
SPRITZBETON-FRÜHFESTIGKEITSMESSUNGEN – FESTLEGUNG, BESTIMMUNG, INTERPRETATION

DETERMINATION OF COMPRESSIVE STRENGTH OF YOUNG SPRAYED CONCRETE - SPECIFICATIONS, TESTING PROCEDURE, INTERPRETATION

Wolfgang **Kusterle**, OTH Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

Die Prüfung der Spritzbeton-Frühfestigkeiten erfolgt nach EN 14488-2. Das Prüfverfahren, bestehend aus Nadelpenetration und Bolzensetzverfahren, ist allgemein gut eingeführt. Trotzdem gibt es immer wieder Unklarheiten bei der Anwendung. Im vorliegenden Beitrag wird auf die Entwicklung des Verfahrens, die zugrunde liegenden Kalibrierungen, die Festlegungen bei den Frühfestigkeitsbereichen und die Verlässlichkeit der Ergebnisse eingegangen. Die notwendigen Prüfzeitpunkte und Prüfintervalle werden erläutert. Schließlich werden mögliche Fehler bei der Messung und Interpretation sowie zukünftige Entwicklungen angesprochen.

The determination of the compressive strength of young sprayed concrete is done according to EN 14488-2. The well-approved test method consists of two methods: Penetration needle and stud driving method. During the application of these methods questions arise how to apply the test in the correct way. This paper focuses on the historical development of the test method, the calibration procedure, the early strength classes and the reliability of the method. The necessary number of tests and the checking intervals are addressed. Finally, possible mistakes during the measurement and the interpretation of the results as well as future developments are discussed.

1. Einleitung

Spritzbeton, der im Tunnelbau eingesetzt wird, muss in der Regel spezielle Anforderungen an seine Frühfestigkeitsentwicklung erfüllen. In diesem Beitrag werden vor allem Anforderungen an Sicherungsspritzbeton bei zyklischen Vortrieben angesprochen. Diese Anforderungen kommen aus dem Auftragsvorgang, der erforderlichen Schichtstärke, der Orientierung der Auftragsfläche und dem Wasserandrang, den baubetrieblichen Maßnahmen, den Erschütterungen aus dem Vortrieb und den auftretenden Gebirgsverformungen. Zu hohe Frühfestigkeiten resultieren eventuell in schlecht eingespritzten Bewehrungen und in ansteigenden Rückprallanteilen. Die Verkürzung des Erstarrens und die Anhebung der Frühfestigkeit werden durch Erstarrungsbeschleuniger oder spezielle Bindemittel erzielt. Die Prüfung der Frühfestigkeiten kann nicht an Würfeln erfolgen, sondern ist indirekt durchzuführen. Dies kann durch „Daumenprobe“, Bergeisen (Bild 1), den hier beschriebenen indirekten Prüfverfahren oder durch noch in Entwicklung befindliche kontinuierlich messende Verfahren geschehen.

Die Möglichkeit der Messung der Frühfestigkeiten des Spritzbetons war eine entscheidende Innovation zur Verbesserung und Optimierung des Einsatzes von Spritzbeton im Tunnelbau. Sie erlaubte erst die gezielte Anpassung und Verbesserung der Erstarrungsbeschleuniger und die Festlegung und Kontrolle der Frühfestigkeitsklassen. Diese Frühfestigkeitsklassen J1

bis J3 wurden zur besseren Abstimmung zwischen Planer und ausführender Firma eingeführt.



Bild 1: Bergeisen zur intuitiven Kontrolle ausreichender Frühfestigkeit

2. Anforderungen an ein Prüfverfahren

Laborversuche sind zwar ein mehr oder weniger gutes Hilfsmittel zur Abschätzung der zu erwartenden Frühfestigkeiten, können aber den Spritzvorgang nicht ersetzen. Eine direkte Messung der Frühfestigkeiten an Probekörpern ist nicht möglich, da Würfel oder andere Formen nicht zielsicher eingespritzt werden können. Das eingesetzte Prüfverfahren muss

- einfach und gut reproduzierbar sein,
- mit preiswerten, unempfindlichen Gerätschaften durchzuführen sein,
- den Messbereich 0 - 15 N/mm² abdecken,
- ohne vorbereitende Maßnahmen einsetzbar sein (der Prüfort sollte möglichst vor dem Spritzen nicht fixiert sein),
- auf spritzrauer Oberfläche durchführbar sein,
- nicht durch Faserarmierung gestört werden,
- einfache Kalibrierungen für unterschiedliche Mischungen erlauben,
- in rauer Tunnelumgebung verwendbar sein,
- allgemein (durch z.B. Regelwerke) anerkannt sein,
- sich auf unterschiedlichen Baustellen und mit unterschiedlichen Mischungen bewährt haben und
- kontinuierlich selbst messen können. [1]

Das in der EN 14488-2 [2] beschriebene Verfahren erfüllt alle obigen Anforderungen außer der selbstständigen, kontinuierlichen Messung. In [3, 4] werden Verfahren vorgestellt, die diese kontinuierliche Messung erbringen würden. Das wäre ein großer Fortschritt. Allerdings müssen noch „Hausaufgaben“ zur Erfüllung der anderen Forderungen gemacht werden. Dies wird sich kurzfristig wahrscheinlich nur für das Laborspritzen lösen lassen.

