüdersdorfer Zement, Werk Rüdersdorf Rüdersdorfer Zement, Werk Eisenhüttenstadt Zuschlagstoffe und Spezialsande Haida Werk Koschendorf / NL Natursteinwerk Weiland, Schwarzkollm / NL EFA-Füller, Baumineral Herten Dornburger Zement, Dorndorf-Steudnitz Elkem MS, Woermann Bauchemie BV 1, Heidelberger Bauchemie
Ergebnisse – Zusammenfassung	Druckfestigkeitsbereich Würfel: 1,7...64,8 N/mm² US: 2,3...66,3 N/mm ² mittlere Druckfestigkeit aller Würfel: 34,0 N/mm ² mittlere Druckfestigkeit aller US-Ergebnisse: 35,2 N/mm ²	
Abweichungen der US-Ergebnisse von Würfelfestigkeiten	Rezepturen 1...15: absolut im Mittel +/- 3,0 N/mm² relativ im Mittel +/- 9,5 % min./max. absol. 0...7,9 N/mm² min./max. relativ 0...27,3 % ohne Rezept. 10,11: absolut +/- 2,7 N/mm² relativ +/- 7,9 % min./max. absol. 0...7,0 N/mm² min./max. relativ 0...19,5 % Bemerkung: bei den Rezepturen 10 und 11 lag der Sieblinienbereich zwischen B und C	
Bemerkung	Es wurde mit den in der Auswertesoftware voreingestellten Parametern gearbeitet, ohne Anpassungen vorzunehmen, die zu verbesserten Ergebnissen führen können.	
Einschätzung	Die Angaben zum Meßgerät – Abweichungen der US-Ergebnisse von den Würfeldruckfestigkeiten $\leq 20\%$ - können mit Ausnahme der beiden Rezepturen mit dem Sieblinienbereich B16/C16 bestätigt werden, obwohl die Voraussetzungen (Ergebnisse als Mittelwerte aus ≥ 3 Prüfkörpern bzw. Meßstellen) nicht erfüllt waren. Die mittleren Abweichungen lagen bei +/- 3,0 N/mm² bzw. +/- 9,5 % , obwohl nur ein Meßwert der US-Geschwindigkeit geprüft wurde.	

Anlage 1: Gerätetest mit umfassenden Rezeptur- und Druckfestigkeitsbereich - Überblick

