

Frühfestigkeiten des Spritzbetons

Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang KUSTERLE

Institut für Baustofflehre und Materialprüfung, Universität Innsbruck

1. EINFÜHRUNG

Spritzbeton wird einseitig auf eine Auftragsfläche (Schalung, Untergrund) aufgebracht. Es fehlt die (sonst vorhandene) Stützwirkung einer zweiseitigen Schalung für den grünen Beton. Der aufgebrachte Spritzbeton muß also in der Lage sein, an der Auftragsfläche zu haften, sich selbst abzustützen und die oft rasch auftretenden äußeren Belastungen aufzunehmen.

Im Tunnelbau sind dies vor allem die Belastungen aus dem Eigengewicht beim Auftrag über Kopf, die eine gute Haftung und inneren Zusammenhalt erfordern, sowie die gleichzeitig erforderliche kraftschlüssige Verbindung mit dem Fels zur Sicherung des Zusammenhaltes der Felsenoberfläche. Beim Ankerbohren zu frühen Zeitpunkten und durch den Sprengschlag sowie den wachsenden Gebirgsdruck wird der Spritzbeton unterschiedlich belastet. Um diese Anforderungen zu erfüllen, muß der Spritzbeton mit Zusatzmitteln beschleunigt werden.

2. MESSMETHODEN ZUR ERFASSUNG DER FRÜHFESTIGKEIT

Obwohl die Beanspruchung des jungen Spritzbetons aus einer Kombination von Haft-, Zug-, Biege-, Druck- und Scherspannung besteht, ferner das Verformungsverhalten interessiert, wird bei allen Meßmethoden vor allem auf die Erfassung der Druckfestigkeit Wert gelegt. Dies mag auf die Einteilung der Betone in Festigkeitsklassen, nach ihrer wichtigsten Eigenschaft, der Druckfestigkeit, zurückzuführen sein, oder darauf, daß fast alle Meßmethoden aus dem normalen Ortbetonbau übernommen wurden. Jedenfalls wird auch für Spritzbeton oft nur seine 28-Tage-Druckfestigkeit als Qualitätskriterium herangezogen. Da unter einer Druckfestigkeit von 10 N/mm^2 keine Bohrkerne (direkteste und beste Meßmethode) mehr entnommen werden können, das Einspritzen von Würfelformen aber falsche Werte liefert, muß die Messung der Druckfestigkeit unter diesem Wert mit indirekten Verfahren erfolgen. Dabei wird von irgendeiner Meßgröße auf die Druckfestigkeit des Betons geschlossen. Es handelt sich dabei meist um quasi zerstörungsfreie Prüfverfahren in oberflächennahen Schichten. Die direkte Prüfung am Bauteil ist als Vorteil gegenüber getrennt gelagerten Probekörpern zu sehen.

Folgende Anforderungen sind an die Prüfverfahren zu stellen (1):

- Einfacher, gut reproduzierbarer Prüfungsvorgang
- Preiswerte, unempfindliche Meßgeräte
- Meßbereich $0 - 15 \text{ N/mm}^2$ Betondruckfestigkeit
- Jederzeitige Einsetzbarkeit ohne vorbereitende Maßnahmen (Kontrollmöglichkeit)

Die Prüfverfahren können folgendermaßen eingeteilt werden:

2.1 Penetrationsverfahren

Ein Stempel, Bolzen oder Bohrer mit definierten Abmessungen wird mit einer definierten Kraft bzw. einem definiertem Weg in den grünen oder jungen Beton gedrückt, getrieben oder gebohrt. Von der gemessenen Widerstandskraft oder dem Eindringweg wird auf die Druckfestigkeit geschlossen. Man mißt dabei aber eher eine Kombination von Druck- und Scherfestigkeit bzw. den Widerstand gegen örtliche plastische Verformungen. Penetrationsnadeln eignen sich dabei für ganz frühe Festigkeiten, während "Simbi Hammer" und "Setzbolzen" sowie "Windsor-Gerät" für etwas höhere Festigkeiten verwendet werden (2).

Mit einem Penetrationsverfahren kann die Festigkeit von der Oberfläche bis 10 cm Tiefe gemessen werden. Eine raue Oberfläche hat wenig Einfluß. Die Betonzusammensetzung und hier vor allem der Zuschlag fließen in die Ergebnisse ein.

