

9/2007

57. Jahrgang · G 1739

beton

Die Fachzeitschrift für Bau+Technik

- Hochleistungsfaserbeton zur Ertüchtigung von Abdichtungskonstruktionen
- Zerstörungsfreie Druckfestigkeitsermittlung am Überbau der Saalebrücke BAB 4
- Marktübersicht: Betonmischanlagen



www.verlagbt.de

VERLAG  BAU+TECHNIK

Sonderdruck

Zerstörungsfreie Druckfestigkeitsermittlung am Überbau der Saalebrücke BAB 4, Jena

Ultraschallmessung als Alternative zur Druckprüfung

Dirk, Niehoff, Dorndorf-Stuednitz

Ultraschallmessung als Alternative zur Druckprüfung

Zerstörungsfreie Druckfestigkeitsermittlung am Überbau der Saalebrücke BAB 4, Jena

Dirk Niehoff, Dorndorf-Steudnitz

Die Bestimmung der Frühfestigkeit von Beton wird normgemäß durch Druckprüfung von Erhärtungswürfeln durchgeführt. Problematisch ist häufig die Übertragbarkeit der Messergebnisse auf die Druckfestigkeit des Bauteils. In dem Beitrag wird ein Messverfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe die Entwicklung der Druckfestigkeit direkt am Bauteil bestimmt werden kann. Gleichzeitig ist es möglich, die zu erwartende 28-Tage-Festigkeit bereits in einem frühen Erhärtungsstadium zu prognostizieren. Die Praxistauglichkeit des Verfahrens sowie die Verifizierung der ermittelten Messwerte werden beispielhaft an einem Bauwerk aus dem Verkehrsprojekt Deutsche Einheit vorgestellt. Sowohl bei der Errichtung von Ingenieurbauwerken als auch bei der Produktion von Fertigteilen können die exakten Daten über den Verlauf der Frühfestigkeitsentwicklung des Betons die Basis bilden für eine zuverlässige und effiziente Baustellen- und Produktionsplanung.

1 Aufgabenstellung

Das Thüringer Landesamt für Straßenbau erteilte dem Kompetenzzentrum dornburger zement den Auftrag zur kontinuierlichen Überwachung der Druckfestigkeitsentwicklung des Betons für die zu errichtenden Überbautakte. Es sollte sowohl die Frühfestigkeit des eingebauten Betons im Bauteil mittels kontinuierlich ablaufender Ultraschallmessung mit anschließender Druckfestigkeitsberechnung als auch die zu erwartende Festigkeit nach 28 Tagen mittels Prognoserechnung bestimmt werden. Jede einzelne Messreihe sollte einen Zeitraum von sieben Tagen umfassen. Ferner war die Praxistauglichkeit der verwendeten Prüftechnik nachzuweisen und ein Vergleich der Ergebnisse aus der Ultraschallmessung mit denen einer Druckprüfmaschine durchzuführen.

Die Bestimmung der Frühfestigkeit des Bauteilbetons sollte ferner dazu dienen, die Eignung der üblichen Erhärtungswürfel zur Bestimmung der Vorspannfestigkeit zu bewer-

ten. Hierbei steht sowohl der jeweils festgelegte Prüfzeitpunkt als auch der tatsächliche Vergleich mit den Druckfestigkeiten des Bauteilbetons im Mittelpunkt der Betrachtungen. Die Ermittlung der zu erwartenden Festigkeiten nach 28 Tagen sollte zeigen, dass es möglich ist, bereits kurz nach der Betonage die Qualität des Betons hinsichtlich seiner Druckfestigkeit zu beurteilen, ohne 28 Tage auf die Resultate der Druckprüfung zu warten.

Die hier vorgestellten Untersuchungen erfolgten an den Takten 2 sowie 8 bis 19, Ergebnisse werden beispielhaft aufgeführt.

2 Beschreibung des Verfahrens und der Gerätetechnik

Das Verfahren, das hier zum Einsatz kam, basiert auf der Messung der Laufzeit einer Longitudinalwelle innerhalb einer bekannten Messstrecke. Mithilfe der dadurch ermittelten Ultraschallgeschwindigkeit wird, ausgehend von der jeweils verwendeten Rezeptur, die Druckfestigkeit des untersuchten Betons berechnet.