3. Geschichte

Während bis etwa 1985 das Kaindl Meyco Verfahren [5, 10] eingesetzt wurde, mit dem etwa ab 1,5 N/mm² an einem vorher festgelegten Platz durch Ausziehen eines eingespritzten Bolzens gemessen werden konnte, haben sich seit 1985 die Nadelpenetration und das Bolzensetzverfahren als praxistaugliche Prüfverfahren durchgesetzt.

Die Entwicklung solch eines Systems bis zur Aufnahme in Euronormen braucht Zeit. Das derzeitige Prüfsystem mit Penetrationsnadel und Setzbolzenverfahren wurde in einer Vorstufe 1968 von Sällström [6] veröffentlicht und für mitteleuropäische Verhältnisse in meiner Doktorarbeit 1983 mit neuen Geräten verbessert und nachgewiesen [7]. 1984 wurde das Verfahren erstmals in einer Fachzeitschrift [8] veröffentlicht und 1985 auf der ersten Spritzbeton-Tagung [9] vorgestellt. Auf Grund großen Bedarfs wurde es bereits in die erste Richtlinie Spritzbeton des Österreichischen Betonvereins 1989/91 [10] aufgenommen, aber erst 2006 erschien die EN 14488-2 [2], die sich ausschließlich mit dem Messverfahren befasst.

Sowohl das Penetrationsnadel- als auch das Setzbolzenverfahren haben sich weltweit auf Tunnelbaustellen bewährt.

4. Messprinzip

Zwei Messverfahren haben sich durchgesetzt, die beide indirekt über das Eindringen eines dünnen Eindringkörpers arbeiten.

- Das Penetrationsnadelverfahren, bei dem eine Nadel 15 mm in den Beton unter Erfassung der dazu notwendigen Kraft eingedrückt wird, für die ersten Frühfestigkeiten bis etwa 1,0 (1,2) N/mm².
- Das Setzbolzenverfahren, bei dem Setzbolzen mit definierter Setzenergie in den Beton eingetrieben werden und die anschließend unter Messung der Ausziehkraft gezogen werden. Das Setzbolzenverfahren ist ab Festigkeiten von etwa 2 N/mm² einsetzbar. Als Prüfparameter wird das Verhältnis Ausziehkraft zu Eindringtiefe herangezogen. [11]

Neben dem Standard-Setzbolzenverfahren (Hilti DX 450-SCT mit grünen Kartuschen) wurden auch Verfahren mit anderem Messbereich (1 bis 8 MPa, 17 bis 56 MPa) oder nur über die Eindringtiefe messend, kalibriert.

Für die Bestimmung von Festigkeiten über 10 N/mm² werden in der Regel Bohrkerns gezogen.

5. Prüfgeräte

5.1 Penetrationsnadelverfahren

Für die Messung wird ein Proctor-Penetrometer z.B. gem. ASTM C 403-08 mit einem Messbereich von mindestens 700 N verwendet. Das Gerät zeigt beim Zusammendrücken einer kalibrierten Feder an einer Schleppanzeige eine Widerstandskraft an [8]. Alternativ können Penetrometer mit elektronischer Kraftaufnahme verwendet werden. Es ist eine Nadel mit Durchmesser $3 \pm 0,1$ mm und unter $60^\circ \pm 5^\circ$ zugespitztem Ende zur Bestimmung der Druckfestigkeiten bis 1,0 N/mm² zu verwenden.

Die Beurteilung des Messbereichs vor 5 Minuten ist auch bedeutsam. Man verwendet dazu eine dickere Nadel mit \varnothing 9 mm und flacher Spitze [10]. Für Rückprall, Einbettung der Bewehrung, Aufbau dicker Schichten, Absacken, Auftragsgeschwindigkeit sind diese Werte bedeutsam (siehe auch [12]). Eine Eichung in diesem Messbereich ist aber schwer möglich. Daher wird in diesem Messbereich oft nur optisch oder mit der „Daumenmethode“ beurteilt.

5.2 Setzbolzenverfahren

Bolzen werden mit einem Setzbolzengerät in den Beton durch einen im Gerät integrierten Kolben gesetzt. Ein Schussbolzengerät ist in Österreich verboten. Den Unterschied kann man am sogenannten „Klick“-Effekt hören. Wenn nämlich auf unebenen Spritzbetonuntergrund die Bolzenführung des Setzbolzengeräts nicht ganz in die Standplatte hinein-

gedrückt wird, löst das Sicherheitskolbengerät die Zündung nicht aus und es ist nur ein Klicken zu hören (Bild 2). Das ist manchmal ärgerlich, ist aber der Sicherheit geschuldet.

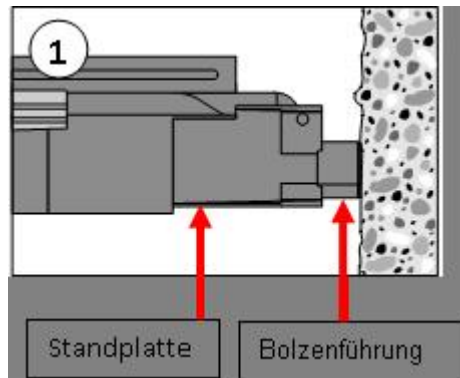


Bild 2: Sicherheitsmechanismus um nur ein Setzen der Bolzen zu erlauben [11]

Als Setzgerät wird in der Regel ein Sicherheitskolbengerät Hilti DX 450-SCT mit Kolbenführung L140 und mit grünen Kartuschen verwendet. Bei anderen Messbereichen kommen auch weiß oder gelb gefärbte Kartuschen zum Einsatz (Tabelle 1). Der Bolzendurchmesser beträgt 3,7 mm. Bolzen unterschiedlicher Länge kommen zum Einsatz um ein Versinken und zu weites Hervorstehen zu vermeiden.