2.2 Ausziehverfahren

Bolzen oder Tellerbolzen werden unter Messung der Ausziehungskraft gezogen und eventuell die Abmessung des gezogenen Spritzbetonkörpers ermittelt. Dabei wird hauptsächlich eine Scherfestigkeit festgestellt. Ausziehverfahren wurden in Rußland, den USA, Dänemark, Finnland, Griechenland und Österreich entwickelt (3). Die meisten Verfahren müssen vor dem Betonieren vorbereitet werden. Eine Verankerung mit Klebern oder dübelähnlichen Bolzen ist noch nicht ausgereift. Tassios mißt die Ausziehungskraft von Schraubbolzen, welche mittels Setzapparat in den Beton getrieben werden (4). In Österreich wird das Kaindl-Meyco-Ausziehgerät verwendet. Die Genauigkeit der Meßwerte wird mit $\pm 25 \%$ angegeben. Die Werte müssen altersabhängig korrigiert werden (5). Eine Abhängigkeit vom verwendeten Größtkorn wurde nicht untersucht, ist aber nach Kierkegaard-Hansen (einem ähnlichen Verfahren) gegeben (3).

2.3 Kombinierte Verfahren

Bei zwei Verfahren werden Bolzen in den Beton getrieben und anschließend unter Messung der Ausziehkraft gezogen. Aus dem Verhältnis Ausziehkraft zu Eindringtiefe wird auf die Druckfestigkeit geschlossen (6 und 7). Durch die Kombination zweier Meßgrößen wird die Korrelation zur Druckfestigkeit verbessert.

2.4 Weitere Möglichkeiten

Beim Abbrech-Verfahren wird ein Rohr in den jungen Beton getrieben und anschließend gezogen. Der Ringspalt wird hydraulisch erweitert und dadurch der Zylinder abgebrochen. Aus der Abbrechkraft wird auf die Druckfestigkeit geschlossen (8). Das Verfahren dürfte wegen der rauen Oberfläche des Spritzbetons und der durch die Spaltherstellung im jungen Beton verursachten Gefügestörungen für Spritzbeton weniger geeignet sein.

Abreiß-Versuch, Messung der Ultraschallgeschwindigkeit und andere physikalische Meßmethoden sowie Rückprallhämmer und Kugelschlaghämmer eignen sich (wegen der rauen Spritzbetonoberfläche und aus anderen Gründen) weniger.

Am Institut für Baustofflehre und Materialprüfung, Innsbruck, wurde folgendes Verfahren geeicht, welches sich in vielen durchgeführten Meßreihen in der Praxis zur vollsten Zufriedenheit bewährt hat:

Bis zu einer Festigkeit von $1,2 \text{ N/mm}^2$ werden die Messungen mit Penetrationsnadeln von $\varnothing 9 \text{ mm}$ mit flacher Spitze und $\varnothing 3 \text{ mm}$ mit unter 60° zugespitztem Ende durchgeführt. Von 2 bis 15 N/mm^2 werden mit einer Hilti DX 450 "L" Schraubbolzen mit einer Schaftlänge bis 95 mm und $\varnothing 3,7 \text{ mm}$ gesetzt und anschließend gezogen. Aus dem Verhältnis Ausziehkraft zu Eindringtiefe wird auf die Druckfestigkeit geschlossen. Das Verfahren erfüllt alle oben gestellten Anforderungen. Die Genauigkeit steigt außerdem durch die Messung der Festigkeit über den gesamten Festigkeitsbereich. Ab 10 N/mm^2 werden Bohrkerns gezogen. Einschränkungen bestehen bei der Verwendung unterschiedlicher Zuschläge (Größtkorn, Mohs'sche Härte) (7).

3. ABSCHÄTZUNG DER FRÜHFESTIGKEITSENTWICKLUNG IM LABOR

Die Abbindezeiten der Zemente sind nach Normen festgelegt, um ein problemloses Verarbeiten und Verdichten der Betone zu ermöglichen. Sie werden mit der Vicat-Nadel geprüft. Die Abbindezeiten und die Entwicklung der frühen Festigkeiten müssen aber für Spritzbetone meist mit BE-Mitteln beschleunigt werden. Verschiedene Zemente reagieren aber mit verschiedenen Beschleunigern unterschiedlich, wobei die genauen Reaktionen nicht bekannt sind. Es bestehen nur Hypothesen und Erfahrungswerte.