Bei dieser patentierten Methode werden aus der Stoffraumrechnung des Betons die Volumenanteile für Gesteinskörnung und Zementstein ermittelt. Die Ultraschallgeschwindigkeit wird hierbei in die entsprechenden Anteile dieser Komponenten zerlegt und derjenige Anteil ermittelt, der auf den Zementstein entfällt. Die Ultraschallgeschwindigkeit im Zementstein lässt sich nun direkt in die Betondruckfestigkeit umrechnen, da für Normalbetone die Zementsteinfestigkeit für die Druckfestigkeit des Betons bestimmend ist.

Da die Berechnung auf der Eingabe der Rezeptur basiert, sind die ausgegebenen Druckfestigkeiten auch nur für die jeweilige Rezeptur zutreffend. Die Notwendigkeit der Rezeptureingabe im Messgerät bedeutet, dass

gleiche Ultraschallgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Rezepturen demzufolge auch zu unterschiedlichen Druckfestigkeitsergebnissen führen würden.

Bei der bisher bekannten Verfahrensweise wird für den mittels Ultraschallmessung zu untersuchenden Beton eine Bezugskurve zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit zu verschiedenen Zeitpunkten (Druckfestigkeiten) erarbeitet. Wenn diese Funktion vorliegt, kann am Bauteil der Beton mit derselben Rezeptur untersucht und aus den gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten die Druckfestigkeit bestimmt werden. Die Korrelationskurve bezieht sich dabei ausschließlich auf den im Vorfeld untersuchten Beton.

Aufgrund der vorgestellten neuen Auswertemethodik sind Vergleichsuntersuchungen im Vorfeld jedoch nicht erforderlich.

Bei den vorgestellten Untersuchungen kam ein Ultraschallmessgerät „Consonic 60“ der Firma Geotron Elektronik zum Einsatz (Bild 1). Es handelt sich dabei um ein baustellentaugliches Mess- und Auswertesystem mit integriertem PC sowie GSM-Modem zur Fernbedienung und Datenübertragung mit folgenden Betriebsparametern:

Der Autor:

Dipl.-Ing. Dirk Niehoff studierte von 1990 bis 1995 Bauingenieurwesen an der Bauhaus Universität Weimar. Im Rahmen seiner Diplomarbeit entwickelte er ein Prüfverfahren zur Darstellung der Leistungsfähigkeit von Zement. Seit 1996 ist er Mitarbeiter im Kompetenzzentrum dornburger zement. Seine Aufgabenschwerpunkte liegen in der Betreuung der Transportbetonaktivitäten in Deutschland und Polen sowie in der anwendungstechnischen Betreuung von Zementkunden in Deutschland und Tschechien.

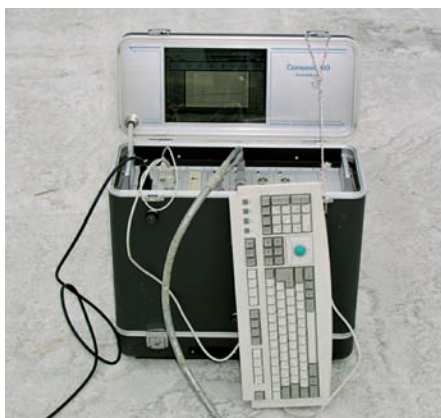


Bild 1: Messgerät Consonic 60



Bild 2: Tauchsonde komplett (links) und eingebaut (rechts)

- Temperatur +5 °C bis +45 °C im Betrieb
- < 85 % rel. Luftfeuchtigkeit
- IP 52
- Gewicht 19,5 kg
- Stromversorgung 230 V Wechselspannung, 50 Hz
- Leistungsaufnahme 80 VA

Es wird in zwei Messmethoden unterschieden. Eine Einsatzvariante ist die „Festbetonmessung“. Hierbei wird der bereits erhärtete Beton diskontinuierlich untersucht. Als Schwinger kommen Universalprüfköpfe mit Frequenzen von 30 kHz bzw. 250 kHz, je nach Einsatzzweck, zur Anwendung.