In der Regel werden Geräte mit dem Kolbenführungstyp L140 eingesetzt. Sollte nur ein Gerät mit dem Typ L125 zur Verfügung stehen, muss die Energieeinstellung am Gerät verändert werden [11]. Für eine regelmäßige Reinigung und Wartung des Gerätes ist zu sorgen. Details zum Gerät und der Vorgehensweise finden sich in [11].

Als Ausziehgeräte kommen z.B. der HILTI Tester 4 (Kalibrierkurve dieses Gerätes beachten) oder Hilti Tester Mark 5, jetzt HAT28 bezeichnet, zum Einsatz. Für das übliche Verfahren eignet sich das Manometer mit dem Messbereich 0 - 5 kN. Es empfiehlt sich angepasste Unterlagen zu verwenden um die Distanz schneller einstellen zu können und ev. Unebenheiten und Schräglagen ausgleichen zu können.

6. Prüfvorgang

Das Penetrationsnadelverfahren und das Setzbolzenverfahren sind in verschiedenen Regelwerken beschrieben. Im Folgenden ist die Arbeitsanweisung aus der ÖVBB Richtlinie Spritzbeton (Ausgabe 12/2009) mit Ergänzungen zitiert [13]:

„Beim Penetrationsnadelverfahren misst man die Kraft, die erforderlich ist, eine Nadel mit definierten Abmessungen (mit etwas größerer zulässiger Streuung als in ÖNORM EN 14488-2) 15 ± 3 mm tief in den Spritzbeton zu drücken.

- a) Das Verfahren ist für im Tunnelbau in Österreich übliche Spritzbetone mit Größtkorn 8 bzw. 11 mm gemäß dieser Richtlinie kalibriert (Abb. 12/4 der RL). Es können auch die identen Kalibrierkurven des Anhang A der ÖNORM EN 14488-2 mit der y-Achsen Einteilung eines speziellen Herstellers verwendet werden. Bei Abweichung davon sind eigene Kalibrierkurven zu erstellen.
- b) Prüfvorgang und Auswertung (Anhang 2 der RL, Blatt 1):
 - Gerät ansetzen und die Nadel in einem Druck bis 15 mm eindrücken.
 - Widerstandskraft von Skala ablesen und notieren.

- Mindestens 10 Einzelversuche je Prüfvorgang - dabei ist zu beachten, nicht auf ein großes Zuschlagkorn zu drücken.
- Zeitpunkt und Prüfstelle festhalten.

Mit dem Mittelwert aus den Messungen gem. b) erhält man aus der Kalibrierkurve (Abb. 12/4 der RL) die Würfeldruckfestigkeit. Extrapolationen sind nicht zulässig.“

Für das Setzbolzenverfahren lautet die Anleitung [13]:

“Es werden Gewindebolzen in den Beton getrieben, die Eindringtiefe bestimmt und gleich anschließend unter Messung der Ausziehkraft gezogen. Parameter für die Bestimmung der Druckfestigkeit ist das Verhältnis Ausziehkraft zu Eindringtiefe. Das Setzgerät muss in der Lage sein einen Bolzen mit gleichmäßiger Energie 20 mm in den Jungen Beton zu treiben. Setzenergie $E = 96 \pm 8$ Joule, Bolzendurchmesser 3,7 mm.

Die Ausziehkraft (Höchstkraft) ermittelt man mit einem Ausziehprüfgerät mit einer Genauigkeit gemäß ÖNORM EN 14488-2 von < 5 %. Für den Einsatz dieser Geräte werden in der RL Kalibrierkurven angegeben. Das Verhalten ist für übliche Spritzbetone im Tunnelbau kalibriert (Abb. 12/5 der RL und EN 14488-2). Bei Abweichungen davon - vor allem in der Mohs'schen Härte der Gesteinskörnungen - ist eine Kalibrierung durchzuführen.“

Tab. 1: Bisher geregelte Messbereiche für das Penetrationsnadel- und Setzbolzenverfahren mit den dazugehörigen Regelwerken [11]

Messbereich	Verfahren	Kartusche	Energieeinstellung DX 450-SCT	Größtkorn	Gestein	Regelwerk**
„Erstarren“	Penetrationsnadelverfahren Ø 9 mm	-	-	0-8 0-16	nicht relevant	ÖVBB 1991 ÖVBB 1998
0,2 bis 1,0 MPa	Penetrationsnadelverfahren Ø 3 mm	-	-	0-8 0-11 0-16	Dolomitisch/ kalzitisch (für dieses Verfahren nicht relevant)	EN 14488-2 ÖVBB 2004 ÖVBB 2009 ÖVBB 1991 EN14488-2
1 bis 8 MPa	Setzbolzenverfahren Hilti DX 450-SCT	Weiß***, Sonderverfahren	1*	0-8/11	Dolomitisch/ kalzitisch	ÖVBB 1998
2 bis 16 MPa	Setzbolzenverfahren Hilti DX 450-SCT	Grün Standardverfahren	1*	0-8/11	Dolomitisch/ kalzitisch	EN 14488-2 ÖVBB 2009 ÖVBB 2004 ÖVBB 1991
				0-16	Hartgestein (Diabas)	EN 14488-2
17 bis 56 MPa	Setzbolzenverfahren Hilti DX 450-SCT	Gelb Sonderverfahren	2*	0-8/11	Dolomitisch/ kalzitisch	ÖVBB 1998 ÖVBB 2004

* für Kolbenführung L140 kalibriert (entspricht der Geräteausrüstung des DX 450-SCT, im Sonderfall einer alternativen Kolbenführung L125 sind andere Einstellungen zu verwenden).