Diese Abschätzung der Reaktion wird mit leicht modifizierten Vicat-Versuchen durchgeführt (verlorene Schalung, W/Z -Wert = $0,35$) (1). Dabei ist auf die Einhaltung gleichmäßig kurzer Mischzeiten zu achten, da die Resultate stark davon abhängen (9) (Abb.1). Außerdem sind die Ergebnisse vom W/Z -Wert bzw. der Konsistenz des Leimes abhängig. Verschiedene Beschleuniger in verschiedener Dosierhöhe und Zugabeform beeinflussen die Konsistenz beträchtlich (W/Z -Wert = $0,25$ bis $0,4$ bei gleich-

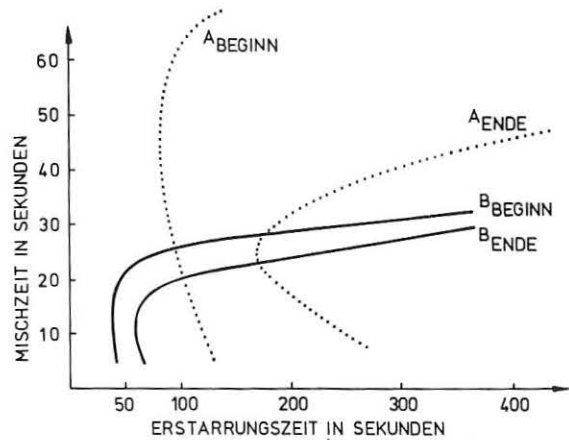


Abb.1. Erstarungszeiten zweier Zement/Beschleuniger-Kombinationen in Abhängigkeit von der Mischzeit (nach (9)).

cher Konsistenz möglich) (Abb.2). Eine Einstellung der Konsistenz ist aber wegen der geringen zur Verfügung stehenden Zeit nicht durchführbar. Beschleuniger mit extrem hohem oder niedrigerem Wasseranspruch werden mit der Vicat-Methode daher oft falsch beurteilt. Der Einfluß des W/Z -Wertes bzw. Wasserbedarfs eines beschleunigten Zementes auf die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons wird allgemein unterschätzt. Die von Huber gestellten Anforderungen (10) mit Abbinde-Beginn von 1 Minute und Abbinde-Ende von $2 \frac{1}{2}$ Minuten sind streng, aber mit Kombinationen, die sie erfüllen, kann sicher über Kopf gespritzt werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Frühfestigkeit zu beurteilen, ist die Messung der Ettringitbildung und des Gipsabbaus im Zementleim. Das dem Zement zugesetzte Sulfat bildet mit C_3A hauptsächlich Ettringit. Dieser bildet eine Art Filzschicht um die Zementkörner, die einen weiteren Angriff des Wassers auf das C_3A verhindert. Bricht diese Schicht auf, wiederholt sich dieser Vorgang, bis das SO_2 im Gemisch verbraucht ist. Die Bildung von Ettringit und der Abbau von Gips können daher als Maß für das Fortschreiten der Hydratation

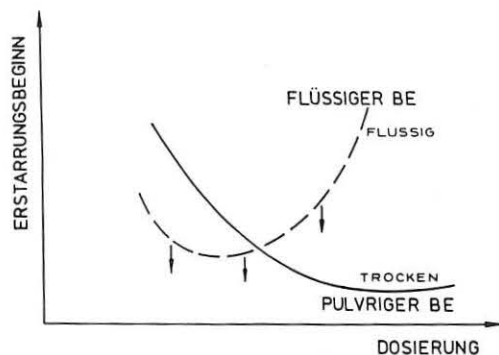


Abb.2. Erstarungszeiten zweier Zement/Beschleuniger-Kombinationen mit gleichem W/Z -Wert in Abhängigkeit von der Dosierhöhe. Der flüssige Beschleuniger verflüssigt in diesem Fall den Zementleim. Die weichere Konsistenz schlägt sich in längeren Erstarungszeiten nieder. Senkt man den W/Z -Wert, verschiebt sich die Kurve in Richtung der Pfeile.

zu frühen Zeiten und zum Abschätzen des Erstarrungsverhaltens herangezogen werden. Eine Ettringitbildung von 7 %, bezogen auf den Zement, 5 Minuten nach Wasserzugabe hat sich bei Vorversuchen als Grenzwert für die Eignung zum Spritzen über Kopf in dickeren Schichten ergeben (1). Dabei muß bedacht werden, daß nicht der ganze Effekt auf der Ettringitbildung beruht und daß, wie beim Vicat-Versuch, die Konsistenz zu beachten ist.

