
BEURTEILUNG DES ERHÄRTUNGS- UND ANSTEIFVERHALTENS VON SPRITZBETON

EVALUATION OF SHOTCRETE HARDENING AND STIFFENING

Dipl.-Ing. Dr. Peter **Paulini**, Universität Innsbruck, Österreich

Die Entwicklung der Festigkeit und Steifigkeit von Spritzbeton sind für die NÖT maßgebende Verfahrensmerkmale. Eine Vielzahl von Parametern wie Zementart, Beschleuniger, Temperatur oder Gesteinskörnungen beeinflussen das Erhärtungsverhalten und diese sollen am besten vor Beginn der Bauarbeiten bekannt sein. Im Beitrag werden Laborprüfungen und einfache Baustellenprüfungen zur Abschätzung dieser Einflüsse vorgestellt.

Zur Prüfung von jungem Spritzbeton werden auf Baustellen meist die Penetrationsnadel oder das Bolzensetzverfahren angewandt [1]. Labormethoden wie Kalorimeter- und Wiegeverfahren können bereits vorab am System Bindemittel-Beschleuniger wertvolle Informationen über das zu erwartende Erhärtungsverhalten liefern. Auch auf der Baustelle lassen sich einfache Methoden wie Ultraschall- und Rückprallmessungen direkt am Spritzbeton durchführen und liefern zusätzliche Daten zum Erhärtungsvorgang.

Strength and stiffness formation of shotcrete are important features of the NATM method. A variety of parameters such as cement, accelerators, temperature and aggregates influence the hardening behavior and should be best known before the construction start. In this paper laboratory tests and simple site tests are presented to estimate these influences.

On-site, mostly penetration needle and bolt setting methods are used for testing young shotcrete [1]. Laboratory methods such as calorimetry and weighing methods may already provide preliminary information of the binder-accelerator hardening behavior. The use of simple ultrasonic and rebound measurements of shotcrete provide additional setting data.

1. Einleitung

Die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von vielen Betonbaumethoden hängt ganz wesentlich vom Ansteif- und Erhärtungsverhalten des Betons ab. Die Vielzahl der am Markt angebotenen Zement- und Bindemittelsorten macht es der Baustelle oft schwer die richtige Auswahl für den jeweiligen Einsatz zu treffen. Die Abstimmung von Bindemittel und Betonzusatzmitteln (FM, BE, VZ, etc.) erfordert zusätzliche Betonuntersuchungen und eine genaue Kenntnis der Beeinflussbarkeit der Erhärtung. Sich ändernde Marktbedingungen können die Verfügbarkeit von Rohstoffen beeinflussen (z.B. Hüttensand) und führen bei Schwankungen der Ausgangsstoffe zu einem veränderten Erhärtungsverhalten von Beton.

Spritzbeton bedingt sehr hohe Anforderungen an das sofortige Reaktionsverhalten von Zement. Dieses kann einerseits vom Zementhersteller beeinflusst werden (Spezialzemente) oder es kann durch die Verwendung von SBE-Mitteln mit Norm-Zementen (Erstarrungsbeginn > 45 Minuten) soweit beschleunigt werden, dass der Erstarrungsbeginn in den Minutenbereich gesenkt wird. Die Reaktion des Bindemittels muss zumindest soweit beschleunigt werden, dass ein Überkopfauftrag von SpC problemlos möglich wird. Die in [1, §12.2] angeführte Prüfmethode der Ausgangsstoffe weisen durch die Verwendung von SBE meist Schwierigkeiten im Probeneinbau auf. Im Nachfolgenden werden einige ergänzende Verfahren zur Beurteilung des Ansteif- und Erhärtungsverlaufs von SpC vorgestellt.

2. Zeitliche Veränderung von Festigkeitskennwerten im jungen Beton

Chemische Erhärtungsvorgänge verlaufen meist über eine Flüssigphase. Im Frischbeton wirkt das Anmachwasser als Lösungsmittel für den Zement, wobei das Porenwasser durch Dissoziation bis zu einer kritischen Ionenkonzentration gesättigt wird. Aus dieser Übersättigung bilden sich die neuen CSH-Gelprodukte. Der Phasenübergang von der Fest- zur Flüssigphase ist mit einer Volumenvergrößerung verbunden, die einen Porenwasserdruck erzeugt. Bei der Kristallisation von CSH-Gelprodukten und dem erneuten Phasenübergang von flüssig zu fest tritt im System eine Schrumpfung auf, die zum Ansteifen führt (Bild 1). Diese von Kühf aufgestellte Schrumpfvolumentheorie bildet seit ca. 100 Jahren das Grundverständnis für die hydraulische Erhärtung von Beton [2].

Solange die Porenwasserdrücke in der Lösungsphase von Zement überwiegen verliert die Korn- zu Kornreibung zwischen Feststoffpartikeln ihre Wirkung. In einer solchen wässrigen Lösung sind deshalb keine Scherkräfte übertragbar und sowohl der Elastizitäts- wie auch der Schubmodul ergeben sich zu Null. Sehr weiche Betonmischungen (z.B. SCC) weisen in der Anfangsphase zwar einen Kompressionsmodul auf, haben aber, wie alle Flüssigkeiten, eine Querdehnzahl von $\nu = \frac{1}{2}$. Bei Spritzbeton wird durch die Verwendung von Beschleunigern (SBE) versucht das freie Wasser sofort zu binden und eine rasche Bildung von kristallinen Hydratprodukten zu bewirken. Dadurch erfährt die Betonmischung einen unmittelbaren Anstieg des Schubmoduls der die Übertragung von Schubspannungen gewährleistet. Die Entwicklung der elastischen Konstanten ist deshalb direkt mit der Erhärtung von jungem Beton gekoppelt [3].

