

Ultraschall-Messtechnik 2000

- **LightHouse 2000**
Erstarrungszeit von Frischbeton

- **Consonic[®] 60**
Ultraschall-Messgerät für Beton

**Problemstellung - Wissensstand -
Zielstellung der Geräteentwicklung**

- **Prüfköpfe**
Tauchsonden für Frischbeton und Mörtel

GEOTRON-ELEKTRONIK

Consonic® 60: Meßgerät und Meßmethode zur zerstörungsfreien und kontinuierlichen Prüfung von Betondruckfestigkeiten mit Ultraschall

Problemstellung - Wissensstand - Zielstellung der Geräteentwicklung

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 (Würfeldruckfestigkeit). Mit Würfeldruckfestigkeiten liegen sichere Ergebnisse im Rahmen von Eignungs- und Güteprüfungen für diskrete Prüftermine vor, die nur die Qualität des Betons an sich dokumentieren.

Neben diesen Würfeldruckfestigkeiten interessiert in vielen Fällen die Festigkeit des Betonbauteils direkt, sei es aus Gründen des Erhärtungsfortschrittes zwecks technologischer Entscheidungen (Ausschalen, Umspannen, Abheben...) oder weil Zweifel an der Qualität des eingebauten Betons bestehen. Diesbezüglich besteht die Möglichkeit, den Festigkeitszustand über Erhärtungswürfel zu charakterisieren, die aber einerseits das Bauteil nur ungenügend charakterisieren (Betontemperatur different) und andererseits nur punktuelle Prüftermine gestatten. Qualitätsnachweise des eingebauten Betons erfordern entweder eine Bohrkernentnahme (aufwendig) oder Prüfungen mit dem Rückprallhammer, mit dem nur der Oberflächenbereich zugänglich ist. Wünschenswert ist die Verfügbarkeit einer zerstörungsfreien Prüfmethode, die je nach Interessenlage kontinuierliche Ergebnisse der Festigkeitsentwicklung für technologische Entscheidungen liefert oder eine Qualitätskontrolle nicht nur auf den Oberflächenbereich beschränkt.

Solche und ähnliche Fragestellungen haben zur Entwicklung einer Vielzahl zerstörungsfreier oder quasi-zerstörungsfreier Prüfverfahren (Schlag-, Penetrations-, Auszieh-, Abreißmethoden) geführt, die nicht kontinuierlich gestaltbar sind und nur physikalisch unscharfe Relationen zur Druckfestigkeit des Betons aufweisen. Sie sind als Behelfsmethoden in Ermangelung besserer Verfahren einzustufen. Als aussichtsreiche Methode ist lange Zeit die Prüfung der Ultraschallgeschwindigkeit betrachtet worden, weil die Schallgeschwindigkeit über den Elastizitätsmodul eine Verbindung zur Druckfestigkeit des Betons aufweist. Diese Beziehung wird aber durch den Einfluß der Zuschläge (Qualität und Quantität) sehr stark beeinflusst, während die Betonfestigkeit letztlich durch die Eigenschaften des Zementsteins bestimmt bzw. begrenzt wird. Das hat nach jahrzehntelangen erfolglosen Versuchen dazu geführt, daß die Auswertung von US-Geschwindigkeiten zur Berechnung von Druckfestigkeiten nur in Verbindung mit aufwendigen Korrelationsuntersuchungen für die jeweilige Betonrezeptur empfohlen wird (DIN ISO 8047: Festbeton – Bestimmung der US-Geschwindigkeit, DAfStb / Heft 422: Prüfung von Beton). Der daraus resultierende Aufwand beschränkt derartige Prüfungen auf seltene Fälle an exponierten Objekten.

Zusätzlich ist nicht zu übersehen, daß bei US-Prüfungen weitere meßtechnische Probleme auftreten, so die reproduzierbare Ankopplung der Meßköpfe an das Prüfobjekt, der Einfluß der Bewehrung oder bei der üblichen Durchschallungsmethode die Zugänglichkeit des Prüfobjektes.

Die Zielstellung der Entwicklung bestand darin, die dargestellten auswerteseitigen und prüftechnischen Probleme zu lösen und eine Methode zu entwickeln,

- die zerstörungsfreie und kontinuierliche Bestimmung von Betondruckfestigkeiten im Labor und auf der Baustelle unter beliebigen Erhärtungsbedingungen erlaubt,
- die Korrelationsuntersuchungen für jeden jeweils interessierenden Beton (entscheidendes Anwendungshemmnis bisheriger Anwendung) auf der Basis einer physikalisch funktionalen Auswertung überflüssig macht und
- bei der innovative Lösungen für die meßtechnische Probleme angeboten werden.

Auf der Grundlage einer patentierten Lösung (Patent der BRD Nr. 196 29 485 vom 12.07.96: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Beton während dessen Erhärtung mittels Ultraschall-Geschwindigkeitsmessungen) wurde mit dem Ultraschall-Universalprüfsystem CONSONIC 60 die beschriebene Zielstellung realisiert.

