

Vereinfachte Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit jungen Betons

Engelhardt, R.; Eifert, H.

1 Problemstellung

Der Einfluss der Temperatur auf die Erhärtung von jungem Beton ist zwar wissenschaftlich hinreichend bekannt, im baupraktischen Fall versucht man die Erkenntnisse jedoch durch Erfahrungen oder Intuition zu ersetzen. Die Aufgaben, die heute vielfach durch "Erfahrungen" gelöst werden, sind z.B.

- das Vermeiden des Durchfrierens von jungem Beton bei Frost,
- das frühzeitige Entschalen beim Erreichen der Entschalfestigkeit zur Optimierung des Bauablaufes,
- die Planung von Taktverfahren beim Vorspannen von Brückenbauteilen,
- das optimierte Fugenschneiden bei Betondecken.

Man kann die Aufgaben lösen, indem eine ausreichende Probenanzahl des zu betrachtenden Betons in einer Klimatrube exakt nach der Temperatur im Bauteil behandelt und zu beliebigen Zeitpunkten geprüft werden. Der Prüfaufwand ist aber relativ hoch und muss bei veränderten äußeren Bedingungen häufig wiederholt werden.

Die in Regelwerken vorgeschlagenen Lagerungen wie das Bauteil, mit der Lagerung von Probekörpern auf dem Bauteil, können wenig überzeugen.

Berechnungen der Entwicklung der Druckfestigkeit von Normalbetonen auf der Grundlage der bekannten theoretischen Zusammenhänge verbreiten sich zunehmend, sie sind aber vergleichsweise teuer und benötigen eine Vielzahl exakter Ausgangsparameter.

Abschätzungen auf gleicher Grundlage, aber mit vereinfachten Ausgangsparametern und der damit verbundenen geringeren Aussagekraft werden allgemein von vornherein abgelehnt. Die Erkenntnis, dass eine Berechnung - wenn auch vereinfacht - die Möglichkeiten, eine Aufgabenstellung zu lösen, unterstützt, wird allgemein unterschätzt.

An dieser Stelle soll deshalb ein Verfahren zur Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit vorgestellt werden, das messend und rechnend die Erhärtungsdruckfestigkeit von Normalbeton abschätzt.

2 Erhärtungsdruckfestigkeit

Sehr gute Rechenprogramme können erfolgreich die Entwicklung der Druckfestigkeit von Normalbetonen bei isothermen Bedingungen modellieren. Für einen Normalbeton der Festigkeitsklasse C30/37 ($\omega=0,50$; Sieblinie A/B; 330 kg/m³ CEM I 32,5 R) kann die Entwicklung der Druckfestigkeit für Erhärtungstemperaturen von 5 °C, 20 °C und 40 °C entsprechend Abb.1 dargestellt werden.