Das mechanische Verhalten von erhärtendem Beton ist in Bild 2 als Schemabild ideal elastisch – ideal plastischer Arbeitslinien unter einaxialer Druckbelastung dargestellt.

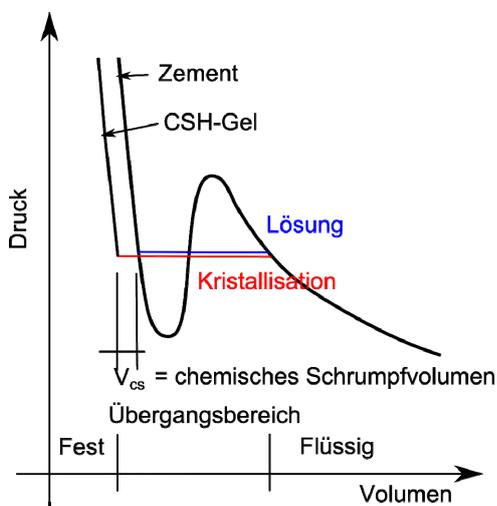


Bild 1: Volumenänderung beim Phasenübergang

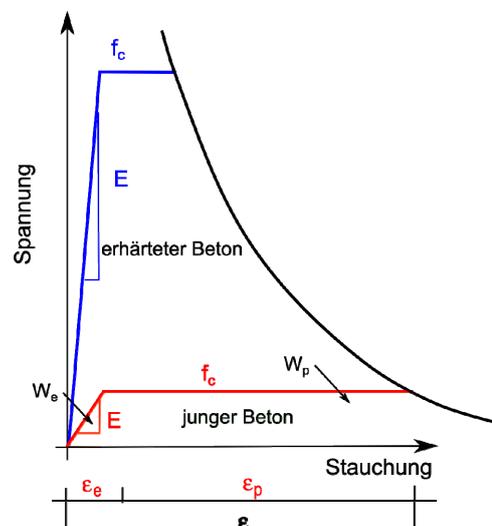


Bild 2: Idealisierte SpC Arbeitslinien

Junger Beton weist niedrigere elastische Konstanten (E- und G-Modul) und hohe plastische Dehnungen auf. Beim erhärtenden Beton wachsen die elastischen Konstanten an, während die plastische Dehnung stark reduziert wird. Die aufgebrachte mechanische Energie W (Fläche unter der Arbeitslinie) setzt sich aus einem elastischen und einem plastischen Anteil zusammen (Gl.1).

$$W = W_e + W_p = \frac{f_c \cdot \varepsilon_e}{2} + f_c \cdot \varepsilon_p = f_c \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{q}{2} + (1-q) \right) \quad (1)$$

In Gl. (1) bedeutet q einen elastischen Quotienten $q = \epsilon_e / \epsilon$ der experimentell zu bestimmen ist und der zwischen $0 < q < 1$ liegt. Vollkommen elastisches Verhalten entspricht einem Quotienten $q = 1$ und vollkommen plastisches einem Wert von $q = 0$.

Die elastische Energie W_e lässt sich durch die Festigkeit und den E-Modul ausdrücken und wird der chemischen Bindungsenergie W_b gleichgesetzt (Gl.2).

$$W_e = \frac{f_c^2}{2 \cdot E} = W_b \quad (2)$$

Daraus ergibt sich die Festigkeit f_c nach Gl. (3).

$$f_c(t) = \sqrt{2 \cdot W_b(t) \cdot E(t)} \quad (3)$$

Aus Gl. (3) zeigt sich, dass zur Beschreibung der Festigkeit zwei sich zeitlich ändernde Materialgrößen zu ermitteln sind. Die Bindungsenergie W_b ergibt sich aus der chemischen Reaktion des Zements mit dem Wasser und der Anstieg des Elastizitätsmoduls E kennzeichnet den damit verbundenen Steifigkeitsanstieg im Beton.

Die Messung von Bindungsenergien des Zements sowie die Abstimmung des BM mit dem Beschleuniger erfolgt anhand kinetischer Reaktionsversuche im Labor. Die Hydratationswärme des BM wird kalorimetrisch an Leimproben bestimmt. Mit Tauchwiegeverfahren lässt sich das chemische Schrumpfvolumen an beschleunigten Leim- oder Mörtelproben ermitteln. Beide Verfahren kennzeichnen die Bindemittelreaktivität und ihre Eignung für Spritzbeton.

Die Ermittlung von elastischen Konstanten erfolgt am einfachsten durch automatisierte Ultraschall-Laufzeitbestimmungen. Diese Messungen werden im Labor an Spritzbetonproben durchgeführt, sie können aber auch auf der Baustelle erfolgen. Zum Ansetzen der Prüfköpfe benötigt man schalungsglatte Flächen wie z.B. die Seitenflächen oder die Unterseite von Spritzkisten.

An jungem Beton kann die Druckfestigkeit von Spritzbeton bis zu einem Alter von ca. 1 Tag einfach gemessen werden. Durch Kombination einer Rückprall- und einer Härtemessung wird die Druckfestigkeit direkt bestimmt. Im Weiteren werden die angesprochenen Verfahren kurz beschrieben.