** ÖVBB = ÖVBB Richtlinie Spritzbeton mit jeweiligen Ausgabedatum [10, 13]

*** Wird heute im Allgemeinen nicht mehr verwendet.

„Prüfvorgang und Auswertung (Erläuterungen im Anhang 3 der RL und in Pkt. 5.2 der EN 14488-2)

- Kenntnisnahme der Sicherheitsvorschriften für das Setzgerät
- Schutzbrillen anlegen
- Bolzen laden und Gerät auf Einstellung „1“
- Gerät ansetzen und Bolzen setzen, je 10 Einzelversuche je Prüfvorgang mit > 80 mm Abstand zueinander und > 100 mm zu Kanten
- Vorstand der Bolzen über Betonoberfläche messen und notieren
- Eindringtiefe ermitteln, Mindesteindringtiefe 20 mm
- Mutter befestigen und Bolzen in gleicher Reihenfolge losziehen. Belastung in Bolzenrichtung aufbringen!
- Ausziehkraft, Zeitpunkt und Prüfort festhalten, Kraft mit Kalibrierkurve des Ausziehgerätes korrigieren
- Bestimmung des Verhältnisses Ausziehkraft „P“ zu Eindringtiefe „L“
- P/L der Einzelwerte
- Mit Mittelwert aus Kalibrierkurven Würfeldruckfestigkeit entnehmen. Extrapolationen sind nicht zulässig.“

An manchen Baustellen wird das Setzbolzenverfahren ohne Messung der Ausziehkraft durchgeführt. Man erzielt damit im Labor eine etwas geringere Korrelation, dafür geht es schneller und eventuelle Fehler beim Ausziehen und Auswertung können ausgeschlossen werden. Diese Variante ist aber derzeit nicht normkonform, muss also vertraglich vereinbart werden und die entsprechenden Eichkurven sind zu erstellen.

7. Kalibrierung

Mit folgenden Mischungen (Tab. 2) erfolgte die ursprüngliche Kalibrierung, die auch den im Regelwerk angegebenen Diagrammen zu Grunde liegt. Darüber hinaus wurden mit anderen Mischungen an vielen Baustellen eigene Kurven erstellt. Die Kalibrierungen für den Messbereich 1,0 bis 8,0 N/mm² finden sich in [14 und 13, Ausgabe 1998].

Die im Regelwerk angeführten Kalibrierkurven sind gut für Mischungen und Gesteinskörnungen, wie sie üblicherweise in Mitteleuropa eingesetzt werden, geeignet. Für die Erstellung wurden unterschiedliche Rezepturen unter Variation der Gesteinskörnungen, der Sieblinie, des Bindemittelgehaltes und des W/Z-Wertes berücksichtigt. Für Diabas gibt es z.B. in EN 14488-2 eine eigene Eichkurve. Die Eichungen wurden mit Würfeln mit Kantenlänge von 20 cm durchgeführt.

Bei abweichender Mischungszusammenstellung (zu Tab. 2), vor allem in der Mohs'schen Härte der Gesteinskörnungen (Setzbolzen) und Größtkorn, ev. Kornform (Penetrationsnadel), empfiehlt es sich eine neue Eichkurve zu erstellen. Die Vorgehensweise ist auch kurz in der ÖVBB-Richtlinie [13] beschrieben:

„Für die Kalibrierung verwendet man unbeschleunigte Spritzbeton-Ausgangsmischungen, bei deren Rezeptur die Rückprallverluste berücksichtigt werden (höherer Bindemittelgehalt, feinere Sieblinie). Die Mischung wird in Probeformen eingebracht, verdichtet und abgedeckt gelagert. An Würfel (oder Zylinderproben) werden nach gewissen Zeiten die Druckfestigkeiten nach den geltenden Vorschriften bestimmt. Die Entschalung erfolgt kurz vor der Prüfung. Dazu sind für diesen niedrigen Lastbereich geeignete Prüfmaschinen zu verwenden. An getrennt hergestellten Platten mit etwa gleicher Kubatur, aber 10 cm Dicke, werden die Versuche mit den Eindringverfahren nach der jeweiligen Prüfvorschrift durchgeführt. Die Temperaturentwicklung in den Würfeln und den Platten sollte möglichst

entsprechen, um bei gleichen Hydratationsgrad zu prüfen, ev. bei gleicher Reifezahl. Die Platten bleiben während der Prüfung eingeschalt und sind satt auf dem Untergrund zu lagern. Die Prüfung hat möglichst zeitnah zu erfolgen. Mit den Ergebnissen beider Prüfungen erstellt man mit der linearen Regressionsrechnung eine Eichkurve. Der Korrelationskoeffizient sollte $k > 0,85$ betragen. Extrapolationen über die Kurve sind nicht zulässig.“

Das Penetrationsnadelgerät kann man durch Drücken auf eine Waage kontrollieren, die Funktionsweise des Setzbolzengeräts samt Kartuschen durch Eintreiben in passende homogene Holzwerkstoffe unter Vergleich der Eindringtiefen, die Kalibrierung des Ausziehgerätes erfolgt in der Regel durch den Hersteller auf einer Universalprüfmaschine, kann aber auch in jedem Prüflabor erfolgen.