Die andere Möglichkeit ist die „Frischbetonmessung“; sie läuft im erhärtenden Beton kontinuierlich ab. Die Frischbetonmessung erfolgt direkt im Bauteil, wobei zur Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeit eine Messbrücke (Tauchsonde) zum Einsatz kommt, die unmittelbar nach dem Betoneinbau in den noch frischen Beton eingesetzt wird. Diese Tauchsonde besteht aus einem feststehenden Geber- und einem verschiebbaren Empfängerabschnitt und verfügt zusätzlich über eine integrierte Temperaturmessung. Der verfügbare Messweg beträgt 150 mm bis 300 mm und kann frei gewählt werden, um sich den jeweiligen geometrischen Bedingungen der Bewehrung anzupassen. Die Einbautiefe beträgt 100 mm; die Tauchabschnitte sind konisch geformt, um sie nach Ablauf der Messung wieder entnehmen zu können (Bild 2).

Die gesamte Messung läuft nach dem Start automatisch in festzulegenden Intervallen ab, deren Dauer zwischen einer Minute und 15 Minuten liegen können. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt unmittelbar nach Ablauf einer Einzelmessung, wobei die aktuelle Druckfestigkeit in Echtzeit sowohl grafisch (Bild 3) als auch tabellarisch dargestellt werden kann.

Die laufende Messung kann mittels DFÜ überwacht und der aktuelle Stand der Druckfestigkeit abgerufen werden, womit eine ständige Personalpräsenz vor Ort entfällt. Lediglich zum Starten oder Beenden einer Messung muss direkt am Gerät und an der Tauchsonde gearbeitet werden.

Bei Erreichen von 25 % der zu erwartenden 28-Tage-Druckfestigkeit des Betons ist es möglich, mittels Prognosefunktion bereits frühzeitig den Verlauf dieser Betondruckfestigkeitsentwicklung zu bestimmen. Hierzu

sind Angaben zur Normfestigkeit des Zements und zum weiteren zu erwartenden Temperaturverlauf im Beton notwendig (Beispiel Laborlagerung: $T = \text{const.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). Die bis zu diesem Zeitpunkt gemessenen Betontemperaturen werden dabei mitberücksichtigt. Im vorliegenden Beispiel konnte die 28-Tage-Festigkeit nach etwa acht Stunden bis 24 Stunden berechnet werden.

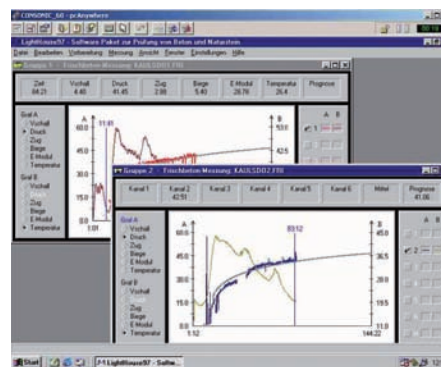


Bild 3: Bildschirmdarstellung einer laufenden Messung

Über eine „Alarm“funktion kann das Erreichen einer bestimmten Druckfestigkeit, Temperatur oder Ultraschallgeschwindigkeit signalisiert werden. Dies erfolgt dann durch blinkende Leuchtdioden auf der Tauchsonde und am Messgerät.