3. Zementhydratation

Die chemische Reaktion von Zement und Wasser (Hydratation) verläuft exotherm unter Freisetzung der Hydratationswärme und wird begleitet durch eine Volumenabnahme (chemisches Schrumpfen). Durch die Hydratation ändert sich die freie Energie Gl. (4), wobei die Reaktionswärme Q_R als Verlustterm vom reagierenden System abgegeben wird und die Bindungsenergie W_B dem System zugeführt wird. Die mechanische Festigkeitsbildung wird nur von der Bindungsenergie ΔW_B und den dabei auftretenden Druck- und Volumenänderungen verursacht.

$$\Delta G = -(\Delta W_b + \Delta Q_R) = \Delta(p_B \cdot V) - \Delta(c \cdot T) \quad (4)$$

Durch die Messung von Teilgrößen der Energieumsetzung gewinnt man kinetische Reaktionskurven. So misst man bei Kalorimetrieverfahren die Reaktionstemperaturen (adiabate Kalorimetrie) oder deren Freisetzungsraten dT/dt (Isotherme Konduktions-Kalorimetrie) und bei Wiegeverfahren die Volumenänderung.

Die verschiedenen Klinkerphasen reagieren unterschiedlich stark, einige Kennwerte sind in Tab.1 angeführt. Die Kennwerte für Zement lassen sich nicht als Linearkombination mit den Klinker-Phasenanteilen ermitteln sondern müssen gemessen werden. Die Endschrumpfmaße von Bindemitteln liegen im Bereich von 55-80 cm³/kg BM und die Hydratationswärmen im Bereich von 355-525 kJ/kg BM.

Tab. 1: Reaktionskennwerte voll hydratisierter Zementklinkerphasen

| Reaktionsterm | Dimension | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
|----------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Reaktionswärme | kJ/kg | 520 | 260 | 1140 | 420 |
| Schrumpfvolumen | cm ³ /kg | -53,2 | -40 | -178,5 | -111,3 |
| Verhältnis Q_{hy}/V_{cs} | kJ/cm ³ | -9,77 | -6,50 | -6,39 | -3,77 |

In Normzementen wird das rasch und stark reagierende Tricalciumaluminat (C₃A) durch die Zugabe von Gips und Ca-Anhydrit in seiner Reaktion gebremst. Bei der Hydratation bildet sich ein treibendes Calciumaluminatsulfathydrat (Ettringit) als Zwischenprodukt, das als Erstarrungsregler wirkt. SBE-Mittel werden dem SpC in Dosierungen von 4-8 % bezogen auf Bindemittelmasse zugegeben und wirken oft auf der Basis von Aluminium-Komplexsalzen. Konduktionskalorimetrische Verläufe einiger SBE- Zementreaktionen sind in der Bild 3 gezeigt und kinetische Verläufe, die mit dem Tauchwiegeverfahren [5] aufgenommen wurden, sind in Bild 4 dargestellt. Bei beiden Verfahren zeigt sich, dass ein C₃A armer HS-Zement zu einem verstärkten anfänglichen Reaktionsverhalten angeregt wird, das für den Überkopfauftrag erforderlich ist.

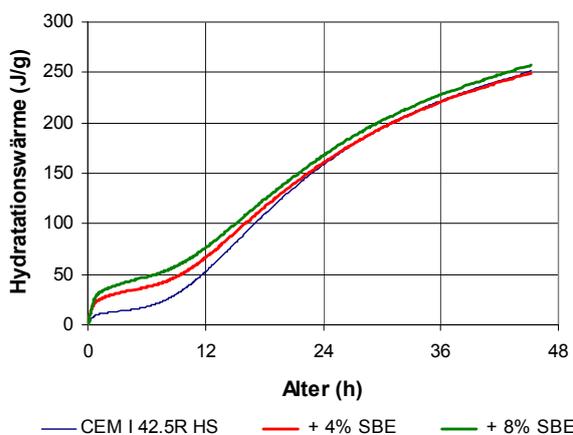


Bild 3: Hydratationswärme von verschiedenen stark beschleunigtem Zement

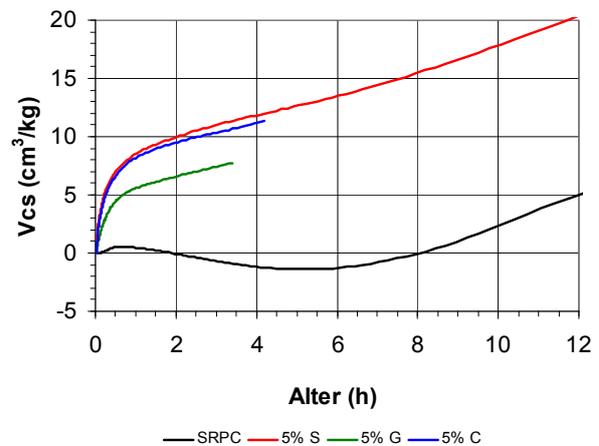


Bild 4: Chem. Schrumpfvolumen eines HS Zements mit 5 % SBE-Mitteln

Zeitabhängige Materialeigenschaften von jungem Beton werden durch den Reaktionsgrad der Zementhydratation, den Hydratationsgrad α beschrieben. Dieser lässt sich aus den kinetischen Endwerten der Reaktionskurven (Q_u , V_{csu}), nach Gl. (5) berechnen. Um auf die kinetischen Endwerte extrapolieren zu können sind längere Messzeiten von 10-14 Tagen notwendig [4]. Diese Endwerte charakterisieren die Reaktivität des Bindemittels.