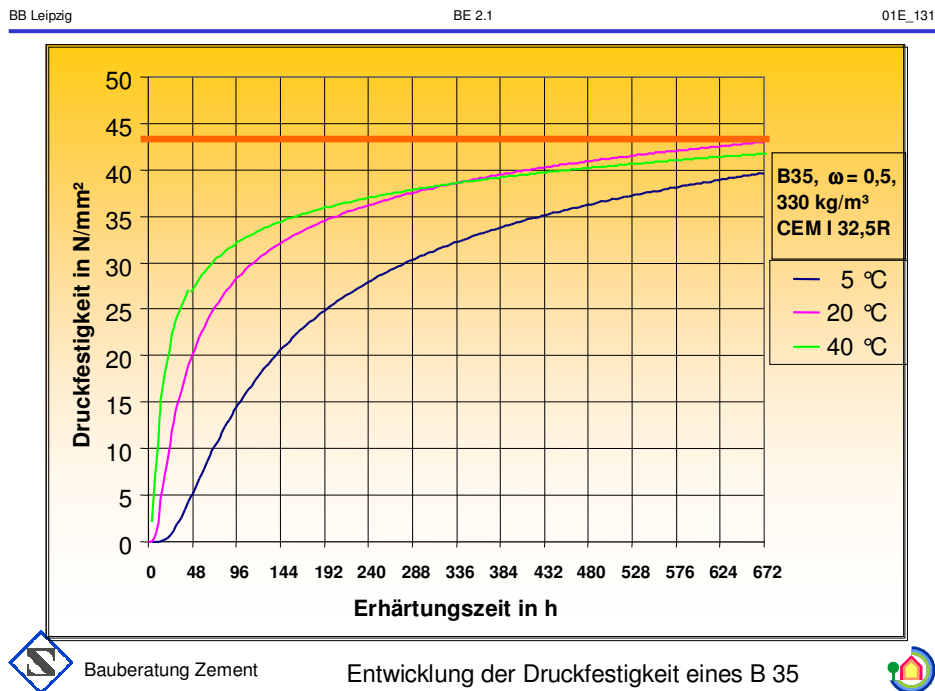


Abb.1 Entwicklung der Druckfestigkeit eines C30/37

Die Druckfestigkeit entwickelt sich umso schneller, je höher die Erhärtungstemperatur ist. Gleichzeitig nimmt die Endfestigkeit mit geringerer Erhärtungstemperatur etwas zu. Für grobe Betrachtungen liegt es nahe, die Entwicklung der Druckfestigkeit mit einer Exponentialfunktion zu beschreiben, wie es in der Literatur häufig auch erfolgt.

Stellt man die isotherme Festigkeitsentwicklung über dem Logarithmus der Zeit dar, wird die anfängliche Festigkeitsentwicklung gestreckt und die spätere Entwicklung gestaucht. Der grundsätzlich S-förmige Verlauf stellt sich ausgeprägter dar und kann im mittleren Bereich der Festigkeitsentwicklung durch einen linearen Zusammenhang angenähert werden (siehe auch Abb.2). Der linear darstellbare Bereich umfasst die Festigkeitsentwicklung zwischen ca. 10% bis 60% oder gar 90% der 28-Tage-Festigkeit. Der lineare Zusammenhang wird mit steigender Temperatur ungenauer.

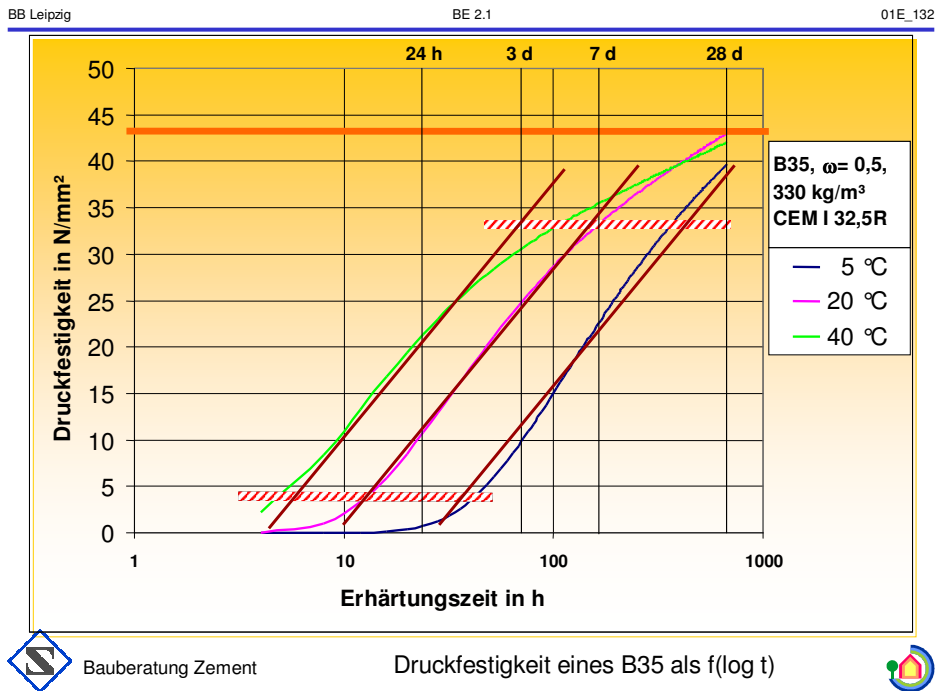


Abb.2 Entwicklung der Druckfestigkeit eines C30/37 mit logarithmischer Darstellung der Zeit

Berücksichtigt man die Zusammenhänge der Reife von Normalbetonen, die für Betone gleicher Zusammensetzung übereinstimmende Festigkeiten vorhersagt, wenn die Temperaturgeschichte während der Erhärtung vergleichbar ist, ist die Entwicklung der Druckfestigkeit eines Betons C 30/37 in Abhängigkeit von der effektiven Erhärtungszeit für alle Erhärtungstemperaturen gleich (siehe auch Abb.3).