Prinzip einer neuen Auswertemethodik

Die Berechnung von Betondruckfestigkeiten aus US-Geschwindigkeiten beruht darauf, daß eine Proportionalität zwischen dem E-Modul des Betons und seiner US-Geschwindigkeit einerseits und dem E-Modul und seiner Druckfestigkeit andererseits besteht. Bei herkömmlichen Auswertungen wird allerdings nicht in Rechnung gestellt, daß die Zuschläge einen erheblichen Beitrag zum E-Modul des Betons erbringen, dessen Festigkeit aber in erster Näherung durch den Zementstein bestimmt bzw. begrenzt wird.

Der Widerspruch der üblichen Berechnung von Druckfestigkeiten des Betons aus Ultraschallgeschwindigkeiten besteht somit darin, daß die Festigkeit des Betons wesentlich durch den Zementstein bestimmt wird (Grundlage des üblichen Mischungsentwurfs für Beton), die Ultraschallgeschwindigkeit aber das summarische Signal für Zementstein und Zuschläge darstellt. Während sich die Geschwindigkeit im Zementstein mit wachsender Zementstein- bzw. Betondruckfestigkeit laufend ändert, bleibt der Geschwindigkeitsanteil der Zuschläge über den gesamten Erhärtungszeitraum constant. Bekannt ist weiterhin, daß der Anteil der Zuschläge in Betonen gleicher Druckfestigkeit in Abhängigkeit von Konsistenz, Sieblinie und Zusatzmitteleinsatz in weiten Grenzen variieren kann (ca. 670...770 dm³ Zuschlag je 1 m³ Beton). Die Auswirkungen dieser Verhältnisse werden aus Bild 1 ersichtlich, das für unterschiedliche Betonzesteuren die Relationen zwischen US-Geschwindigkeit und Druckfestigkeit zeigt (Angaben zu den Rezepturen 1-3 in Tab. 1).

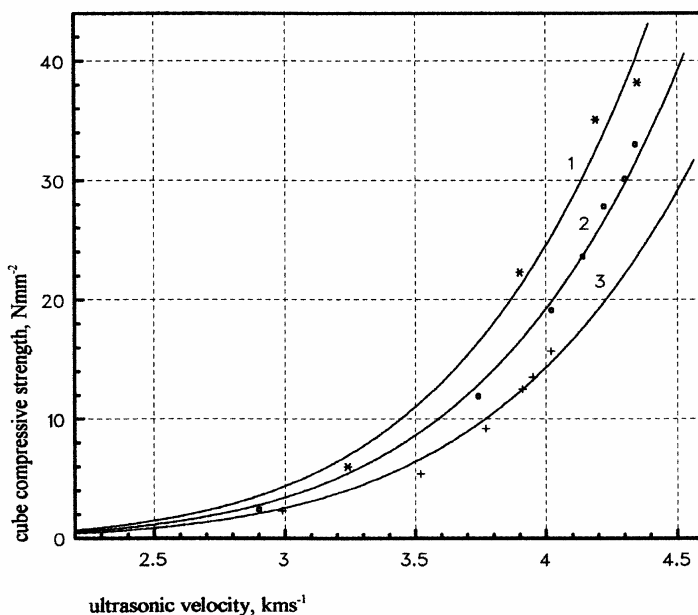


Bild 1:

Relationen zwischen
Würfel­druckfestigkeit und
US-Geschwindigkeit
für 3 Betone
unterschiedlicher Rezeptur
(siehe auch Tab. 1)

Der gleichen US-Geschwindigkeit entsprechen bei unterschiedlichen Rezepturen zum Teil extrem differierende Druckfestigkeiten, im vorliegenden Fall beträgt die Differenz bei $v(\text{US}) = 4,30 \text{ km/s}$ über 15 N/mm² zwischen Rezeptur 1 und 3.

Das ist wesentlich das Resultat der unterschiedlichen ZS-Anteile und der differierenden US-Geschwindigkeiten in Zuschlag (i.d.R. um 5 km/s, kaum jedoch unter 4,5 km/s) und Zementstein (verschieden je nach Erhärtungszustand, i.d.R. unter 4 km/s, kaum jedoch über 4,5 km/s). Es konnte nachgewiesen werden, daß bei Bezug der Druckfestigkeit des Betons auf die US-Geschwindigkeit im Zementstein eine einheitliche Druckfestigkeits-Ultraschall-Relation besteht. Darstellungen zu einem Berechnungsmodell und experimentellen Untersuchungen finden sich bei KÄßNER, B. et al.: Auswertung von Ultraschallmessungen für die Bestimmung der Betondruckfestigkeit, betontechnik (Berlin) 10 (1989) H. 6, S. 179-180 und KÄßNER, B. et al.: Ultrasonic Measurement for the Determination of Strength Development of Hardening Concrete, Intern. Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin 1995, Tagungsband II, S.1165-1168.

Das Prinzip der Methode besteht darin, aus der US-Geschwindigkeit des Betons unter Berücksichtigung der Betonrezeptur die US-Geschwindigkeit im Zementstein zu berechnen. Zwischen dieser und der Betondruckfestigkeit besteht eine im Bereich der Normalbetone weitgehend universell gültige Beziehung (in Entsprechung zum sogenannten Wasser/Zement-Wert-Gesetz). In Tabelle 1 ist die entsprechende Auswertung zu den in Bild 1 dargestellten Ergebnissen angeführt.