$$\alpha(t) = \frac{Q_{Hy}(t)}{Q_u} = \frac{V_{cs}(t)}{V_{csu}} \quad (5)$$

4. Steifigkeitsentwicklung

Elastische Steifigkeiten sind Ausdruck der im Material vorherrschenden Bindungen. Sie charakterisieren die linear-elastische Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen eines Materials für einen bestimmten Belastungsfall. Nur zwei der sechs Konstanten E , K , G , M , λ , ν müssen bestimmt werden, die restlichen Konstanten lassen sich durch feste Beziehungen untereinander berechnen. Umrechnungstabellen zwischen elastischen Konstanten sind in Lehrbüchern angegeben oder können auf http://en.wikipedia.org/wiki/Elastic_modulus gefunden werden. Nimmt man als voneinander unabhängige Materialkonstanten die Poissonzahl ν und die Lamenezahl λ an, so ergeben sich die elastischen Modulen zu Gl. (6-9).

$$\text{Elastizitätsmodul} \quad E = \lambda \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{\nu} \quad (6)$$

$$\text{Schubmodul} \quad G = \lambda \cdot \frac{1-2 \cdot \nu}{2 \cdot \nu} \quad (7)$$

$$\text{Kompressionsmodul} \quad K = \lambda \cdot \frac{1+\nu}{3 \cdot \nu} \quad (8)$$

$$\text{P-Wave Modul} \quad M = \lambda \cdot \frac{1-\nu}{\nu} \quad (9)$$

Die Beziehung zwischen longitudinaler c_L und transversaler c_T Ultraschallgeschwindigkeit und den elastischen dynamischen Modulen ist in den Gl. (10) und (11) dargestellt.

$$M = c_L^2 \cdot \rho \quad (10)$$

$$G = c_T^2 \cdot \rho \quad (11)$$

Die relativen elastischen Module werden durch Division der Gleichungen (6-9) mit der Lamekenstanten gewonnen und sind ausschließlich von der Poissonzahl ν abhängig. Trägt man diese Beziehungen über dem P-Wave Modul auf, ergeben sich die Relationen der relativen Modulen zueinander - bis auf den E-Modul - linear, wie in Bild 5 gezeigt.

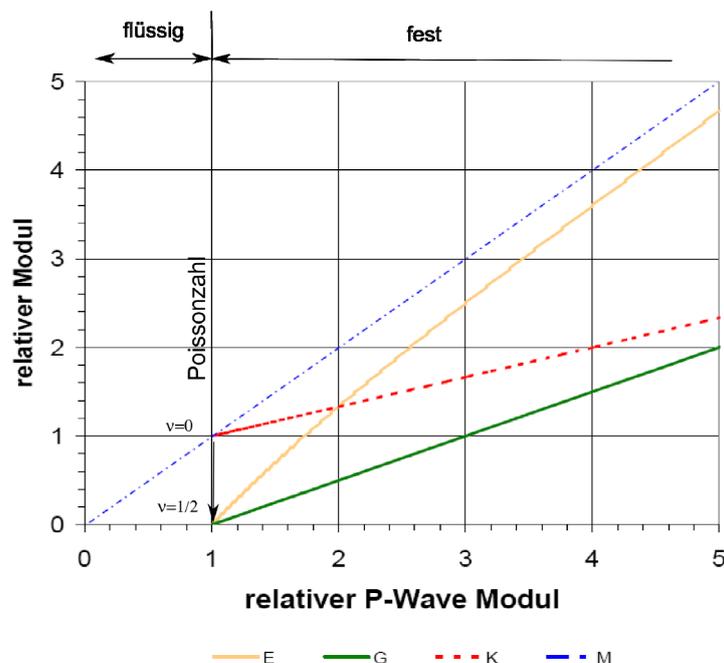


Bild 5: Relative elastische Konstanten

Stabile und automatisiert auswertbare Ultraschallmessungen an jungem Beton sind solche der Longitudinalgeschwindigkeit. Sie erlauben die Bestimmung des P-Wave Moduls der eindeutig bestimmbar ist. Wegen dem Verschwinden des Schubmoduls kann im flüssigen Zustand keine Transversalgeschwindigkeit gemessen werden. Der Anstieg des P-Wave Moduls wird durch das Anwachsen des Schubmoduls bewirkt. Materialerhärtung hängt deshalb direkt mit der Entwicklung des Schubmoduls zusammen. Vielfach wird die Erhärtung von Mörtel und Beton mit der Entwicklung des Elastizitätsmoduls korreliert [6].

Die Zementhydratation kann auch mit der Poissonzahl korreliert werden. Führt man einen Erhärtungsgrad h nach Gl.(12) ein, so gilt $0 < h < 1$. Der Endwert der Poissonzahl ν_u wird durch Extrapolation der Messwerte gewonnen. Im jungen Alter von Spritzbeton bleibt die Ermittlung der Poissonzahl wegen dessen viskosem und stark dissipativem Verhalten schwierig.

$$h = \frac{1 - 2 \cdot \nu}{1 - 2 \cdot \nu_u} \quad (12)$$

Für Spritzbeton berechnet sich die Lamekonstante nach der Mischungsregel, wobei die Gesteinsart i.d.R. den Endwert dominiert. In Tab. 2 wird dies für eine typische SpC-Rezeptur mit einer Quarzgesteinskörnung gezeigt.