Das eingesetzte Gerät ist eine Vier-Kanal-Version; es können somit vier Messpunkte einzeln bzw. beliebig miteinander kombiniert untersucht werden. Der Abstand der Mess-

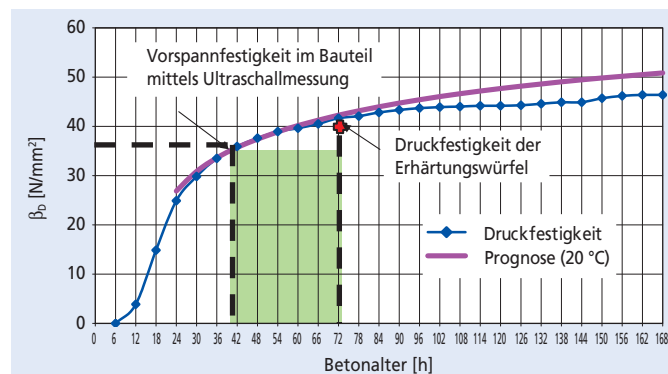


Bild 4: Druckfestigkeitsentwicklung Takt 10

stellen zum Gerät kann aufgrund der verwendeten Kabel maximal 15 m betragen.

3 Bestimmung der Vorspannfestigkeit

Eine Teilaufgabe bestand in der Bestimmung der Frühfestigkeit. Der Zeitpunkt des Nachweises der Vorspannfestigkeit mittels Erhärtungswürfeln lag nach Vorgabe der Bauleitung bei 48 bzw. 72 Stunden, der geforderte Mindestwert der Druckfestigkeit betrug 36 N/mm^2 .

Die Erhärtungswürfel wurden in einem mit Styropor ausgekleideten Holzkasten auf dem Bauwerk im Bereich des jeweils anfänglich eingebrachten Betons gelagert. Die Tauchsonde wurde in Absprache mit dem Auftraggeber zum Ende der einzelnen Betonagen eingebaut. Der Vergleich zwischen der Druckfestigkeit der Erhärtungswürfel und der Bauteilfestigkeit mittels Ultraschallmessung soll hier beispielhaft an Takt 10 aufgezeigt werden (Bild 4).

Die Grafik stellt den Verlauf der Druckfestigkeitsentwicklung innerhalb einer Woche (168 Stunden) dar. Zeitpunkt und Ergebnis der Erhärtungsprüfung der Prüfwürfel (40 N/mm^2 nach 72 Stunden) sind mit einem Kreuz markiert. Es ist erkennbar, dass die erforderliche Vorspannfestigkeit jedoch nach bereits 40 Stunden im Bauteil vorhanden war. Zwischen dem Nachweis der Vorspannfestigkeit mittels Erhärtungswürfeln und dem im Bauteil tatsächlich vorhandenen Werten liegen somit 32 Stunden (grünes Feld).

Weiterhin geht aus der Grafik hervor, dass es eine gute Übereinstimmung (Kreuz „Druckfestigkeit der Erhärtungswürfel“ liegt in unmittelbarer Nähe der Kurve „Druckfestigkeit“) der Bauteilfestigkeit mittels Ultraschallmessung mit der Druckfestigkeit der Erhärtungswürfel gibt. Dies resultiert aus dem relativ späten Prüftermin, bei dem die Effekte der frühen Bauteilfestigkeit (Eigenwärmeentwicklung) nicht mehr darstellbar sind.

Ein Vorziehen des Prüftermins der Erhärtungswürfel würde nicht das Druckfestigkeitsniveau des Bauteils repräsentieren, da eine vollständige Transformation der Eigenwärmeentwicklung des Bauteils auf die Prüfwürfel nur mit erheblichem Aufwand realisiert werden kann. Die zeitabhängige Annäherung der Betondruckfestigkeit an einen geforderten Mindestwert über Prüfwürfel

darzustellen, ist nur mit einer großen Anzahl von Probekörpern möglich, die einer entsprechend aufwändigen Lagerung bedürfen.

Für den Fall, dass Betonbauteile (z.B. Überbautakte) innerhalb eines begrenzten Zeitfensters hergestellt werden müssen, ist die Methode der kontinuierlichen Druckfestigkeitsmessung

Tafel 1: Prognostizierte und ermittelte Druckfestigkeiten nach 28 Tagen

| Takt Nr. | Druckfestigkeit nach 28 Tagen [N/mm ²] | | |
|----------|--|------------------|------|
| | Prognose | Eigenüberwachung | MFPA |
| 8 | 60,6 | 59,0 | 59,0 |
| 9 | 60,5 | 58,0 | 57,0 |
| 11 | 59,0 | 60,0 | 54,0 |
| 12 | 59,0 | 58,0 | 58,0 |
| 13 | 57,5 | 58,0 | 59,0 |
| 14 | 58,5 | 59,0 | 60,0 |
| 15 | 56,9 | 59,0 | 59,0 |
| 16 | 61,4 | 53,0 | 62,0 |
| 19 | 60,6 | 59,0 | |

mittels Ultraschall aus den o.g. Gründen prädestiniert.