In Abb.3 ist die Entwicklung der Erhärtungsdruckfestigkeit über dem Logarithmus der effektiven Erhärtungszeit dargestellt. Die effektive Erhärtungszeit Δt_e ist das Produkt aus der realen Erhärtungszeit Δt_i und dem Temperaturfaktor k_T .

$$\Delta t_e = \Delta t_i \cdot k_T$$

$$\text{mit } k_T = \left(\frac{T+15}{35} \right)^2 \quad T = \text{Temperatur in } ^\circ\text{C}$$

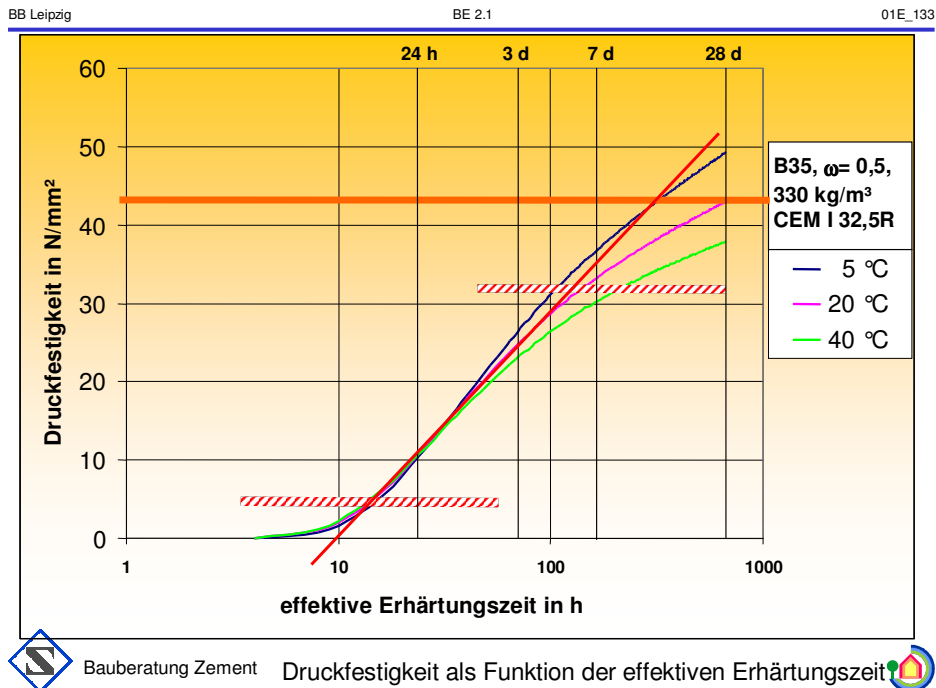


Abb.3 Erhärtungsdruckfestigkeit des C 30/37 als Funktion der effektiven Erhärtungszeit

Der lineare Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und dem Logarithmus der effektiven Erhärtungszeit ist bei 5 °C augenscheinlich und wird mit zunehmenden Temperaturen immer kleiner bzw. ungenauer.

3 Bestimmung der Druckfestigkeit von Normalbetonen über die Reife

Auf der Grundlage der in Abb. 3 dargestellten Zusammenhänge kann die Entwicklung der Druckfestigkeit von Normalbetonen f_c zwischen 10% und 60% (bei niedrigen Temperaturen bis 90%) der 28-Tage-Druckfestigkeit mit der folgenden Gleichung dargestellt werden:

$$f_c(t, T) = a \cdot \ln(\Delta t_e) + b$$

Die Konstanten a und b stehen für den Anstieg der Geraden und einem Abschnitt auf der Zeitachse. Zur Bestimmung der Konstanten a und b benötigt man zwei hinreichend genau bestimmte und möglichst weit auseinander liegende Wertepaare der Geraden. Im vorliegenden Fall wurde ein Druckfestigkeitswert im Bereich von 60 - 70% der 28-Tage-Festigkeit unter Normalbedingungen und der Abschnitt auf der Zeitachse für $f_c = 0$ gewählt.

Das obere Wertepaar($f_{c,t}$) wird bei der Erstprüfung des Betons ermittelt. Je nach Zementfestigkeitsklasse handelt es sich dabei um die 2-, 3- oder die 7-Tagefestigkeit.

Zementfestigkeitsklasse	Druckfestigkeit
42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	2-Tage-Druckfestigkeit
32,5 R; 42,5 N	3-Tage-Druckfestigkeit
32,5 N	7-Tage-Druckfestigkeit

Dieses Wertepaar ist direkter Bestandteil der Festigkeitsentwicklung des jeweiligen Normalbetons. Der auf diesem Wert aufbauende lineare Zusammenhang wird wesentlich durch die Lagerungstemperatur der Probekörper während der Erstprüfung beeinflusst. Bei den zulässigen Lagerungstemperaturen zwischen 15 - 22 °C können erhebliche Fehler entstehen, da die beschriebene Abschätzung exakt auf 20 °C aufbaut.