Tab. 2: Steifigkeit einer Spritzbetonmischung

| SpC 20/25 J2/XC3/GK8 | Masse (kg/m ³) | Dichte (kg/m ³) | Volumen -- | E-Modul (GPa) | Poisson -- | Lame (GPa) | Lame.Cv (GPa) |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| Bindemittel | 400 | 3050 | 0,131 | 48 | 0,25 | 19,2 | 2,518 |
| Wasser | 200 | 1000 | 0,200 | | 0,5 | 2,05 | 0,410 |
| Sand 0/4 | 1197 | 2730 | 0,438 | 80 | 0,21 | 23,9 | 10,496 |
| Kies 4/8 | 513 | 2730 | 0,188 | 80 | 0,21 | 23,9 | 4,498 |
| SBE | 24 | 1400 | 0,017 | | 0,5 | 2,1 | 0,036 |
| Luft | | | 0,025 | | | | |
| Gesamt | 2334 | | 1,000 | | | | 17,958 |

5. Festigkeitsentwicklung

Die Erhärtung und Festigkeitsbildung im Beton ist immer an die Übertragung einer Bindungsenergie gekoppelt. Durch die Zementhydratation werden Reaktionsenergien freigesetzt, wobei für die mechanische Festigkeit die Dehnungsenergie W_b von Interesse ist (Gl.3, 4). Ein entsprechendes Festigkeitsmodell für die Zugfestigkeit von Beton wurde in [4] vorgestellt. Die Zugfestigkeit ergibt sich nach Gl. (13) mit dem chemischen Schrumpfvolumen V_s und der Lamekonstanten λ . Der Zementgehalt Z und das Endschrumpfvolumen V_{csu} des Bindemittels sollten aus Vorversuchen bekannt sein. Die Lamezahl der Spritzbetonrezeptur kann analog zu Tab. 2 ermittelt werden. Auch die zeitliche Entwicklung des Hydratationsgrads kann für das Bindemittel bereits im Labor vorab bestimmt werden.

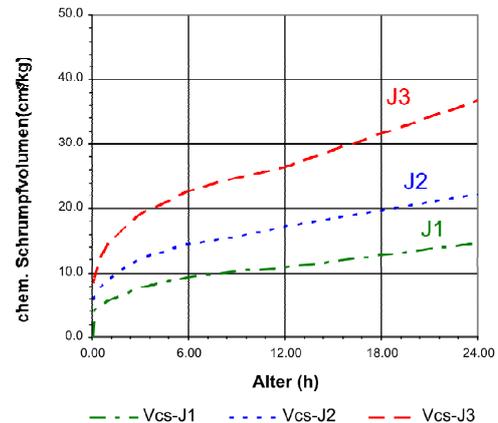
$$f_t = \frac{\lambda \cdot h \cdot V_s(t)^2}{2} = \frac{\lambda \cdot h}{2} \cdot (Z \cdot V_{csu} \cdot \alpha(t))^2 \quad (13)$$

Dieses Modell lässt sich auch auf Druckfestigkeiten erweitern. In [1, Anh. 5] werden für die Spritzbetonklassen J1-J3 Druckfestigkeiten im jungen Alter gefordert. Die Ergebnisse einer Rückrechnung auf das vom Bindemittel zu erreichende chemische Schrumpfvolumen $V_{cs}(t)$ ist in Tab. 3 und in Bild 6 gezeigt. Es wurde eine SpC-Steifigkeit (Lamezahl) von 17,9 GPa angesetzt.

Tab. 3: Druckfestigkeit und Schrumpfvolumen des BM zur Erreichung der SpC-Klassen J1-J3

| Alter (h) | J1 (MPa) | J2 (MPa) | J3 (MPa) | Vcs-J1 (cm ³ /kg) | Vcs-J2 (cm ³ /kg) | Vcs-J3 (cm ³ /kg) |
|-----------|----------|----------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 0,10 | | 0,2 | 0,5 | 0,0 | 5,7 | 8,4 |
| 0,17 | 0,1 | 0,25 | 0,66 | 4,1 | 6,3 | 9,2 |
| 0,50 | 0,153 | 0,4 | 1,2 | 5,0 | 7,7 | 12,1 |
| 1,00 | 0,2 | 0,61 | 1,82 | 5,6 | 9,1 | 14,5 |
| 3,00 | 0,41 | 1,2 | 3,5 | 7,8 | 12,3 | 19,1 |
| 6,00 | 0,64 | 1,83 | 5,29 | 9,3 | 14,5 | 22,7 |
| 9,00 | 0,83 | 2,35 | 6,74 | 10,2 | 15,7 | 24,7 |
| 12,00 | 1 | 2,8 | 8 | 10,9 | 17,1 | 26,4 |
| 24,00 | 2 | 5 | 16 | 14,7 | 22,1 | 36,6 |

Bild 6: Plot des erforderlichen BM-Schrumpfvolumen für SpC J1-J3



Die wesentliche Kenngröße in diesem Festigkeitsmodell ist das chemische Schrumpfvolumen des Bindemittels, da es in die Gl. (13) quadratisch eingeht. Daneben besitzt auch die Steifigkeit des SpC einen Festigkeitseinfluss. Steifigkeiten von Spritzbetonmischungen gegenüber derjenigen aus Tab. 2 schwanken primär im Verhältnis der Lamekonstanten λ_K/λ_Q der verwendeten Gesteinskörnung λ_K . Das vom beschleunigten Bindemittel zu erreichende Schrumpfvolumen $erf V_{cs}$ ergibt sich dann gemäß Gl. (14) zu

$$erf V_{cs} = V_{cs}(Jx) \cdot \frac{\lambda_Q}{\lambda_K} \quad (14)$$

Anhand des gemessenen Schrumpfvolumens des Bindemittels kann damit bereits mit Labormessungen die Reaktivität und Eignung des BM-SBE Systems für eine zu erzielende SpC-Klasse beurteilt werden.