Tabelle 1: Betondruckfestigkeiten in Gegenüberstellung zwischen zerstörender Prüfung (Würfel) und zerstörungsfreier Prüfung mittels Ultraschall bei rezepturspezifischer Auswertung der US-Geschwindigkeit

Rezeptur		Rezeptur – Zusammensetzg.			Zeit	v - US	Druckfest. (N/mm ²)	
Nr.	Komponenten	Masse (kg)	Dichte (kg/dm ³)	Volum. (dm ³)	(h)	(km/s)	Würfel (200 mm)	US
1	CEM I/32,5 R	412	3,10	133	12	3,24	6,0	6,5
	Wasser	165	1,00	165	24	3,90	22,3	19,9
	w/z	0,40	-	-	48	4,19	35,1	32,1
	Luftporen	-	-	8	72	4,35	38,2	41,7
	BV	3,5	1,15	3	96	-	47,0	-
	Kiessand 0/8 (Quarz)	1095	2,64	415	120	-	48,2	-
	Kies 8/16 (Quarz)	730	2,64	276				
2	CEM II/32,5	320	3,06	105	24	2,90	2,4	2,9
	Wasser	155	1,00	155	48	3,74	11,9	12,5
	w/z	0,50	-	-	72	4,02	19,1	20,8
	Luftporen	-	-	13	96	4,14	23,6	25,5
	BV	3,3	1,15	3	120	4,22	27,8	30,2
	Kiessand 0/8 (Quarz)	1147	2,64	434	144	4,30	30,1	34,0
	Splitt 8/16 (Diabas)	840	2,90	290	168	4,34	33,0	37,1
3	CEM III/32,5-NW	233	3,02	77				
	Wasser	140	1,00	140	48	2,99	2,3	2,5
	w/z	0,60	-	-	72	3,52	5,4	6,5
	Luftporen	-	-	19	96	3,77	9,2	10,5
	BV	3,8	1,15	3	120	3,91	12,5	13,6
	Kiessand 0/8 (Quarz)	1205	2,64	457	144	3,95	13,5	14,5
	Splitt 8/16 (Kalkstein)	813	2,67	304	168	4,02	15,7	16,9

Der Vorteil dieser neuen Methode besteht darin, daß im Gegensatz zu der bekannten Verfahrensweise (Ermittlung formaler Regressionsbeziehungen zwischen Schallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit für jeden zu prüfenden Beton) aufgrund einer funktional begründeten und damit notwendigerweise rezepturspezifischen Auswertung die bisher geforderten aufwendigen Korrelationsuntersuchungen für jeden zu prüfenden Beton entfallen. Die Folge der bisher vorgeschriebenen Verfahrensweise ist die Tatsache, daß die herkömmliche US-Methodik kaum zur Anwendung kommt, weil für normale praktische Anwendungen der geforderte Aufwand jeweiliger Korrelationsuntersuchungen selten in Kauf genommen wird.

Das Problem der entwickelten Methode besteht darin, daß eine Berechnung der US-Geschwindigkeit des Zementsteins aus der US-Geschwindigkeit des Betons unter Beachtung der Rezeptur natürlich voraussetzt, daß die US-Geschwindigkeit der Zuschläge bekannt ist. Das ist keinesfalls ein triviales Problem, wenn man an Zuschläge unterschiedlicher stofflicher Beschaffenheit (silicatisch, calcitisch), unterschiedlicher Dichte (Bereich von Normalzuschlägen immerhin von 2,55 bis 2,90 kg/dm³) und anisotroper Eigenschaften auch bezüglich der Schallausbreitung denkt. In umfassenden Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, daß – nicht von vornherein den Erwartungen entsprechend – sowohl unterschiedlichen silicatischen als auch calcitischen Zuschlägen mittlerer Rohdichte bei statistischer Verteilung im Beton (Ausgleich anisotroper Schallgeschwindigkeiten) eine US-Geschwindigkeit von 5,00 km/s zugeordnet werden kann. Davon kann es Abweichungen geben, die zu beachten sind, wobei sowohl US-Messungen an Zuschlägen (soweit geeignete Proben verfügbar) als auch systematische Simulationsberechnungen (möglich mittels Auswertesoftware des Meßgerätes) schnell zum Ziel führen können.

Die Methode wurde vorzugsweise entwickelt zur Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit von Betonen, sie ist auch anwendbar für Betonbauteile, die noch keine wesentliche Austrocknung erfahren haben. Bei älteren bzw. stärker ausgetrockneten Betonbauteilen ist zu bedenken, daß Porenwasser (US-Schallgeschwindigkeit in Wasser ca. 1,50 km/s) durch Luft (US-Schallgeschwindigkeit in Luft ca. 0,33 km/s) ersetzt wird. Das hat Auswirkung auf die summarisch gemessene US-Geschwindigkeit des Betons, die nicht ohne weiteres quantitativ auswertbar sind.