Das zweite Wertepaar wird aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der Zeitachse abgeleitet. Dieser Abschnitt auf der Zeitachse korreliert gut mit dem Erstarrungsbeginn des jeweiligen Zementes.

Will man die Genauigkeit erhöhen, kann man auch ein zweites Wertepaar im Bereich der 12- bis 24-Stunden-Druckfestigkeit ermitteln und in die Berechnung einbringen.

Die Temperatur des Bauteils wird an der Stelle gemessen, für die die abzuschätzende Festigkeit relevant ist. Allgemein wird die Kern- und die Randfestigkeit des Bauteils sowie zum Überblick die Lufttemperatur gemessen.

4 Prognostische Abschätzung der Festigkeitsentwicklung

Gleichzeitig ist der in Abschnitt 3 dargestellte Zusammenhang für eine grobe prognostische Abschätzung der Festigkeitsentwicklung geeignet. Zu diesem Zweck wird die Entwicklung der Bauteiltemperatur abgeschätzt.

Die Berechnung der Bauteiltemperatur erfolgt auf der Grundlage der Entwicklung der Hydratationswärme in einem Bauteil und dem Abfluß der Wärme eines Bauteils über seine Oberfläche an die Umgebung.

Für die prognostische Abschätzung werden Angaben zur

- Zementart (besser noch zur isothermen Hydratationswärmeentwicklung nach 36 h und 28 Tagen)
- Zementmenge im Beton,
- Frischbetontemperatur,
- Schalungsart oder Art der Auflage des Bauteils,

- Bauteildicke und
- prognostischen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsentwicklung

benötigt.

5 Gerätetechnische Ausführung

Die gerätetechnische Umsetzung erfolgte mit dem Betonrechner BR2000 und der Auswertung auf einem handelsüblichen PC, vorzugsweise einem Laptop. Der Betonrechner besteht seinerseits aus

- einem Messteil (Abmessungen 144 x 195 x 56 mm),
- einem Funktransceiver mit einer Reichweite von 400 - 1000m im freien Raum oder GMS,
- einem Funkmodem am PC (Abmessung 105 x 215 x 35 mm) und
- einer ausführlichen Bedienungsanleitung.



Bild 1: Standardmessteil und PC-Funkmodem des BR2000G

Das Messteil misst über Thermolemente in frei wählbaren Zeitschritten die Luft-, sowie die Kern- und Randtemperatur des Betonbauteils und speichert alle Messwerte. Mit Hilfe des in das Messteil integrierten Funktransceivers und des Funkmodems am PC können die Temperaturmessdaten zu beliebigen Zeitpunkten abgerufen und übertragen werden. Bei Nutzung von GSM kann die Datenabfrage ortsunabhängig erfolgen.

Ein im PC installiertes Auswerteprogramm stellt die Messdaten und die errechnete Betondruckfestigkeit tabellarisch und grafisch dar.