4 Bestimmung der 28-Tage-Festigkeit (Prognose, bezogen auf Prüfwürfel)

Bereits nach Ablauf einer Woche (je eine Messreihe) sind die prognostizierten Druckfestigkeiten an die Bauüberwachung übergeben worden. Tafel 1 zeigt eine zusammenfassende Gegenüberstellung der durch die Materialforschungs- und Prüfanstalt (MFPA) Weimar und durch das Betonlabor der Eigenüberwachung der Baustelle ermittelten Druckfestigkeiten nach 28 Tagen mit den frühzeitig (rd. acht bis 24 Stunden nach der Betonage) prognostizierten Druckfestigkeiten.

Bei den Takten 11 und 16 sind in kursiv Druckfestigkeiten dargestellt, die unter dem für diesen Beton üblichen Niveau liegen. Der Vergleich mit den jeweils anderen Ergebnissen dieser Takte zeigt, dass diese geringeren Werte als nicht typisch anzusehen sind.

Damit lassen sich sehr frühzeitig eventuell auftretende Minderfestigkeiten erkennen. Die daraus abzuleitenden Korrekturmaßnahmen können eher greifen und anfallende Mehrkosten sowie Zeitverluste lassen sich begrenzen.

Die prognostizierten Druckfestigkeiten korrespondieren sehr gut mit den Ergebnissen der Druckprüfung und stellen somit eine durchaus brauchbare Möglichkeit dar, die Qualität des eingebauten Betons sehr früh zu bewerten.

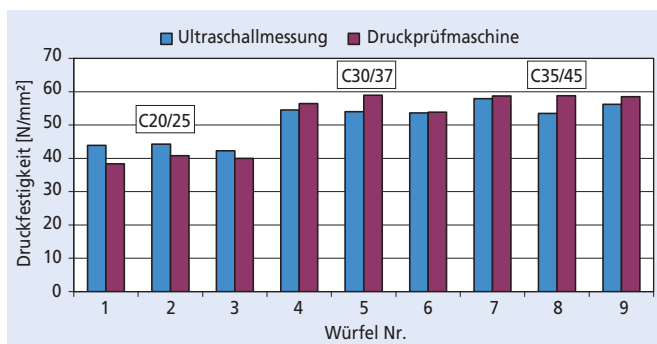


Bild 5: Vergleich der durch Ultraschallmessung und Druckprüfmaschine ermittelten Druckfestigkeiten

5 Vergleich der durch Ultraschallmessung und Druckprüfmaschine ermittelten Druckfestigkeiten

In Absprache mit dem F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde an der Bauhaus Universität Weimar wurden folgende Randbedingungen für eine Versuchsreihe vereinbart:

- Untersuchung von drei Rezepturen C20/25, C30/37, C35/45 (variable w/z-Werte und Zementgehalte)
- Je Rezeptur drei Probewürfel
- Verwendung von Würfeln mit 200 mm Kantenlänge
- Größtkorn der Gesteinskörnung 16 mm
- Verwendung von CEM I 32,5 R, CEM I 42,5 R und CEM I 52,5 R, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse für verschiedene Druckfestigkeitsniveaus beurteilen zu können
- Separate Bestimmung der Schallgeschwindigkeit der Gesteinskörnung
- Lagerung: ein Tag in der Form, sechs Tage Wasser, 21 Tage Luft (60 % rel. Luftfeuchte/21 °C Lufttemperatur)
- Die Würfel werden in drei Ebenen mit je drei Einzelwerten geprüft und anschließend in die Druckprüfmaschine so eingelegt, dass die Prüfflächen fettfrei sind