Tab. 2: Mischungszusammenstellung für die im Regelwerk angeführte Kalibrierung (W/Z=Wasser/Zement-Wert, Z/G=Verhältnis Zement / Gesteinskörnung, GK=Größtkorn, Kons=Konsistenz des Frischbetons, LP=Luftporengehalt, RG=Raumgewicht des Frischbetons, PZ=Portland Zement, (H)=Hüttensand)

Mischungszusammenstellung für die Kalibrierung Hilti DX 450-SCT (Kolbenführung L140)									
Zement	W/Z	Z/G	GK	Sieblinie	Gestein	Kons	LP	RG	
420 kg/m ³ PZ 375	0,40	1 : 4,31	8	$\frac{A+B}{2}$ Kantkorn	Dolomitisch kalzitisches Mischgestein	K1	3,3	2,43	
420 kg/m ³ PZ 375	0,45	1 : 4,183	8	B ₈ Rundkorn	— " —	K1	5,4	2,30	
440 kg/m ³ PZ 475 (H)	0,47	1 : 3,86	8	B ₈ Kantkorn	— " —	K1	2,36	2,36	
420 kg/m ³ PZ 375	0,45	1 : 4,183	16	B ₁₆ Rundkorn	— " —	K2	2,4	2,39	
420 kg/m ³ PZ 475 (H)	0,42	1 : 4,39	16	$\frac{A+B}{2}$ Kantkorn	— " —	K1	2,6	2,46	
420 kg/m ³ PZ 375	0,40	1 : 4,31	16	$\frac{A+B}{2}$ Kantkorn	— " — + Diabas 8/16	K1	2,7	2,48	
Mischungszusammenstellung für die Kalibrierung des Eindringverfahrens und Vorversuche Hilti DX 450-SCT (Kolbenführung L140)									
Zement	W/Z	Z/G	GK	Sieblinie	Gestein	Kons	LP	RG	
375 kg/m ³ PZ 375 (H) + FM	0,40		8	$\frac{A+B}{2}$ Kantkorn	Dolomitisch kalzitisches Mischgestein				
400 kg/m ³ PZ 375	0,43	1 : 4,76	8	B ₈ Rundkorn	— " —	K1	3,9	2,38	
397 kg/m ³ PZ 375	0,42	1 : 4,49	16	B ₈ Kantkorn	— " —	K1			
230 kg/m ³ PZ 375	0,65	1 : 9,19	16	B ₁₆ Rundkorn	— " —	K1	2,1	2,32	
400 kg/m ³ PZ 375	0,50	1 : 4,58	16	$\frac{A+B}{2}$ Kantkorn	— " —	K3	2	2,40	
400 kg/m ³ PZ 375	0,43	1 : 4,76	16	$\frac{A+B}{2}$ Kantkorn	— " —	K1	---	2,45	

8. Anforderungen im Tunnelbau

Die Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons bis 24 Stunden muss beim Tunnelvortrieb an die Anforderungen angepasst werden. Die Angabe der Frühfestigkeitsklasse J1 bis J3 nach ÖBV-RL Spritzbeton oder EN 14487-1 ist heute im Tunnelbau nach der NÖT nicht mehr weg zu denken. Diese Frühfestigkeitsklassen wurden aber erst 1989 in der ÖBV-RL Spritzbeton [10] eingeführt. Grundlage waren Untersuchungen in Spritzversuchen (Symbolbild 3) und an verschiedenen Baustellen mit der damals neu entwickelten Methode der Frühfestigkeitsprüfungen. Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in [7, 9, 15, 16] publiziert. Weitere Erfahrungen und Diskussionen in den Arbeitssitzungen des ÖBV Arbeitskreises Tunnelbeton führten durch Dr. Helmut Huber und dem Autor zur Festlegung der heute bekannten Kurven. Über die Zeit erfolgten nur leichte Anpassungen. Die Festlegungen haben sich also sehr gut bewährt, obwohl die Versuche damals, gegenüber heutigen Spritzleistungen, mit niedrigem Durchsatz und meist im Trockenspritzverfahren gespritzt wurden.



Bild 3: Zu geringe Festigkeitsentwicklung beim Auftrag über Kopf in der Versuchseinrichtung

Die Frühfestigkeitsklassen sind auch ein wichtiges Instrument für Ausschreibung und Qualitätssicherung geworden. Der Bereich vor den Festlegungen in den Frühfestigkeitsklassen wird eher stiefmütterlich behandelt, weil er weniger das ausschreibende Büro betrifft. Materiallieferanten und ausführende Firmen sollten sich dafür intensiver interessieren.

Die ÖBV-Richtlinie Spritzbeton gibt zu der Auswahl der Frühfestigkeitsklassen folgende Empfehlungen [13]:

„Eine entsprechende Festigkeitsentwicklung in den ersten Minuten ist Voraussetzung für den Auftrag über Kopf (Festigkeit nach 2 Minuten 0,1 bis 0,2 N/mm²). Die Festigkeitsentwicklung in den ersten Minuten hat auch großen Einfluss auf die Staubentwicklung und den Rückprall, weil bei einer zu raschen Festigkeitsentwicklung der Spritzbeton unmittelbar nach dem Auftreffen an der Wand erhärtet und die Grobanteile des nachfolgenden Spritzbetons sich schlecht einbetten können. Deshalb ist es zur Verringerung der Staub- und Rückprallentwicklung günstig, wenn der Messwert nach zwei Minuten bei normalen Verhältnissen für den Spritzbetonauftrag 0,2 N/mm² nicht übersteigt.