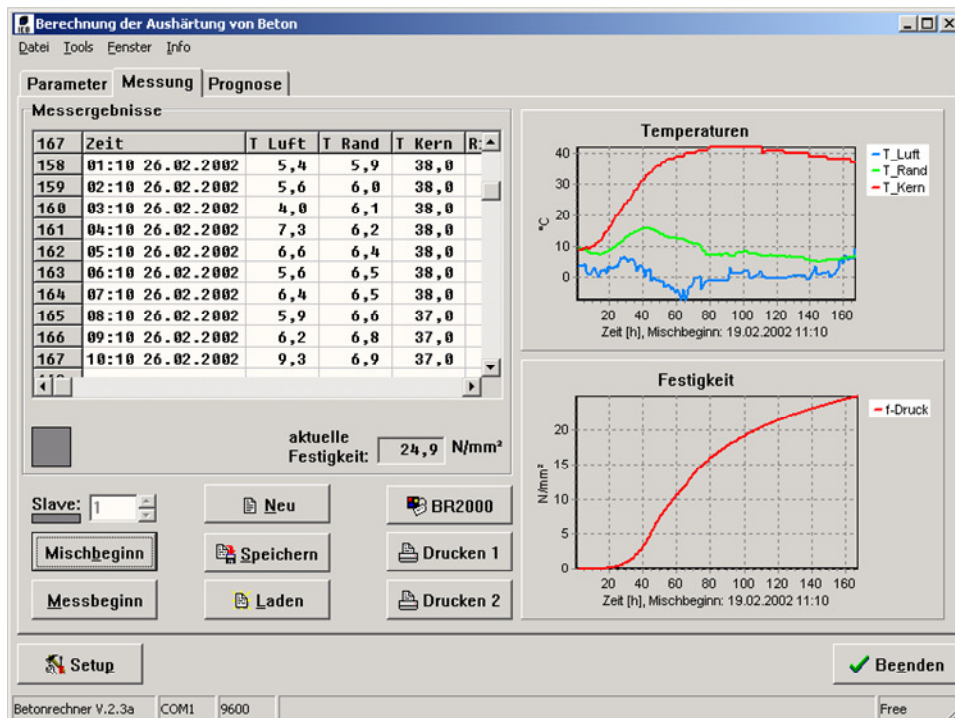


Bild 2: Arbeitsblatt des PC-Auswerteprogrammes

Im zweiten Teil verfügt der BR2000 über die dargestellte Prognosefunktion. Mit Hilfe dieser Funktion kann bei Angabe der erforderlichen Eingangsparameter die voraussichtliche Festigkeitsentwicklung abgeschätzt werden. Mess- und Prognoseteil sind miteinander koppelbar.

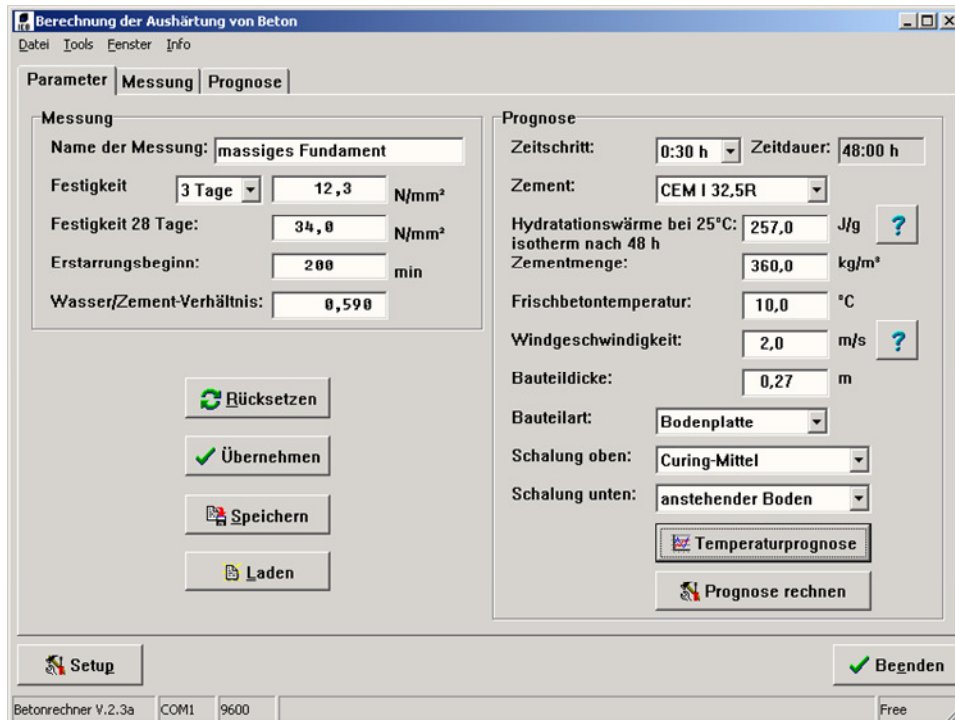


Bild 3: Mess- und Prognoseteil des PC – Auswerteprogramms

6 Anwendungsbeispiele

6.1 Frühester Entschalungszeitpunkt

Bei der Betonage der Wände einer Kläranlage wurde in anbetracht der zu erwartenden Nachtabkühlung, die Temperaturen von unter 0 °C erwarten ließen, der Entschalzeitpunkt von 3 auf 7 Tage festgesetzt und entsprechende Verzögerungen im Bauablauf geplant. Gleichzeitig wurde das Messsystem BR2000 eingebaut und auf Grund der nachgewiesenen Temperaturen im Bauteil und der ausgewiesenen Druckfestigkeit der ehemals geplante Entschalzeitpunkt ohne zusätzliche Prüfungen an Probekörpern umgesetzt.