Nr.	Rezepturen FH Lausitz 1998/1999 (Eckdaten)	Termin (d)	Würfel (20cm) (N/mm ²)	US (N/mm ²)	Differenz (N/mm ²)	Differenz (%)
1	CEM I 42,5 R (428kg) w/z = 0,41 , KP/KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 1%BV	1	38,2	32,1	-6,1	-16,0
		2	49,6	44,4	-5,2	-10,5
		3	52,9	49,1	-3,9	-7,4
		7	56,7	55,3	-1,4	-2,5
2	CEM I 42,5 R (343kg) w/z = 0,51 , KP/KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 1%BV	1	27,2	24,8	-2,4	-8,8
		2	36,9	35,5	-1,4	-3,8
		3	41,7	39,8	-1,9	-4,6
		7	45,7	46,1	+0,4	+0,9
3	CEM I 42,5 R (292kg) w/z = 0,61 , KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,5%BV	1	21,4	20,9	-0,5	-2,3
		2	29,8	29,8	+/-0	+/-0
		3	33,1	35,1	+2,0	+6,0
		7	38,5	41,2	+2,7	+7,0
4	CEM I 42,5 R (438kg) w/bm = 0,37 , KP/KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 1%BV, 30kg Microsilica	1	43,0	36,7	-6,3	-14,6
		2	52,6	47,6	-5,6	-10,6
		3	56,1	51,0	-5,1	-9,1
		7	64,8	58,2	-6,6	-10,1
5	CEM I 42,5 R (350kg) w/z = 0,51 , KP/KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,7%BV, 80kg Kalksteinmehl (KSM behandelt als Zuschlag)	1	32,1	30,6	-1,5	-4,7
		2	39,0	39,5	+0,5	+1,3
		3	42,9	43,3	+0,4	+0,9
		7	45,3	49,8	+4,4	+9,7
6.1	CEM I 42,5 R (352kg) w/bm = 0,47 , KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,7%BV, 80kg SFA (SFA behandelt als Bindemittel)	1	31,5	33,0	+1,5	+4,8
		2	39,9	43,7	+3,8	+9,5
		3	44,3	48,7	+4,4	+9,9
		5	47,6	53,3	+5,7	+12,0
6.2	CEM I 42,5 R (352kg) w/bm = 0,47 , KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,7%BV, 80kg SFA (SFA behandelt als Zuschlag)	1	31,5	29,6	-1,9	-6,3
		2	39,9	39,9	+/-0	+/-0
		3	44,3	45,5	+1,2	+2,7
		5	47,6	49,3	+1,7	+3,6
7	CEM III/B 32,5-NW (389kg) w/z = 0,45 , KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,5%BV	1	2,3	3,9	+1,6	-----
		2	12,7	14,8	+2,1	+16,5
		4	27,7	23,1	-4,6	-16,6
		7	37,6	37,2	-0,4	-1,1
8	CEM III/B 32,5-NW (295kg) w/z = 0,60 , KF SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,5%BV	1	1,7	2,3	+0,6	-----
		2	7,2	8,7	+1,5	-----
		3	11,8	14,1	+2,3	+19,5
		7	21,7	24,7	+3,0	+13,8
9	CEM I 32,5 R (400kg) w/z = 0,46 , KR/KF, 0,43 % BV SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16)	1	22,7	23,7	+1,2	+5,3
		2	36,4	41,9	+5,5	+15,1
		7	45,1	52,1	+7,0	+15,5
10	CEM I 32,5 R (345kg) w/z = 0,56 , KR SL B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,36 %BV	1	15,5	18,7	+3,2	+20,6
		2	25,1	31,0	+5,9	+23,5
		3	28,9	36,8	+7,9	+27,3
		7	34,5	39,8	+5,3	+15,4
11	CEM I 32,5 R (382kg) w/z = 0,56 , KR SL C16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,57%BV	1	11,7	13,9	+2,2	+18,8
		2	22,3	26,1	+3,8	+17,0
		3	25,1	32,5	+7,4	+29,5
12	CEM I 32,5 R (360kg) w/z = 0,505 , KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,43 %BV	1	20,3	22,0	+1,7	+8,4
		2	32,5	35,6	+3,1	+9,5
		3	35,3	41,0	+5,7	+16,1
		7	40,5	46,8	+6,3	+15,6
13.1	CEM I 32,5 R (360kg) w/z = 0,51 , KP/KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,7%BV, 80kg SFA (SFA behandelt als Bindemittel)	1	20,5	20,8	+0,3	+1,9
		2	33,4	37,5	+4,1	+12,3
		3	37,6	42,6	+5,0	+13,3
		7	41,9	47,6	+5,7	+13,6
13.2	CEM I 32,5 R (360kg) w/z = 0,51 , KP/KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,7%BV, 80kg SFA (SFA behandelt als Zuschlag)	1	20,5	18,2	-2,3	-11,2
		2	33,4	33,9	+0,5	+1,5
		3	37,6	38,8	+1,2	+3,2
		5	41,9	43,8	+1,9	+1,9
14	CEM I 32,5 R (360kg) w/bm = 0,51 , KR SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 0,9%BV, 30kg Microsilica	0,5	5,2	5,7	+0,5	+9,6
		1	23,2	22,6	-0,6	-2,6
		2	34,2	34,6	+0,4	+1,2
		7	47,0	43,8	-3,2	-6,8
15	CEM I 42,5 R (450kg) w/z = 0,41 , KP SL A/B16 (S0/2-KS2/8-Sp8/16) 1,5%BV	0,75	31,7	27,7	-4,0	-12,6
		1	39,6	34,6	-5,0	-12,6
		2	48,2	45,8	-2,4	-5,0
		7	55,5	54,6	-0,9	-1,6

Anlage 2: Gerätetest mit umfassenden Rezeptur- und Druckfestigkeitsbereich - Ergebnisse

Vergleich Druckfestigkeitsbestimmung zwischen Würfelprüfung und Ultraschallmessungen mit Gerät CONSONIC 60 bei verschiedenen Messungen