Zu beachten ist in jedem Fall, daß eine solche auf komplexen Zusammenhängen beruhende Prüfmethode für Beton immer stoffliche und meßtechnische Überlegungen erfordert, wozu im Gerätehandbuch entsprechende Hinweise gegeben werden. Beispielsweise seien folgende Überlegungen angeführt:

- Die Meßstrecke darf nicht zu kurz gewählt werden (mindestens das Zehnfache des Zuschlag-Größtkorns), weil die zu durchlaufenden Streckenanteile von Zementstein und Zuschlag deren Volumenanteilen im Beton entsprechen müssen.
- Bei Messungen an kleinen oder flachen Proben ist darüber hinaus zu berücksichtigen, daß die Prüfkörperabmessungen senkrecht zur Meßstrecke mindestens die Größe der Wellenlänge des Ultraschalls aufweisen sollen (gegebenenfalls Prüfköpfe mit anderer US-Frequenz wählen).
- Beim Einsatz von Betonzusatzstoffen ist zu überlegen, ob deren Zuordnung sinnvoller zum Zementstein (Beitrag zu Erhärtungsprodukten, z.B. Microsilica) oder zu Zuschlag (wenn überwiegend inert, z.B. Kalksteinmehl) erfolgen sollte.
- Probleme der Kopplung Sonde-Prüfobjekt und der Schallausbreitung über Bewehrungsstäbe oder Schalung haben bei der Geräteentwicklung zwar eine wichtige Rolle gespielt, sind aber stets zu bedenken.

Die Gestaltung von Hard- und Software des Gerätes bietet Möglichkeiten zur Berücksichtigung sowohl stofflicher Besonderheiten eines Betons als auch spezieller Probleme des Prüfobjektes (z.B. Größe, Zugängigkeit) und erlaubt somit Lösungen für unterschiedliche Prüfaufgaben.

Ultraschall-Universalprüfsystem für Beton CONSONIC 60

Das Gerät wurde unter den Prämissen der angeführten Zielstellung und der dargestellten Auswertemethodik entwickelt. Selbstverständlich sind US-Geschwindigkeitsmessungen mit hoher Präzision an unterschiedlichen Werk- bzw. Baustoffen möglich, Hauptzielstellung war jedoch die Perfektionierung der Meß- und Auswertemöglichkeiten für Beton bzw. Betonbauteile. Diese Möglichkeiten sind im Handbuch ausführlich erläutert und seien hier zusammengefaßt dargestellt.

Messung der Ultraschall-Laufzeit bzw. Ultraschall-Geschwindigkeit

- Es sind kontinuierliche (Tauchsonde) und diskontinuierliche Messungen (Flächen- und Tastprüfköpfe) möglich. Bei Flächen- und Spitzenschwingern sind Prüfköpfe unterschiedlicher Frequenz für verschiedene Aufgaben (Form und Größe des Prüfobjektes, Erhärtungszustand) vorhanden. Da 6 Meßkanäle verfügbar sind, können 6 kontinuierliche Messungen gleichzeitig erfolgen, z.B. im Labor an bis zu 6 verschiedenen Rezepturen oder am Bauteil an bis zu 6 Meßstellen. Mit diskontinuierlichen Messungen kann man in zeitlicher Abfolge natürlich beliebig viele Meßstellen erfassen. Beide Meßmöglichkeiten können unter Nutzung verschiedener Kanäle auch parallel erfolgen.
- Für die kontinuierliche Messung (bei sofortiger Angabe der erreichten Druckfestigkeit) werden Tauchsonden benutzt, die in den Beton eingesetzt und nach Abschluß der Messung gezogen werden. Schallgeschwindigkeit (und zusätzlich Temperatur) des Betons werden in bis zu 8 cm Tiefe gemessen, um Verfälschungen der Ergebnisse durch die nicht repräsentative Betonoberfläche (Verteilung Zuschlag / Zementleim und Entmischung) zu vermeiden. Mit der Tauchsonde wurde ein Haupthindernis kontinuierlicher Messungen, die Kopplung Prüfkopf – Beton, gelöst, da zwischen metallischem US-Emitter bzw. –empfänger und Beton eine Haftung wie zwischen Beton und Bewehrung erreicht wird. Es sind Messungen mit engem Abstand der Prüfköpfe zu einer Bewehrung oder einer metallischen Formwand möglich.
- Diskontinuierliche bzw. einmalige Messungen an Betonprüfkörpern oder –bauteilen erfolgen mit Flächen- oder Tastprüfköpfen je nach Zugängigkeit über direkte oder indirekte Durchschallung.

Die Ankopplung der Flächenprüfköpfe erfolgt über ein Kopplungsmittel, eventuell nach Vorbereitung einer zu rauhen Betonoberfläche. Bei Tastprüfköpfen kann ein guter Kontakt auch ohne Kopplungsmittel erreicht werden. Spitzenschwinger sind vorteilhaft bei nur einseitiger Zugängigkeit des Betons einzusetzen, da die Meßstrecke exakter definierbar ist. Außerdem kann bei sorgfältigem Arbeiten auch auf rauhen Betonoberflächen angesetzt werden (Spritzbeton). Zu achten ist dabei auf eine entsprechende Dicke des Betons (erwähntes Verhältnis zur Wellenlänge des Ultraschalls), da es sich um eine Durchschallungsmessung handelt.

- Es ist möglich, Prüfköpfe entsprechender Form, Größe und Frequenz für spezielle Messungen bereit zu stellen, z.B. Minitauchsonden für Mörteluntersuchungen.