Spritzbeton **J₁** eignet sich für den Auftrag von dünnen Lagen auf trockenem Untergrund ohne besondere statische Anforderungen und hat den Vorteil von wenig Staubentwicklung und Rückprall.

Die Anforderung **J₂** ist gegeben, wenn Spritzbeton in dicken Lagen (auch über Kopf) mit hoher Leistung aufgetragen werden soll; weiters bei leichtem Wasserandrang und bei Beanspruchung durch unmittelbar nachfolgende Arbeitsvorgänge (z.B. das Bohren von Ankerlöchern, Eintreiben von Dielen, Erschütterung durch Sprengschlag).

Die Anforderung **J₂** ist auch bei rasch auftretenden Einwirkungen aus Gebirgsdruck, Erddruck oder nachdrängenden Lasten gegeben. Die Festlegung des Bereichs richtet sich auch nach dem Auslastungsgrad des Jungen Spritzbetons.

Spritzbeton **J₃** sollte wegen erhöhter Staubentwicklung und vermehrtem Rückprall nur bei echtem Bedarf vorgeschrieben werden (z.B. großer Wasserandrang, statische Anforderungen, rascher Vortrieb).“

Dabei sollte bei der Festlegung der Klassen nicht vergessen werden, dass parallel zur Festigkeitsentwicklung Änderungen der Steifigkeit und des Verformungsverhaltens einhergehen [17].

9. Regelwerke

Das hier behandelte Messverfahren wurde in der ÖBV-Richtlinie Spritzbeton [10,13] festgelegt und in der EN 14488-2 [2] übernommen.

In dem deutschen Text wurde dort und in EN 14487-1 [18] fälschlicherweise auch Bolzenschussgerät und Eindringnadelverfahren bzw. Bolzentreibverfahren statt Bolzensetzgerät und Penetrationsnadelverfahren bzw. Setzbolzenverfahren übersetzt. Das Bild 1 in EN 14487-1 ist mit einem nicht ganz korrekten logarithmischen Maßstab in der Y-Achse wiedergegeben und in EN 14488-2 wird im informativen Anhang B in der 3. Formel im Nenner 6,69 statt 6,99 verwendet. Für die Verwendung des Diagramms der Frühfestigkeitsentwicklung empfiehlt sich daher die ausführliche Darstellung im Anhang 5 der ÖBV-RL „Spritzbeton“ 12/2009 (z.B. Bild 4).

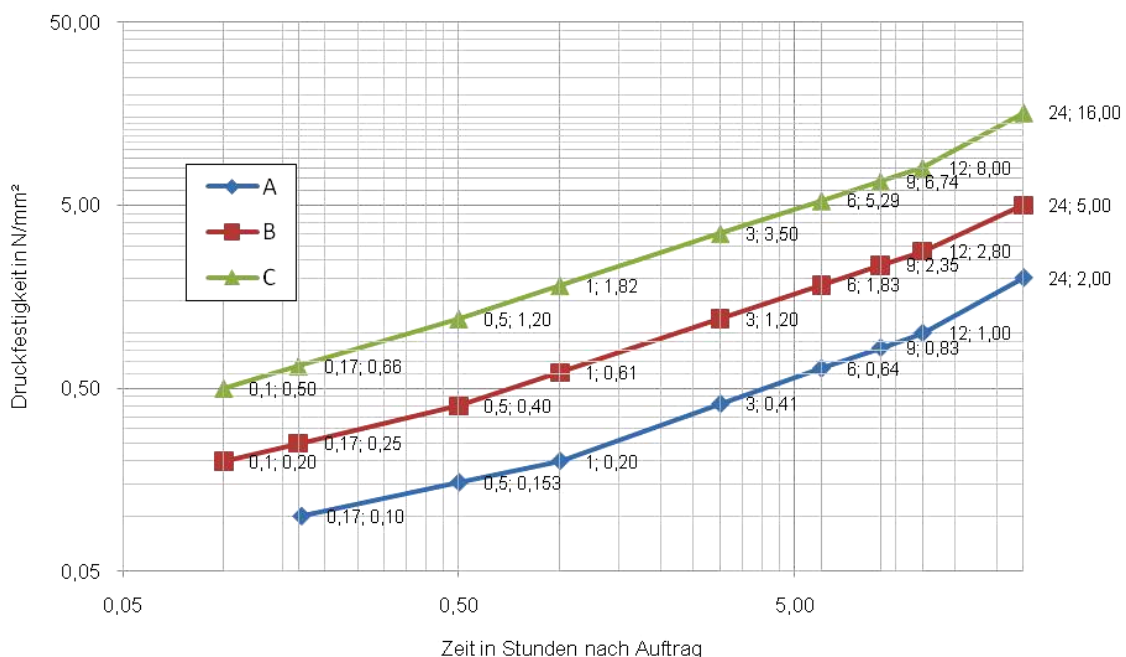


Bild 4: Frühfestigkeitsklassen in Excel Darstellung [13]

10. Anwendungshinweise

Die Messverfahren benötigen eine gewisse Mindestschichtdicke von etwa 10 cm. Messungen bei schichtenweisem, zeitversetztem Auftrag können zu Fehlinterpretationen führen. Alle Messungen setzen eine Spritzbetonzusammensetzung voraus, für die die Kalibrierkurven aufgestellt wurden. Wechsel im Größtkorn, der Kornform und der Härte der Gesteinskörnungen können daher ebenso zu Abweichungen führen, wie extreme Bindemittelgehalte. Auch schlecht gespritzte poröse Proben führen zu Abweichungen. Übliche Fasergehalte beeinflussen die Messergebnisse nur geringfügig.