Transportbetonwerk						
Nr.	Rezepturangaben	Termin (d)	Würfel (20cm) (N/mm ²)	US (N/mm ²)	Differenz (N/mm ²)	Differenz (%)
1	B 25 CEM I 32,5 R z = 295 kg, f = 75 kg w/bm = 0,60	unterschiedlich	3,2	4,3	+1,1	----
			11,8	12,5	+0,7	+6
			16,5	16,5	+/-0	+/-0
			34,3	37,0	+2,7	+8
2	B 25 CEM I 32,5 R z = 275 kg, ksm = 30 kg, w/z = 0,65	unterschiedlich	7,4	8,6	+1,2	+16
			15,1	15,7	+0,6	+4
			19,3	19,5	+0,2	+1
3	B 35 CEM I 32,5 R z = 340 kg, w/z = 0,48	unterschiedlich	10,2	11,7	+1,5	+15
			20,5	22,3	+1,8	+9
			25,3	26,4	+1,1	+4
4	B 45 CEM I 42,5 R z = 340 kg, f = 85 kg w/bm = 0,50	unterschiedlich	11,4	14,3	+2,9	+25
			24,9	25,0	+0,1	+/-0
			29,8	30,5	+0,7	+2
			38,6	47,8	+9,2	+24
Abweichungen					+ 1,7	+8
Einschätzung		<ul style="list-style-type: none"> - Alle Ergebnisse sind nur Einzelwerte ! - Tendenz zu höheren US-Ergebnissen scheint materialspezifisch zu sein, in diesem Fall bietet sich eine Parameterkorrektur an. - Zwei Ergebnisse zeigen eine relative Abweichung > 20 %, bei einem davon liegt die absolute Abweichung nur bei +2,9 N/mm². Bei Einzelergebnissen können das auch Ausreißer sein. 				

Untersuchungen an Normmörtel – Prüfung der Zementfestigkeit

Nr.	Rezepturangaben	Termin (d)	Würfel (20cm) (N/mm ²)	US (N/mm ²)	Differenz (N/mm ²)	Differenz (%)
1	CEM I 32,5 R Labor FH Lausitz	unterschiedlich	3,5	4,7	+1,2	-----
			14,8	15,3	+0,5	+3
			26,1	28,1	+2,0	+8
			38,0	42,1	+4,1	+11
2	CEM I 42,5 R Labor Zementwerk	unterschiedlich	17,8	20,5	+2,7	+15
			31,5	28,4	-3,1	-10
3	CEM I 52,5 R Labor Zementwerk	unterschiedlich	17,9	18,2	+0,3	+2
			25,1	23,2	-0,8	-3
			41,9	32,5	-9,4	-22
Abweichungen					+/-2,5	+/-9
Einschätzung		<ul style="list-style-type: none"> - Die Zementfestigkeiten wurden als Mittelwerte an Prismen bestimmt und mit dem Faktor 0,88 auf die Druckfestigkeit eines 20-cm-Würfels umgerechnet, die US-Ergebnisse beruhen nur auf einer Einzelmessung. - 1 Ergebnis zeigt eine relative Abweichung > 20 %, möglicherweise ist das ein Ausreißer (nur 1 US-Ergebnis). 				

Untersuchungen von Fertigteilproduktion

Nr.	Fertigteil Rezepturangaben	Termin (h)	Temper. (° C)	20cm-Würfel (N/mm ²) KINFEST-Berechnung	US (N/mm ²)	Differ. (N/mm ²)	Differ. (%)
1	Stahlbetonriegel B 35 CEM I 42,5 R-HS z = 375 kg/m ³ w/z = 0,43 Abhebefestigkeit ≥ 15 N/mm ²	10	30,9	3,9	2,3	-1,6	----
		12	33,7	7,0	6,4	-0,6	-8,6
		14	35,3	10,9	11,7	+0,8	+6,8
		16	35,7	14,9	17,0	+2,1	+14,0
		18	35,0	18,4	20,9	+2,5	+13,6
		20	33,4	21,3	22,2	+0,9	+4,2
		22	32,4	23,7	23,8	+0,1	+0,4
2	Treppenelement B 25 CEM I 42,5 R-ft z = 270 kg/m ³ w/z = 0,61 Abhebefestigkeit ≥ 15 N/mm ²	7	29,5	2,0	1,3	-0,7	----
		9	32,5	3,8	3,0	-0,8	----
		11	33,3	6,8	5,6	-1,2	-17,6
		13	32,5	9,6	8,8	-0,8	-8,3
		15	31,0	12,3	12,0	-0,3	-2,4
		17	30,0	14,7	14,9	+0,2	+1,4
		19	29,2	16,9	17,6	+0,7	+4,0
Abweichungen						+/-0,9	+/-7,4
Einschätzung		<ul style="list-style-type: none"> - Kontinuierliche Druckfestigkeitsmessung mit US einschließlich Temperaturmessung zur einfachen Bestimmung des Abhebezeitpunktes - Kontrolle der US-Ergebnisse mit Berechnungsergebnissen (Programm KINFEST) - Methode zur wenig aufwendigen Bestimmung von Abhebezeiten in Abhängigkeit von Produktionsrhythmus, Temperaturregime und gewählter Rezeptur bzw. zur Festlegung der geeigneten Rezeptur 					

Anlage 3: Anwender-Ergebnisse für unterschiedliche Aufgabenstellungen