Auswertung der Ultraschall-Geschwindigkeit – Berechnung der Betondruckfestigkeit

Auf der Grundlage der dargestellten Auswertemethodik und zahlreicher Untersuchungen zur Erfassung des Zusammenhangs zwischen dem Erhärtungszustand des Zementsteins und der Druckfestigkeit des Betons wurde eine Software entwickelt, die es gestattet, aus der US-Geschwindigkeit des Betons bekannter Rezeptur seine Druckfestigkeit zu berechnen, ohne Korrelationsuntersuchungen vornehmen zu müssen. Die Auswertung beruht darauf, daß aus der US-Geschwindigkeit des Betons die US-Geschwindigkeit des entsprechenden Zementsteins berechnet wird. Bekannt sein muß daher die Betonrezeptur (quantitativer Anteil der Zuschläge) und die mittlere US-Geschwindigkeit im Zuschlag (im allgemeinen mit 5,00 km/s anzunehmen). Die Kenntnis der korrekten Rezeptur des Betons ist unabdingbare Voraussetzung für die Festigkeitsberechnung. Zur Genauigkeit der Ergebnisse bzw. ihrer Bewertung folgen später Aussagen. Hinzuweisen ist auf die Tatsache, daß Besonderheiten des Betons zu fehlerhaften Ergebnissen führen können, wofür zwei Ursachen in Betracht kommen:

- Die verwendeten Zuschläge zeigen abweichende US-Geschwindigkeiten (petrografische Besonderheiten, naheliegend bei Zuschlägen geringer oder hoher Rohdichte). In diesem Fall wird die US-Geschwindigkeit des Zementsteins falsch berechnet. Die US-Geschwindigkeit des Zuschlags kann per Eingabe verändert werden.
- Bei strukturellen Besonderheiten des Zementsteins (z.B. bewirkt durch Zusatzstoffe oder Zusatzmittel) kann die Beziehung zwischen US-Geschwindigkeit und Druckfestigkeit beeinflusst werden. In diesem bei üblichen Betonen kaum auftretenden Fall können die Parameter der Berechnungsgleichung aufgrund vorliegender Meßergebnisse und einige Simulationsrechnungen mit dem Programm angepaßt werden.

Bei den Prüfungen ist prinzipiell zu unterscheiden zwischen kontinuierlichem und diskontinuierlichem Meßverfahren. Diskontinuierliche Messungen mit Flächen- oder Spitzenschwingern sind durchführbar an entschalteten Beton und werden im Programm als Festbetonmessung bezeichnet. Kontinuierliche Messungen mit Tauchsonden erfordern deren Einsetzen in den frischen Beton und werden als Frischbetonmessung bezeichnet. In diesem Fall ist bereits die frühe Festigkeitsentwicklung (etwa ab 1 N/mm²) zugänglich. Da gleichzeitig die Betontemperatur gemessen wird, sind ab einem bestimmten Zeitpunkt auch Prognosen über die zu erwartende zukünftige Festigkeitsentwicklung möglich. Die folgenden stichpunktartigen Angaben beinhalten auch die gegenüber der Festbetonmessung erweiterten Möglichkeiten der Frischbetonmessung.

Rezeptur: Einzugeben sind Massen und Dichten der Komponenten, getrennt nach Zementleim (Zement, Wasser, Poren, Zusatzmittel, Zusatzstoffe) und Zuschlägen (dort Möglichkeit der Einflußnahme durch Veränderung der US-Geschwindigkeit der einzelnen Zuschlagfraktionen).

Berechnung Druckfestigkeit: Die Berechnung erfolgt aus der Schallgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Betonrezeptur auf der Grundlage der dargestellten Methodik. Die berechnete Festigkeit entspricht der eines Würfels mit 200 mm Kantenlänge. Für Normalbetone gilt eine feste Beziehung exponentieller Art zwischen der US-Geschwindigkeit des Zementsteins und der Druckfestigkeit des Betons. Bei ungewöhnlichen Betonen (abweichende Zementsteinstruktur) kann diese Beziehung beeinflusst werden. Dem kann durch Veränderung zweier Parameter Rechnung getragen werden (Vergleich mit Würfeldruckfestigkeiten und Anpassung durch Simulationsrechnungen mit dem Programm).

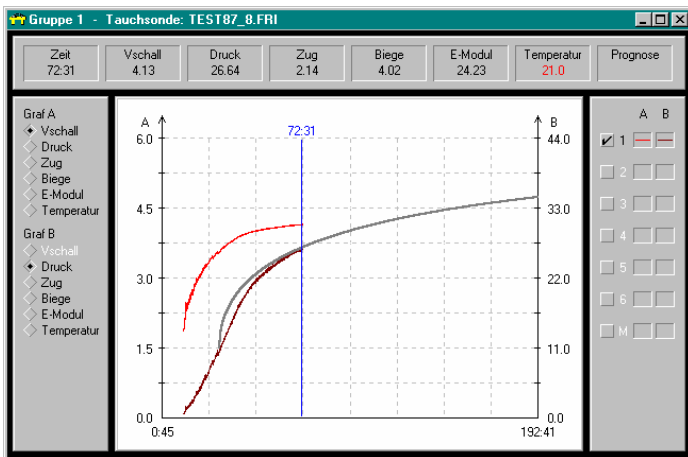
Prognose: Programmintern ist aus den Rezepturparametern die 28-Tagefestigkeit des Betons berechenbar. Wenn der Beton 25 % seiner 28-Tagefestigkeit erreicht hat, kann eine Prognose über die weiterhin zu erwartende Festigkeitsentwicklung abgerufen werden. Dazu ist erforderlich eine Charakteristik des Zementes (Normfestigkeit, Erhärtung normal, schnell (R), langsam (NW)), evtl. des Zusatzstoffes (Inertstoff, SFA, Microsilica) und der erwarteten zukünftigen Betontemperatur (unterstützt durch Angabe der Meßwerte zum bisherigen Temperaturverlauf).