6. Ultraschall Laufzeitmessung

Ultraschallmessungen erlauben eine experimentell einfache Bestimmung der dynamischen elastischen Konstanten und werden deshalb auch bei jungem Beton bzw. Zementleim angewandt. Sowohl Durchschallungsverfahren [6] als auch Reflexionsverfahren [7] eignen sich zur Beurteilung des Ansteifverhaltens. Dynamische elastische Module von jungem Beton ergeben sich deutlich höher als statisch ermittelte Module. Dies resultiert aus den großen Kriechverformungen von jungem Beton unter statischer Belastung, die bei den hohen Frequenzen und geringen Belastungen bei Ultraschallverfahren nicht möglich sind.

Bei viskosen und dissipativen Materialien ist die Ermittlung der Transversalgeschwindigkeit c_T schwierig, da wegen dem niederen Schubmodul sich sehr lange Laufzeiten ergeben und das Signal durch Streuwellen gestört wird. Junger Beton erfordert wegen der starken Dämpfung niedrigere US-Frequenzen im 50-250 kHz Bereich und weist eine stärkere Frequenzabhängigkeit (Dispersion) der Messwerte auf. Sehr einfach ist jedoch die Ermittlung des P-Wave Moduls M mittels der Longitudinalgeschwindigkeit c_L (Bild 7). Diese Messung ist mit modernen Geräten automatisiert in konstanten Zeitabständen ohne Personalaufwand möglich. Im Labor sind auch simultane Messungen von US-Laufzeit und chemischem Schrumpfen an derselben Probe möglich. Dabei misst man an der Probe gleichzeitig das Erhärtungs- und das Erstarrungsverhalten (Bild 8), wodurch genauere Prognosen zum Erhärtungsverlauf möglich werden. Es ergeben sich allerdings Schwierigkeiten mit dem Einbau beschleunigter Mörtelproben.

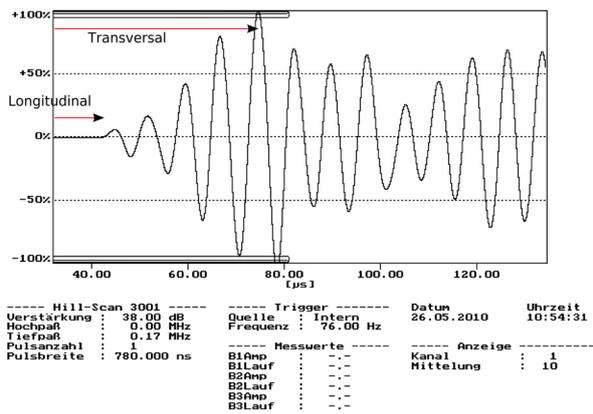


Bild 7: US-Meßsignal mit überlagerter Longitudinal- und Transversalwelle an Festbeton



Bild 8: Labormessplatz für US-Laufzeit und chem. Schrumpfvolumen

Die Bilder 9 und 10 zeigen Ergebnisse getrennter Labormessungen von US-Longitudinalgeschwindigkeit und chemischem Schrumpfen. An der Betonprobe zeigen sich höhere Schrumpfvolumen als an der Zementprobe. Dies wird auf unterschiedliche Konzentrationsverhältnisse in Beton und Zementleim und die Wirkung des SBE-Mittels zurückgeführt. Die US-Longitudinalgeschwindigkeit des SpC konnte nach 3 Stunden erstmals aufgenommen werden. Sie liegt zu diesem Zeitpunkt mit 2200 m/s bereits deutlich über unbeschleunigtem Beton, der während der Ruhephase eine Longitudinalgeschwindigkeit von unter 1450 m/s (Wasser) aufweist. Der dynamische E-Modul wurde unter der Annahme einer konstanten Lamenezahl ebenso wie die Poissonzahl berechnet. Diese Annahme gilt im jungen Alter von SpC nicht, da das Kapillarwasser unter erhöhtem Druck relaxiert und Kriechverformungen im jungen SpC verursacht. Realistische Werte für statische elastische Konstanten für die ersten zwei Tage können durch geeignete Modellansätze für die Entwicklung der Lamenezahl von SpC erreicht werden (Gl.13).