Im Laufe der Jahre haben sich bestimmte Routinen bei der Frühfestigkeitsmessung eingebürgert. Wurde früher oft an der Ulme gemessen, was sowohl für den Laboranten unangenehm ist als auch teilweise die Vortriebsarbeiten stört, wird heute oft die Probekiste relativ rasch in den Laborwagen gepackt und die weiteren Messungen im Wagen oder Labor durchgeführt. Dabei wird meist ignoriert, dass die Spritzplatte nach [13] bis zu einer Festigkeit von 2,0 N/mm² (18 Stunden nach EN 14488-1) nicht bewegt werden darf.

Manche Laboranten behandeln die Platten sehr gut nach, andere vernachlässigen jedoch die Nachbehandlung und den Temperatureinfluss.

Beim Penetrationsnadelverfahren hat die Geschwindigkeit mit der die Nadel gedrückt wird einen gewissen Einfluss (Bild 5). Bei viel „Schwung“ besteht die Gefahr, die Nadel zu tief einzudrücken, bzw. am Anschlag die Kraft noch zu erhöhen. Daher ist auf die 15 mm Eindringtiefe genau zu achten. Große Gesteinskörnungen, sind bei niedrigeren Festigkeiten leicht erkennbar, bei Kräften über 700 N aber schwer festzustellen. Daher, und wegen der begrenzten menschlichen Kraft, enden dort die Eichkurven.



Bild 5: gleichmäßiges Eintreiben der Penetrationsnadel

Nachdem alle Prüfungen auf einer Probekiste durchgeführt werden, wird manchmal nicht beachtet, dass die Bolzen nicht nur in ausreichenden Abstand voneinander, sondern auch nicht in oder nahe der Löcher des Penetrationsverfahrens gesetzt werden sollen.

Die in den Regelwerken angegebenen Eichkurven gehen von einem Vorstand der Bolzen über der Betonoberfläche aus. Vereinfacht wird aber oft auf die Rondelle gemessen. Dies wäre möglich, wenn man die Eichung auch so durchführt.

Die HILTI DX 450 SCT ist ein sehr robustes, verlässliches Gerät. Sie erfordert aber eine Reinigung, speziell nach nur wenigen Messungen, da in dem Fall infolge zu geringer Betriebstemperatur vermehrt Kondenswasser im Gerät auftritt. Ein Blick auf die Leistungseinstellung des Geräts vor dem Setzen verhindert falsche Messergebnisse. Bolzen in drei Längen sind immer vorzuhalten. Zu schräg gesetzte Bolzen oder Bolzen, die an der Rondelle anstehen, sind auszuschließen.

Die fehlenden Messmöglichkeiten im Bereich zwischen 1 und 2 N/mm² führen oft zu Diskussionen. Die ÖBV-RL schreibt dazu [13]:

„Die Festigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons wird mit den Prüfverfahren, die hier beschrieben werden, ermittelt. Die Zeitpunkte der Messung und das Prüfverfahren sind während des Zeitraumes von 2 Minuten bis 3 Stunden der Festigkeitsentwicklung so anzupassen, dass ein möglichst kontinuierlicher Verlauf ermittelt wird (die im Diagramm angeführten Zeitpunkte sind als Richtwerte zu betrachten), wobei aufgrund der vorgegebenen Prüfverfahren Festigkeiten zwischen 1,0 und 2,0 N/mm² messtechnisch nicht erfasst werden können. Zeitpunkte sind projektspezifisch auf Grund der Ergebnisse der Erstprüfung zwischen den Partnern so festzulegen, dass Messzeitpunkte nicht in den Bereich zwischen 1,0 und 2,0 N/mm² fallen. In allen Fällen ist der Nachweis des Verlaufs von 6 Minuten bis zum Erreichen von 1,0 N/mm², und zumindest je ein Wert nach 4 bis 9 Stunden (im Messbereich Verfahren B) und nach 24 Stunden zu erbringen. Der Nachweis der Festigkeit zwischen 9 und 24 Stunden ist nur bei Angabe zusätzlicher Prüfzeitpunkte zu prüfen (z.B. J2 und nach 12 h: 5,0 N/mm²).“

Die Genauigkeit eines Messverfahrens steigt mit der Anzahl der Einzelmessungen und mit der Anzahl der Messungen über die Zeit. Die Mittelwerte zweier Messzeitpunkte sind immer mit einer Geraden zu verbinden, von 3 Messzeitpunkten immer durch eine Kurve. Das ist aber für eine seriöse Auswertung zu wenig, da keine Ausreißer erkannt werden können. Daher ist es für die Steigerung der Genauigkeit wichtig genügend Messungen und Messungen knapp an den Grenzen der Verfahren bei 1 und 2 N/mm² durchzuführen. In [17], Pkt. 9.2.2 können Gründe für nicht optimale Frühfestigkeitsentwicklungen nachgelesen werden. Diese „Ruhephasen“ können unter Umständen auch gerade in dem nicht erfassbaren Bereich liegen.