Berechnung Zug- und Biegezugfestigkeit, E-Modul: Die Entwicklung dieser Kenngrößen erfolgt aufgrund bekannter Beziehungen zur Druckfestigkeit des Betons. Die entsprechenden Gleichungen werden ausgewiesen, ihre Parameter sind veränderbar (z.B. wenn wie bei Microsilicabeton bekannt ist, daß die Beziehung zwischen Druckfestigkeit und E-Modul nicht der eines Normalbetons entspricht).

Alarmierung: Das Erreichen einer bestimmten Druckfestigkeit, US-Geschwindigkeit oder Betontemperatur kann optisch signalisiert werden.

Zeit	Vschall	Druck	Zug	Biege	E-Modul	Temperatur	Prognose	
72:31	4.13	26.64	2.14	4.02	24.23	21.0		
Zeit h:m	K	Vschall km/s	Druck N/mm²	Zug N/mm²	Biege N/mm²	E-Modul kN/mm²	Temperatur °C	Prognose N/mm²
6:01	1	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	16.9	
9:01	1	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	17.4	
12:01	1	2.108	0.83	0.21	0.40	4.28	17.8	
15:01	1	2.644	2.26	0.41	0.77	7.05	18.0	
18:01	1	2.926	3.68	0.57	1.07	9.00	18.7	
21:01	1	3.137	5.24	0.72	1.36	10.74	18.8	
24:01	1	3.307	6.93	0.87	1.64	12.36	18.7	
27:01	1	3.462	8.93	1.03	1.94	14.02	18.5	
30:01	1	3.563	10.52	1.15	2.16	15.22	18.3	
33:01	1	3.690	12.93	1.32	2.48	16.88	18.1	15.99
36:01	1	3.780	14.96	1.46	2.73	18.15	18.1	17.97
39:01	1	3.860	17.03	1.59	2.98	19.37	17.9	19.38
42:01	1	3.920	18.78	1.70	3.18	20.34	17.9	20.50
45:01	1	3.969	20.34	1.79	3.36	21.17	17.8	21.45
48:01	1	3.996	21.25	1.84	3.46	21.64	17.9	22.26
51:01	1	4.027	22.36	1.91	3.58	22.19	17.9	22.99
54:01	1	4.050	23.21	1.96	3.67	22.61	17.8	23.64
57:01	1	4.068	23.91	1.99	3.74	22.95	17.8	24.24
60:01	1	4.081	24.42	2.02	3.79	23.20	17.5	24.78

Bild 2:
Beispiel für
Ergebnisdarstellung
einer
Tauchsondenmessung
als
Tabelle und
Diagramm



Ergebnisse: Die Ergebnisse für Druckfestigkeit, Betontemperatur, Schallgeschwindigkeit, Zug- und Biegezugfestigkeit, E-Modul und Prognose werden tabellarisch und grafisch für wählbare Zeitintervalle ausgewiesen (Bild 2).

Einschätzung der Ergebnisse

Aus einer Vielzahl von Untersuchungen läßt sich die pauschale Einschätzung ableiten,

daß Abweichungen der mittels US-Messungen ermittelten Druckfestigkeiten von Würfel-Druckfestigkeiten im Bereich zwischen 10 und 50 N/mm² ≤ 20 % betragen (in der Regel geringere Abweichungen), wenn

- Mittelwerte verglichen werden (3 Würfel, 3 US-Messungen),
- die Rezeptureingabe genau erfolgt,
- keine ungewöhnlichen Rezepturen vorliegen,
- Normalzuschläge eingesetzt werden,
- die Prüfung an erhärtenden Betonen ohne übermäßige Austrocknung erfolgt (Betonalter i.d.R. ≤ 28 d),
- der Beton im Meßstreckenbereich repräsentativ zusammengesetzt ist,
- die im Programm vorgegebenen Berechnungsparameter benutzt werden.

Größere Abweichungen können

- eine erwünschte Information über den Zustand eines Bauteils im Vergleich zum ungestörten Probekörper geben,
- ein Hinweis darauf sein, die stoffliche Zusammensetzung des Betons oder die meßtechnischen Bedingungen einer Analyse zu unterziehen,
- darauf hindeuten, daß die US-Geschwindigkeiten in den Zuschlägen von der Vorgabe abweichen,
- dazu führen, daß die Korrelationsparameter anzupassen wären (für Normalbetone nicht zu erwarten).