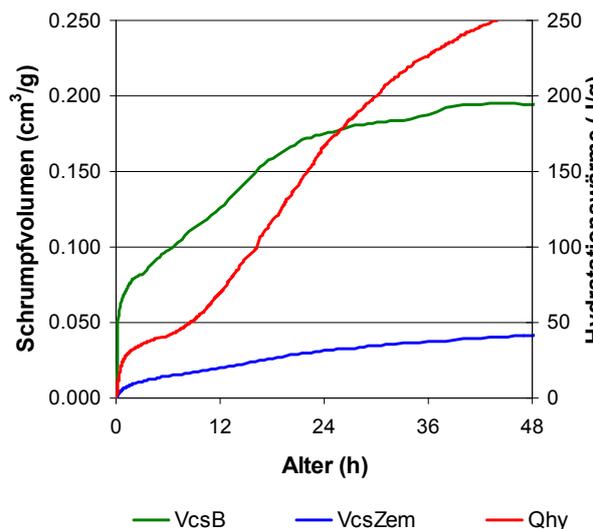


Bild 9: Schrumpfvolumen und Hydrationswärme an Beton und CEM II 42.5R HS beschleunigt mit 6 % SBE

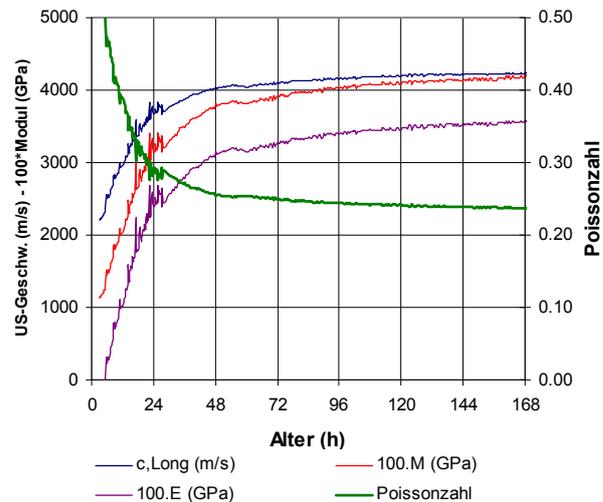


Bild 10: US-Longitudinalgeschwindigkeit und dynamische Module von SpC

7. Rückprall- Härtemessung

Die Verwendung von Rückprallhämmern zur Beurteilung der Druckfestigkeit von Beton hat eine lange Tradition. Auch die Betonthärte wurde bei Festbeton bereits zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit in Verbindung mit Schlaghämmern verwendet [8]. Der originale Schmidhammer zeigt das Verhältnis von Rückprallweg zu Spannweg als Rückprallwert R an. Neuere Versionen messen die Geschwindigkeit kurz vor und nach dem Aufschlag und verwenden den Geschwindigkeitskoeffizient Q (Stoßzahl) nach Gl. (15). Der Vorteil dieser neuen Generation von Rückprallhämmern liegt darin, dass die Störeinflüsse von Reibung und Gravitation wegfallen.

$$Q = \frac{v_R}{v_I} \quad (15)$$

Bei niederen Rückprallkoeffizienten Q und Festigkeiten $f_c < 10$ MPa werden keine Rückprallwerte angezeigt. Für jungen Beton wurde deshalb eine Kombination einer Rückprall- und Härtemessung entwickelt um auch diesen Bereich zugänglich zu machen. Durch den Aufsatz einer Kegel-Eindring Spitze auf den Schlagbolzen des Rückprallhammers kann bei jungem Beton der Durchmesser des plastischen Abdrucks leicht gemessen werden. Durch die Erhärtung wächst die elastische Rückprallenergie mit Q^2 während die plastische Dämpfungenergie abnimmt. Die Materialfestigkeit wird aus dem plastischen Energieanteil und dem Abdruckdurchmesser ermittelt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Stoßzahl Q stark von der verwendeten Geometrie des Schlagbolzens abhängt. Der mit einem Kegelaufsatz versehene Rückprallhammer liefert bei festem Beton Rückschlagkoeffizienten mit ca. dem halbem Wert im Vergleich zu dem Standardbolzen.

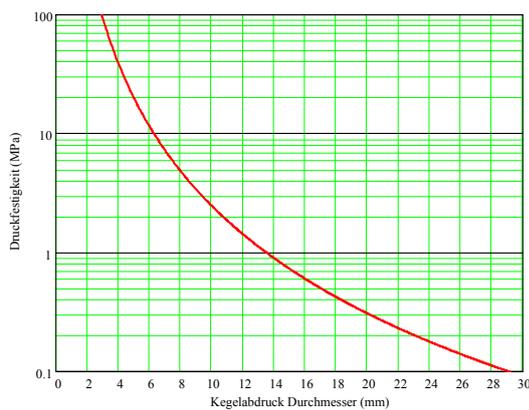


Bild 11: Druckfestigkeit vs. Kegelabdruck ϕ

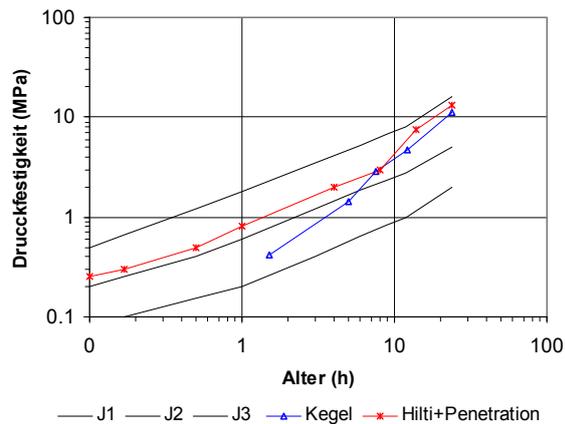


Bild 12: Vergleich der SpC Festigkeitsmessung Setzbolzen rot, Kegelabdruck blau

Am Schmidhammer werden bei jungem Beton keine Rückschlagwerte angezeigt, da die gesamte Schlagenergie in plastische Verformung umgesetzt wird ($Q=0$). Erst nach ca. einem Tag Erhärtungsdauer steigen die Rückprallwerte auf über 10 % an. Die Schlagenergien sind beim originalen Schmidhammer und beim SilverSchmidt-Hammer gleich groß und betragen $W_i = 2,207$ Nm. Durch gleich setzen von Schlagenergie und plastischer Verformungsenergie erhält man bei einem Kegelwinkel von 120° die Druckfestigkeit nach Gl.(16).