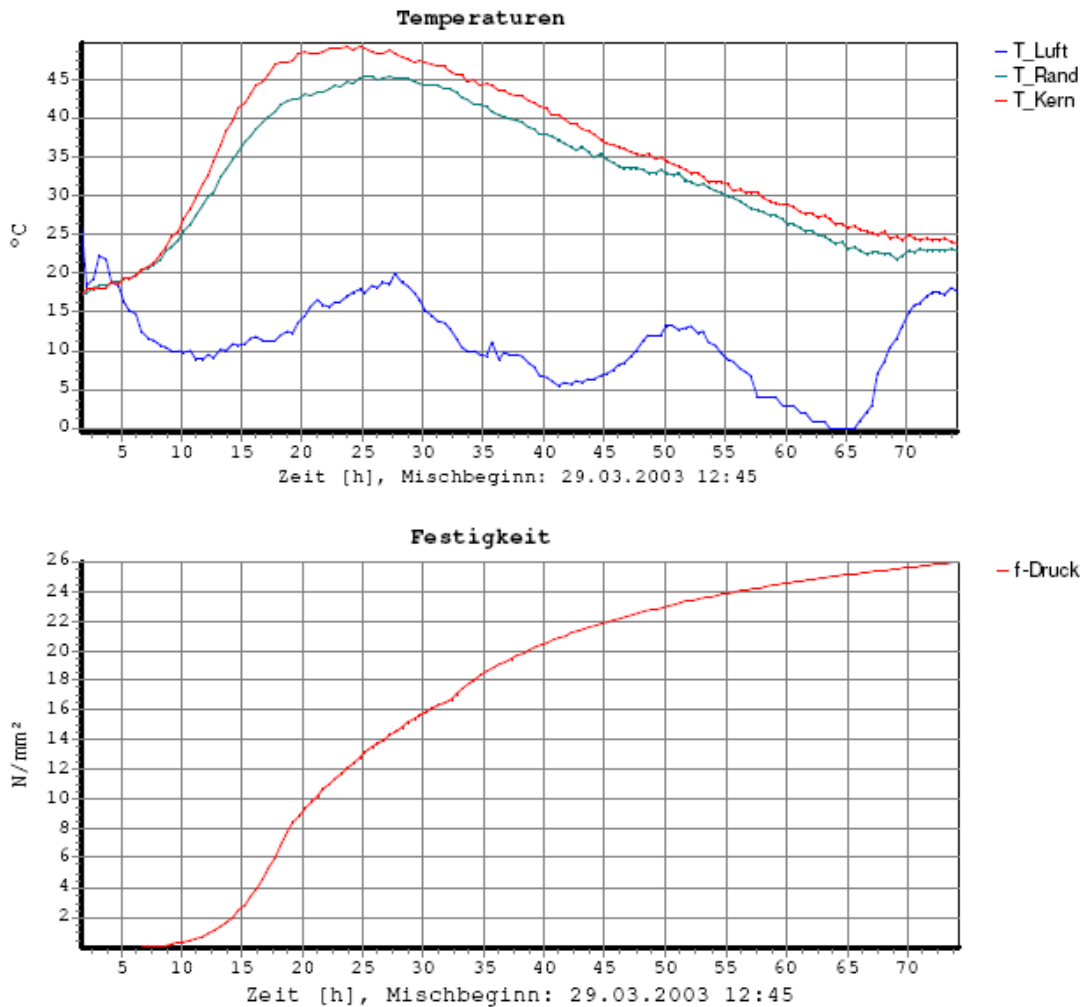


Abb. 4: Temperaturen und Erhärtungsdruckfestigkeit der Wand einer Kläranlage

6.2 Optimierung des Zeitpunktes des Vorspannens

Beim Betonieren des Überbaus einer Brücke über die BAB A9 wurde in anbetracht der voraussichtlich zwischen 0°C und 10°C schwankenden Lufttemperaturen der vorgesehene Zeitpunkt der Vorspannung 48 h nach Beginn der Betonage in Frage gestellt.

Für die Planung des Zeitlichen Ablaufes wurde die Prognose der Festigkeitsentwicklung mit dem BR2000 durchgeführt.

Da in der überwachenden Behörde immer noch Vorbehalte gegen den Einsatz des BR2000 bestanden, wurden neben dem BR2000 ausreichend Probekörper zur Unterstützung der Ergebnisse des BR2000 hergestellt. Die Probekörper wurden

- zum Teil in einer Klimatrübe (rote Messpunkte) exakt nach Bauteiltemperatur behandelt,

- zum anderen in einem Trockenschrank (gelbe Messpunkte) bei einer konstanten Temperatur von 40°C (abgeschätzt aus früheren Erfahrungen) sowie
- in einem Labor bei 20°C (grüne Messpunkte) gelagert

und zu gegebenen Zeitpunkten geprüft.