Tafel 2: Zusammensetzung der Betone für die Vergleichsprüfungen

| Betonfestigkeitsklasse | | C20/25 | C30/37 | C35/45 |
|---------------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| Würfel Nr. | | 1 bis 3 | 4 bis 6 | 7 und 9 |
| Zementart und Festigkeitsklasse | | CEM I 32,5 R | CEM I 42,5 R | CEM I 52,5 R |
| Gehalt an | | | | |
| Zement | kg/m ³ | 290 | 370 | 385 |
| Wasser | kg/m ³ | 185 | 185 | 185 |
| Kalksteinmehl | kg/m ³ | 20 | - | - |
| Sand 0/2 | kg/m ³ | 856 | 745 | 739 |
| Kiessand 2/8 | kg/m ³ | 356 | 347 | 344 |
| Kies 8/16 | kg/m ³ | 588 | 658 | 654 |
| BV | kg/m ³ | 1,16 | 1,48 | 1,54 |

Die Zusammensetzung der Betone ist in Tafel 2 aufgeführt. Die drei Würfelsätze wurden am 4. August 2005 im F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde in Weimar auf Druckfestigkeit geprüft. In Bild 5 sind die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen dargestellt.

Im Diagramm sind aus den jeweils neun Einzelwerten pro Würfel (drei Messungen in drei Ebenen) Mittelwerte gebildet und als blaue Säulen dargestellt, die violetten Säulen repräsentieren dagegen nur einen Wert für die Druckfestigkeit je Prüfkörper. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der beiden verglichenen Prüfmethoden.

6 Zusammenfassung

Im Verlauf der Erstellung des Überbaus der Saalebrücke bei Jena wurden drei Teilaufgaben bearbeitet:

- Kontinuierliche Bestimmung der Druckfestigkeitsentwicklung
- Prognose der 28-Tage-Betondruckfestigkeit
- Vergleich der mit Ultraschallmessung und Druckprüfmaschine ermittelten Druckfestigkeiten

Die Praxistauglichkeit der verwendeten Prüftechnik wurde nachgewiesen. Die Ermittlung der Frühfestigkeit zur Bestimmung des Vorspannzeitpunkts läuft vor Ort online ab, d.h. der aktuelle Wert ist jeweils sofort ablesbar. Damit wird ein zeitnahes Takten der Nachfolgearbeitsschritte durch den auf der Baustelle Verantwortlichen möglich.

Die vorgestellte Messmethodik erlaubt es, ohne personellen oder materiellen Mehraufwand die Abläufe zur Herstellung von Betonbauwerken spürbar zu beschleunigen. Dabei wird in erster Linie das Zeitpotenzial genutzt, das sich aus der bisher nicht zeitnah und praktikabel zu bestimmenden Bauteildruckfestigkeit ergibt. Bei sinnvoller Anordnung der Messtechnik vor Ort ist es möglich, bereits während der Erhärtung des entsprechenden

Betonbauteils die notwendigen Folgeschritte zu planen. Unter diesem Aspekt sind bereits praktische Anwendungen realisiert worden.

Die Prognose der Druckfestigkeitsentwicklung dient der schnellen Bestimmung der zu erwartenden 28-Tage-Festigkeit. Die Differenzen zu den unabhängig davon in zwei unterschiedlichen Prüfstellen (MFPA Weimar und Betonlabor der Eigenüberwachung der Baustelle) ermittelten Druckfestigkeiten können als unauffällig bezeichnet werden. Im Vergleich der Einzelwerte tauchen bei den Prüfstellen zum Teil abweichende Ergebnisse auf.

Die Prognose gestattet eine frühzeitige Berechnung der 28 Tage nach Betonherstellung zu erwartenden Betondruckfestigkeit. Im Rahmen einer Qualitätssicherung sind hier wichtige Informationen in kurzer Zeit verfügbar. Auf eventuell auftretende Minderfestigkeiten kann reagiert werden, bevor ein Fortschreiten der Bautätigkeiten zu höheren Sanierungskosten und längeren Stillstandszeiten führt.