$$f_c = \frac{2 \cdot W_i \cdot \sqrt{3}}{d^3 \cdot \pi} \quad (16)$$

Mit dieser Energie ergeben sich die Druckfestigkeiten in jungem Beton und Spritzbeton wie in Bild 11 gezeigt. Diese Kurve gilt nur für Rückprallkoeffizienten Q kleiner 10 %, da bei höheren Koeffizienten sich die Druckfestigkeit zu hoch ergibt. Ein Vergleich des Verfahrens zu herkömmlich gemessenen Druckfestigkeiten mit Penetrationsnadel und Setzbolzen ist in

Bild 12 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Festigkeitswerte von Setzbolzen und Kegelschlagverfahren gut miteinander vergleichbar sind. Die Penetrationsnadel liefert jedoch etwas höhere Werte der Druckfestigkeit im Vergleich zum Kegelschlagverfahren.

Die Vorteile des Kegelschlagverfahrens sind die einfache und rasche Anwendbarkeit über den gesamten Zeitraum bis zu einem SpC Alter von einem Tag. Bei dem Verfahren werden keine Kalibrierkurven benötigt. Für die Ablesung des Kegelabdrucks benötigt man allerdings eine schalungsglatte Fläche einer Spritzkiste. Im sehr jungen Alter bis zu zwei Stunden lässt sich diese auch durch Zureiben der SpC-Oberfläche ersetzen. Die Bestimmung des Kegelabdrucks d im jungen Alter erfolgt ausreichend genau im mm-Bereich mit einem Rollmeter. Für Kegelabdrücke unter $d = 8$ mm sollte eine Messlupe Anwendung finden. Aus der geprüften Spritzkiste können noch SpC Bohrkerns gezogen werden, da die Betonstruktur durch die Kegelschlagprüfung nur oberflächlich beeinträchtigt wird.

8. Zusammenfassung

Die Steifigkeits- und Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton kann mit unterschiedlichen Methoden sowohl im Labor als auch auf der Baustelle beurteilt werden. Die Verwendung von SBE Mitteln macht den Probeneinbau von beschleunigten Mörtelproben in Messgeräte schwierig. Deswegen werden Laboruntersuchungen meist nur an BM-SBE Systemen und nicht an Mörtel oder Betonproben durchgeführt. Kalorimeterverfahren und Wiegeverfahren geben Aufschluss über das frühe Reaktionsverhalten des BM und die Wirksamkeit des SBE. Weiters lassen sich anhand der Verläufe und der Endwerte der Hydratation die Reaktivität der Bindemittel beurteilen.

Als einfache Baustellenmethoden zur Abschätzung dynamischer Steifigkeiten wird das Ultraschallverfahren eingesetzt. Die US-Köpfe können sowohl am fertigen Bauteil als auch an einer Spritzkiste angebracht werden. Für die Abschätzung der Druckfestigkeit am jungen Spritzbeton bis zu einem Alter von einem Tag wurde ein kombiniertes Rückprall-Härteverfahren vorgestellt. Mit einem kegelförmigen Aufsatz-Eindringkörper auf einem konventionellen Rückprallhammer werden Frühfestigkeiten von Spritzbeton einfach über den plastischen Eindruck bestimmt.

Literatur

- [1] Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik:
ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton, Wien, 2009.
- [2] Kühl, H.:
Zement und mörteltechnische Studien I. Verlag Tonindustrie-Zeitung, Berlin, 1913.
- [3] Paulini, P., Gratl, N.:
Stiffness formation of early age concrete. In Springenschmid, R. (Ed.): Thermal Cracking at Early Ages, RILEM Proceedings 25, E&FN Spon, London, S.63-70, (1995).
- [4] Paulini, P.:
Shrinkage Eigenstresses and Hardening of Concrete. In Brameshuber, W. (Ed.): Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci), Vol.II, RILEM Pro 76, S.199-207, 2010.
- [5] Paulini, P.:
Kinetische Reaktionsmessungen der Zementhydratation mit den Tauchwägetechniken. Zement-Kalk-Gips, Nr. 10, 41 Jg., S.525-531, (1988).
- [6] Boumiz, A., Vernet, C., Cohen Tenoudji, F.:
Mechanical properties of cement pastes and mortars at early age. Adv. Cement Based Materials, Vol. 3, Nr. 3-4, (1996), S.94-106.
- [7] Öztürk, T. et al.:
Monitoring the setting and hardening of cement-based materials with ultrasound. Concrete Science and Engineering, Vol. 1, (1999), S.83-91.

- [8] Gaede, K.:
Die Kugelschlagprüfung von Beton. DAfSt H. 107, Berlin, 1952.

Zum Autor

Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Paulini
Studium Bauingenieurwesen an der Universität Innsbruck, Tunnelbautätigkeit bei Beton und Monierbau GmbH. und Bilfinger & Berger AG, Tragwerksplanungen bei Achammer, Tritthart und Partner.
Ass.Prof. an der Universität Innsbruck
Peter.Paulini@aon.at