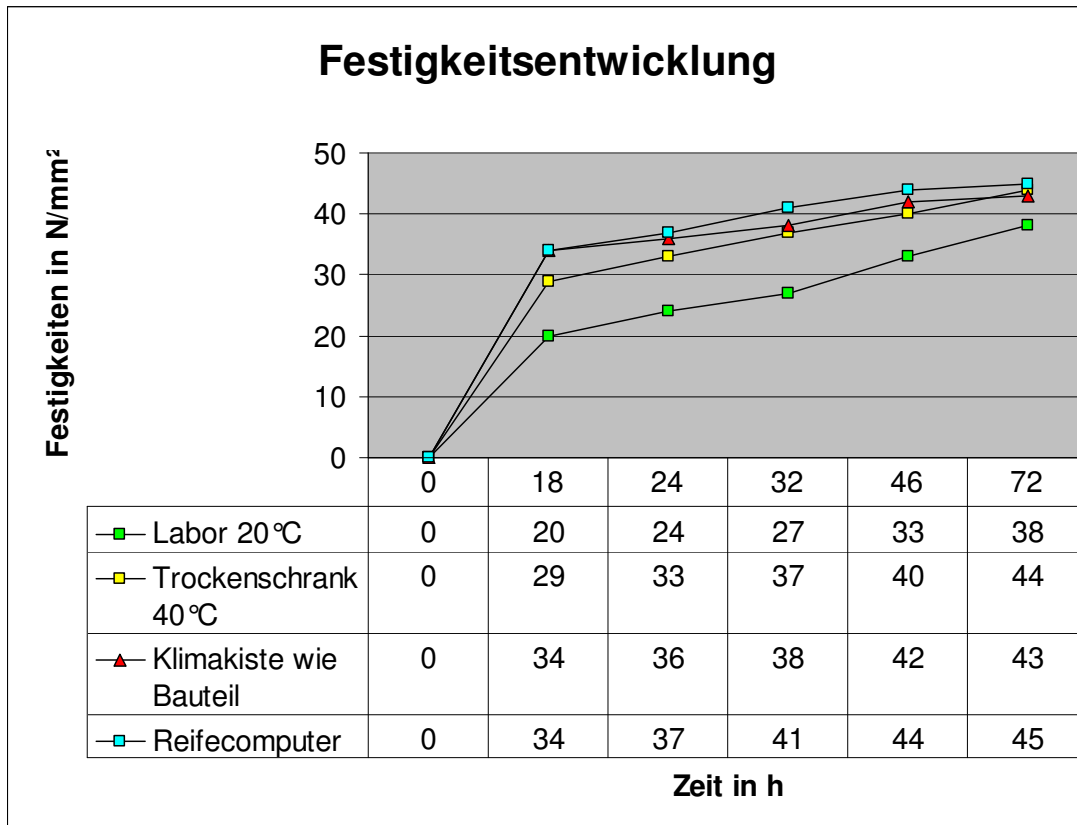


Abb. 5: Temperaturen, Erhärtungsdruckfestigkeit und Probekörperergebnisse für den Überbau einer Brücke

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die mit dem BR2000 näherungsweise berechneten Druckfestigkeiten ausreichend mit den Werten aus der Klimatrube und dem Trockenschrank korrelieren.

Da die Vorspannung bei Druckfestigkeiten von $\geq 20 \text{ N/m}^2$ und die Endspannung bei $\geq 40 \text{ N/m}^2$ aufgebracht werden können, wurde nach 48 h sowohl die Vor- als auch die Endspannung aufgebracht. Die Prüfwerte aus der Laborlagerung hätten diese Verfahrensweise nicht gerechtfertigt.

6.3 Frühzeitige Belastung einer Deckenplatte

Eine 0,40 m dicke Deckenplatte, betoniert mit einem CEM II/B-M (S-LL) 32,5R bei Außentemperaturen von 8°C und zu erwartenden Nachfrösten, konnte durch nachgewiesener Temperaturmessung mit

Festigkeitsberechnung bereits nach 8 Tagen entschalt werden.
Kostensparnis von ca. 500,00 Euro pro Tag durch Einsatz des
BR2000G (siehe auch Abb.6).