11. Zusammenfassung

Mit dem in EN 14488-2 [2] festgelegten Prüfverfahren zur Messung der Frühfestigkeit steht ein bewährtes Messsystem für Spritzbeton zur Verfügung. Die beauftragten Laboranten sollten aber auf gewisse Besonderheiten aufmerksam gemacht und gelegentlich auf Einhaltung der Prüfvorschriften kontrolliert werden. Im Regelwerk sind verschiedene Messbereiche für das Setzbolzenverfahren angegeben. In der Regel soll aber nur das Standardverfahren eingesetzt werden, um Verwechslungen auf der Baustelle zu vermeiden. Für eine ausreichende Genauigkeit ist es ausreichend mit jedem Verfahren zu mehreren Zeitpunkten zu messen, wobei eine Messung nahe an der Grenze des Messverfahrens liegen soll. Eine Steigerung des Messkomforts wäre die Einführung von permanent messenden Systemen. Für den verlässlichen Einsatz auf Baustellen ist hierzu aber noch einige Entwicklungsarbeit zu leisten.

12. Literatur

- [1] Kusterle, W.:
Vorwort, Spritzbeton-Tagung 2012. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Proc. Spritzbeton-Tagung 2012, Alpbach, 12.+13.1.2012, Eigenverlag, 2012.
- [2] EN 14488-2:
Prüfung von Spritzbeton – Teil 2: Druckfestigkeit von jungem Spritzbeton 6/2006.

- [3] Gibson, A.; Bernard, E.S.:
The early-age strength evaluation for FRS using embedded UPV measurement. In: Beck, T. et al.: Proceedings of the 6th International Symposium on Sprayed Concrete. Tecna, Tromsö, 2011.
- [4] Lindlar, B., Stenger, Ch., Lootens, D.:
Miniaturisiertes Laborspritzverfahren für Spritzbeton – Neue Möglichkeiten der Produktentwicklung, Rezeptoptimierung und Qualitätskontrolle. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Proc. Spritzbeton-Tagung 2015, Alpbach, 29.+30.1.2015, Eigenverlag, 2015.
- [5] Kaindl, F.:
Zur Güteprüfung der Frühfestigkeit von Spritzbeton. Tonindustrie-Zeitung 90, Nr. 6, 1966.
- [6] Sällström, S.:
Hållfasthetstillväxten hos sprutbetong med acceclererande tillsatsmedel. IVA-report No.4, Stockholm 1968, Bergmechansk diskussionsmöte, 9.2.1968, Stockholm.
- [7] Kusterle, W.:
Optimierung der Komponenten für Spritzbeton. Dissertation, Universität Innsbruck, 1983.
- [8] Kusterle, W.:
Ein kombiniertes Verfahren zur Beurteilung der Frühfestigkeit von Spritzbeton. Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984).
- [9] Kusterle, W.:
Frühfestigkeiten des Spritzbetons. In: Lukas, W.(Hrsg.): Spritzbeton-Technologie. Tagungsband der 1. Fach-Tagung in Innsbruck-Igls. Institut für Baustofflehre und Materialprüfung, Universität Innsbruck. 15. + 16. Januar 1985.
- [10] ÖBV:
Richtlinie Spritzbeton. Teil 1 – Anwendung. Wien, Januar 1989 und Teil 2 – Prüfverfahren. Wien, Juni 1991.
- [11] HILTI:
Prüfung der Frühfestigkeit von Spritzbeton mittels Setzbolzenverfahren Hilti DX 450-SCT. Bedienungsanleitung, HILTI Aktiengesellschaft Schaan und Prof. Wolfgang Kusterle, 12/2011.
- [12] Fischer, M., Hofmann, M.:
Reinforced shotcrete with bar diameters up to 32 mm. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Proc. Spritzbeton-Tagung 2015, Alpbach, 29.+30.1.2015, Eigenverlag, 2015.
- [13] ÖVBB:
Richtlinie Spritzbeton. Ausgabe 1998, 2004 und 12/2009. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, jetzt ÖBV Österreichische Bautechnik Vereinigung.
- [14] Testor, M.; Kusterle, W.:
Ermittlung von Spritzbetondruckfestigkeiten, Modifiziertes Setzbolzenverfahren und Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Probekörpergeometrie. Zement + Beton 3 / 1998.
- [15] Kusterle, W.:
Anforderungen an die Spritzbetonfrühfestigkeit für das Auftragen über Kopf. Zement und Beton, 30.Jg, Heft 1, 1985.
- [16] Kusterle, W., Lukas, W.:
Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton mit flüssigen und pulvrigen Erstarrungsbeschleunigern. Beton- und Stahlbetonbau 3/1985.
- [17] Kusterle, W., Jäger, J., John, M., Neumann, Ch., Röck, R.:
Spritzbeton im Tunnelbau. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F., Wörner, J-D. (Hrsg.): Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7. BetonKalender 2014, 103. Jahrgang, Ernst & Sohn, Berlin, 2014.
- [18] ÖNORM EN 14487-1:
Spritzbeton – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformität. Ausgabe 5/06.

Zum Autor

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Kusterle
Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck. Universitätsdozent für hydraulisch gebundene Werkstoffe an der Universität Innsbruck. Forschungstätigkeiten, Entwicklung von Prüfverfahren und Consulting in Betontechnologie, Betoninstandsetzung, Faserbeton, Spritzbeton und Tunnelbau. Seit 2001 Professor für Baustoffkunde an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg.
wolfgang.kusterle@oth-regensburg.de