In Tabelle 2 sind Meßergebnisse angeführt, die diese Aussagen bestätigen. Es handelt sich um Laboruntersuchungen an 15 Rezepturen mit 66 Wertepaaren (Würfeldruckfestigkeit – US-Festigkeit) über einen Druckfestigkeitsbereich von 1,7 bis 66,3 N/mm². Dabei wurde das US-Ergebnis nur durch eine Messung, die Würfeldruckfestigkeit durch Prüfung von 2 Würfeln bestimmt.

Untersucht wurde ein großer Rezepturbereich durch Einsatz von CEM I 32,5R, CEM I 42,5R, CEM III/B 32,5-NW, Sand 0/2a, Kiessand 2/8, Splitt 8/16, SFA, Kalksteinmehl, Microsilica und BV-Mittel und Rezepturen mit Zement = 292...450 kg/m³, w/z bzw. w/bm = 0,37...0,61, Sieblinien A16...C16, SFA = 80 kg/m³, KSM = 80 kg/m, MS = 30 kg/m³, BV = 0,4...1,5 %.

Die Abweichungen betragen durchschnittlich absolut +/- 3,0 N/mm² und relativ +/- 9,5 % (einschließlich Ausreißer) und maximal 7,0 N/mm² bzw. 19,5 %, wenn 4 Ausreißer (davon 3 bei einer Rezeptur) nicht einbezogen werden. Im vorliegenden Fall – nur eine US-Messung und nur 2 Würfel – müssen solche Ausreißer in Kauf genommen werden.

In Tabelle 3 sind unterschiedliche Meßergebnisse aus Labor (Zementfestigkeit) und an Transport- und Fertigteilbeton angeführt, die diese Einschätzung bestätigen.

Tabelle 2: Laborergebnisse zum Vergleich von Druckfestigkeiten Würfel - Ultraschall

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	47,0	-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	+4,5
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

Tabelle 3: Druckfestigkeitsvergleiche Würfel – Ultraschall – KINFEST

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 11,8 16,5 34,3	4,3 12,5 16,5 37,0	+1,1 +0,7 +/-0 +2,7	---- +6 +/-0 +8	
2	B 25 CEM I 32,5 R z = 275 kg, ksm = 30 kg, w/z = 0,65	unterschiedlich	7,4 15,1 19,3	8,6 15,7 19,5	+1,2 +0,6 +0,2	+16 +4 +1	
3	B 35 CEM I 32,5 R z = 340 kg, w/z = 0,48	unterschiedlich	10,2 20,5 25,3	11,7 22,3 26,4	+1,5 +1,8 +1,1	+15 +9 +4	
4	B 45 CEM I 42,5 R z = 340 kg, f = 85 kg w/bm = 0,50	unterschiedlich	11,4 24,9 29,8 38,6	14,3 25,0 30,5 47,8	+2,9 +0,1 +0,7 +9,2	+25 +/-0 +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 14,8 26,1 38,0	4,7 15,3 28,1 42,1	+1,2 +0,5 +2,0 +4,1	---- +3 +8 +11	
2	CEM I 42,5 R Labor Zementwerk	unterschiedlich	17,8 31,5	20,5 28,4	+2,7 -3,1	+15 -10	
3	CEM I 52,5 R Labor Zementwerk	unterschiedlich	17,9 25,1 41,9	18,2 23,2 32,5	+0,3 -0,8 -9,4	+2 -3 -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 12 14 16 18 20 22	30,9 33,7 35,3 35,7 35,0 33,4 32,4	3,9 7,0 10,9 14,9 18,4 21,3 23,7	2,3 6,4 11,7 17,0 20,9 22,2 23,8	-1,6 -0,6 +0,8 +2,1 +2,5 +0,9 +0,1	---- -8,6 +6,8 +14,0 +13,6 +4,2 +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 9 11 13 15 17 19	29,5 32,5 33,3 32,5 31,0 30,0 29,2	2,0 3,8 6,8 9,6 12,3 14,7 16,9	1,3 3,0 5,6 8,8 12,0 14,9 17,6	-0,7 -0,8 -1,2 -0,8 -0,3 +0,2 +0,7	---- ---- -17,6 -8,3 -2,4 +1,4 +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 					

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 (im folgenden: *Interne Bewertung der Ergebnisse*). 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. Wenn die oben beschriebene Einschätzung der Ergebnisse dabei nicht ausreichend erscheint, kann eine statistische Auswertung vorgenommen werden, die wenig aufwendig ist, aber eine sichere Bewertung ermöglicht.

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 (im folgenden: *Normgerechte Bewertung der Ergebnisse*).

Interne Bewertung von Ergebnissen

Die Meß- und Auswertemethode macht aufgrund der rezepturspezifischen Auswertung der US-Geschwindigkeiten Korrelationsanalysen überflüssig. Das heißt, daß die Regressionsbeziehungen interner Bestandteil der Auswertesoftware sind. In der Regel wird man bei Einführung einer neuen Meßmethode aber ohnehin sicherheitshalber Vergleiche mit Würfeldruckfestigkeiten vornehmen. Insofern bietet es sich an, nicht nur die US-Ergebnisse hinsichtlich ihrer Streuung statistisch zu bewerten, sondern ihre Übereinstimmung mit den Würfeldruckfestigkeiten durch eine Korrelationsanalyse zu überprüfen. Der erforderliche Rechenaufwand ist gegenüber dem Prüfaufwand verschwindend gering, so daß auf diese Auswertung nicht verzichtet werden sollte. Gegenüber der herkömmlichen US-Methode hat man den großen Vorteil, daß eine solche Bewertung nicht für jede Rezeptur oder jedes Objekt erfolgen muß, da die Berücksichtigung der Rezepturspezifika in die Software integriert ist. Das heißt, eine einmalig für mehrere Betone erfolgte Auswertung ist von universeller Gültigkeit. Im folgenden wird die Auswertung anhand der in Tabelle 2 für ein großes Rezepturspektrum angeführten Ergebnissen dargestellt.