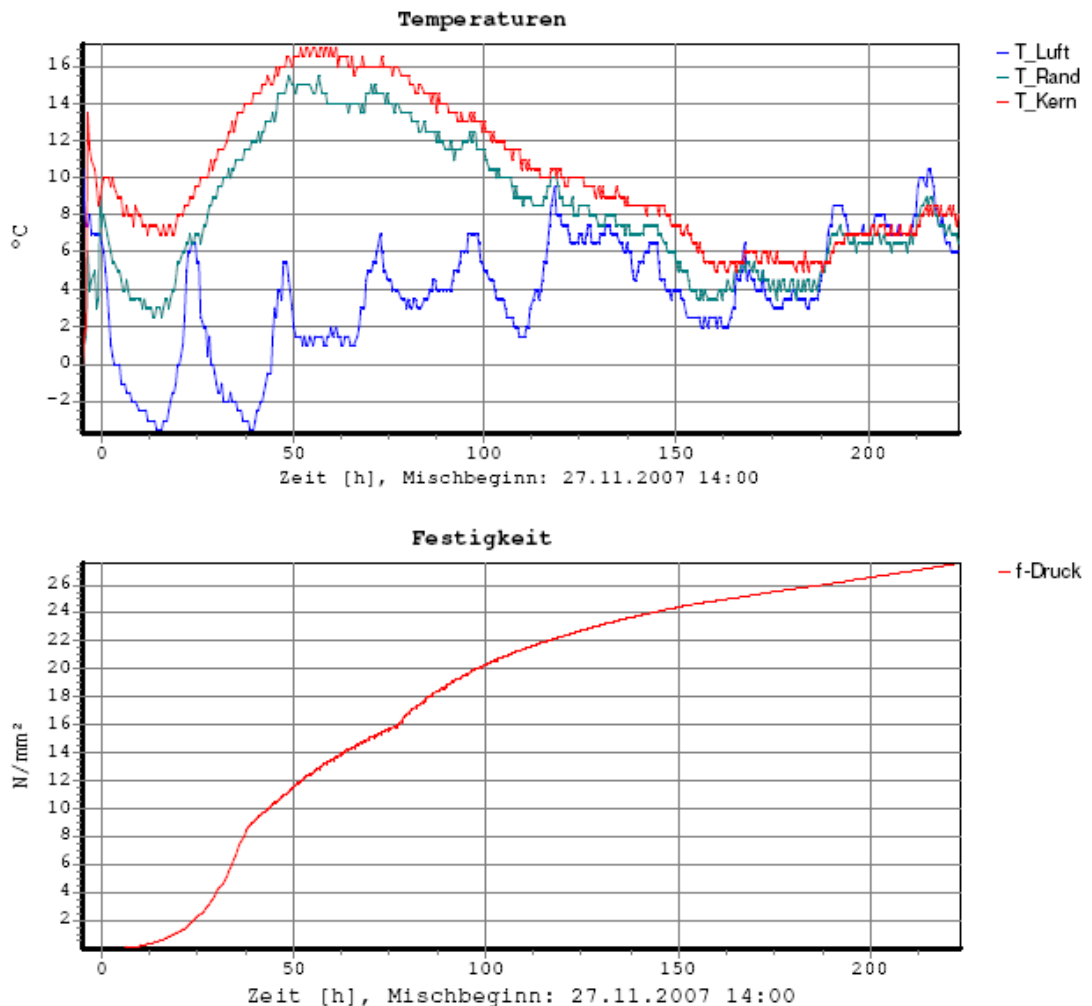


Abb. 6: Temperaturen und Erhärtungsdruckfestigkeit einer Deckenplatte von 0,40 m Dicke

7 Zusammenfassung und Perspektive

Der Betonrechner BR2000 konnte in den Jahren 2003 - 2007 unter Baustellenbedingungen umfangreich erprobt werden. Die Erprobungsphase führte zu entsprechenden Anpassungen des Auswerteprogrammes, um dessen Bedienungsfreundlichkeit zu verbessern.

Das Gerät hat den Test erfolgreich bestanden und wird zunehmend bei schwierigen Betonieraufgaben zur Unterstützung von Entscheidungen der Bauleitung eingesetzt. Die mit einfachen Eingangsparametern berechneten Festigkeitswerte sind eine gute Näherung für die Ermittlung

der aktuellen Erhärtungsdruckfestigkeit von Beton unter der Voraussetzung, dass der Beton ordnungsgemäß in das Bauteil eingebracht und verdichtet worden ist.

Das Gerät wird durch die Ingenieur Elektronik Benad GmbH, Königsbrück, hergestellt und vertrieben.

Die Erprobung und Anwendungen unter Baustellenbedingungen werden durch die Ständige Betonprüfstelle ZERTplus Überwachungsgesellschaft mbH Bitterfeld realisiert.