Repräsentativität der Ergebnisse

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

$$\beta(\text{Würfel}) = -0,15 + 0,97 \cdot \beta(\text{US}) \quad (1)$$

Damit ist für einen großen Rezepturbereich nachgewiesen, daß die Relation zwischen US-Druckfestigkeit und Würfeldruckfestigkeit nahezu 1 : 1 ist, was die Aussagen über die Qualität der Methode bestätigt. Das bedeutet praktisch, daß das US-Ergebnis keiner Korrektur bedarf. Eine geringfügige Verbesserung der Ergebnisse kann vorgenommen werden, wenn man aufgrund dieser Beziehung den Meßwert $\beta(\text{US})$ zu einem Rechenwert $\beta(\text{cal})$ korrigiert:

$$\beta(\text{cal}) = -0,15 + 0,97 \cdot \beta(\text{US}) \quad (2)$$

Streuung der Ergebnisse

Wenn neben den US-Ergebnissen ohnehin Würfeldruckfestigkeiten geprüft werden, kann man die Auswertung 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

$$s = \left(\frac{1}{2} (x_1 - x_2)^2 / m \right)^{0,5} \quad (3)$$

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:

$$s = 1,20 + 0,04 \cdot \beta(\text{US}) \text{ N/mm}^2 \quad (4).$$

Damit liegt eine weitere 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

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

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.

Damit kann eingeschätzt werden, daß an einer Vielzahl unterschiedlicher Rezepturen die Qualität der US-Ergebnisse im Vergleich zu Würfeldruckfestigkeiten nachgewiesen werden konnte. Das bestätigt die eingangs getroffene Aussage, 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.

Normgerechte Bewertung von Ergebnissen

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).

Im Unterschied zu der in DAfStb-Heft 422 ausgewerteten US-Methode beinhalten im hier betrachteten Fall 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. Es liegt die für jedes untersuchte Betonobjekt zutreffende Druckfestigkeit bereits 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 im folgenden beschriebenen Auswertungen bzw. Nachweise erfordern nur einen geringen Rechenaufwand. Mit dem beim Gerätehersteller verfügbaren Programm ist er minimal.

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

$$\beta(\text{cal}) = -0,15 + 0,97 \cdot \beta(\text{US}) \quad (1).$$

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 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 T. 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):

$\beta(\text{US1})=32$	$\beta(\text{cal1})=30,9$	$\beta(\text{VB}/50/1)=28,6$	$\beta(\text{VB}/80/1)=26,6$
$\beta(\text{US2})=35$	$\beta(\text{cal2})=33,8$	$\beta(\text{VB}/50/2)=31,5$	$\beta(\text{VB}/80/2)=27,2$
$\beta(\text{US3})=29$	$\beta(\text{cal3})=28,0$	$\beta(\text{VB}/50/3)=25,7$	$\beta(\text{VB}/80/3)=21,4$
		$\beta(\emptyset) = 28,6$	$\beta(\emptyset) = 25,1$

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.

Einschätzung der Methode

Die in Tabelle 2 angeführten Ergebnisse wurden von Personen gewonnen, die keine professionellen US-Anwender sind, aber in die Meßmethodik eingewiesen wurden. Die fast 1:1-Übereinstimmung der US- und Würfel-Ergebnisse für unterschiedlichste Rezepturen bestätigt die beschriebene US-Methode.

Es ist erkennbar, daß die an anderen Stellen gewonnenen Ergebnisse, die in Tabelle 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-Methoden.

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).

Die Methode kann prinzipiell als erste wirklich zerstörungsfreie und kontinuierlich einsetzbare Meßmethode zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit bezeichnet werden. Insofern muß man allerdings auch mit Akzeptanzproblemen bei der Prüfung von Beton rechnen, obwohl die begrenzte Aussagekraft der Würfelprüfung bei Erhärtungsprüfungen 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 erfolgreich Anwendung findet, sind Anwenderpublikationen noch selten geblieben.

GEOTRON-ELEKTRONIK Rolf Krompholz

Ultraschall-Meßtechnik

Werkstatt für elektronische Geräte
Entwicklung und Fertigung

Leite 2
D - 01796 Pirna-Neundorf

Tel / Fax: +49 (0 35 01) 76 23 67

Internet: <http://www.geotron.de>

e-Mail: krompholz@geotron.de

Partner:

COBET Ingenieurbüro

Prof. Gert Gebauer
Prof. Bernd Käßner

Döbbricker Dorfstraße 7
D – 03054 Cottbus

Tel / Fax: +49 (03 55) 86 14 02

GEOTRON-ELEKTRONIK