Weitere Abschätzverfahren sind im Untersuchungsstadium. Da bisher keine vollkommen sichere Labormethode zur Abschätzung der Frühfestigkeitsentwicklung vorhanden ist, bleibt nur der Wunsch nach einem Laborspritzgerät.

4. ANFORDERUNGEN AN DIE FRÜHFESTIGKEITS-ENTWICKLUNG DES SPRITZBETONS

Spritzbeton wird im Tunnelbau mit immer leistungsfähigeren Maschinen (z.B. Naßspritzen) immer schneller in dicken Schichten aufgetragen. Dabei soll das Eigengewicht des Betons getragen werden können sowie durch kraftschlüssige Verbindung mit dem Fels der Zusammenhalt der Felsoberfläche gesichert werden (Ausschluß von kleinsten Gebirgsbewegungen, Kerbwirkungen, Sicherung von Felsbrocken). Dies muß auch bei feuchten Felsoberflächen gelingen. Um die Anforderungen etwas zu präzisieren, wurde die Druckfestigkeitsentwicklung von Spritzbeton gemessen, der 15 cm stark über Kopf auf rauhem Untergrund im Trockenverfahren aufgetragen worden war. Dabei wurden nur BE-Mittel ohne Klebeeffekt und übliche Zementgehalte verwendet. Einige Spritzbetone fielen sofort bzw. bis zu 7 Minuten nach dem Auftrag herab, andere hielten an der Auftragsfläche. Die Festigkeitsentwicklungen dieser beiden Spritzbetongruppen wurden gegenübergestellt. Als Grenzwert wurde etwa eine Druckfestigkeit von $0,2 \text{ N/mm}^2$ 10 Minuten nach erfolgtem Auftrag festgestellt. Die Verwendung von gewissen Verflüssigern beim Naßspritzverfahren, von Klebern wie auch die Verwendung von Fasern setzen diese Werte herab. Eine direkte Messung der Haftfestigkeit (11) in so kurzen Zeitintervallen ist leider bei beschleunigten Mischungen schwer durchzuführen, hätte aber sicher größere Aussagekraft als die Messung über eine plastische Verformung mittels Penetrationsnadel.

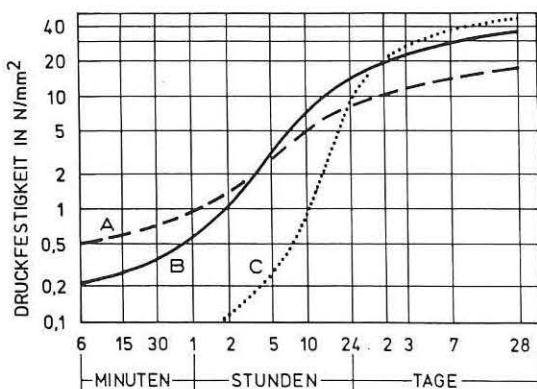


Abb.3. Festigkeitsentwicklung dreier Spritzbetone, die durch unterschiedliche Zusatzmittel beschleunigt wurden.

Relativ rasch nach erfolgtem Auftrag werden die Löcher für die Anker durch den Spritzbeton gebohrt. Bleibt der Bohrer dabei an einem Baustahlgitter hängen, besteht durch die Vibration die Gefahr einer örtlichen flächenhaften Ablösung des Spritzbetons in der Gitterebene. Diese Beanspruchung wird von Betonen, die etwa 1 N/mm^2 Druckfestigkeit erreicht haben, gut überstanden (1).

Eine äußerst komplexe dynamische Beanspruchung stellt der Sprengschlag dar. Es gibt keine Angaben über erforderliche Festigkeitswerte. Messungen können nur nach Schäden durchgeführt werden, um weitere Aufschlüsse zu erhalten. Die weiteren Festigkeitsanforderungen muß der Statiker festlegen.

5. DIE STEUERUNG DER FRÜHFESTIGKEIT DES SPRITZBETONS

Die Frühfestigkeiten des Spritzbetons werden durch die Beschleunigung der Zementhydratation mit Hilfe von Zusatzmitteln gesteuert. Je nach Temperatur, Spritzverfahren, Zement, Beschleuniger, Dosierhöhe und -art wird die Wirkung unterschiedlich sein. Anhaltspunkte für die zu wählende Zement/Beschleuniger-Kombination erhält man im Labor. Über eine Eignungsprüfung stimmt man den Beschleuniger dann genau ab. Dabei spritzt man Betone mit unterschiedlichem Gehalt an Zusatzmitteln (Abb. 3 und 4).

Prinzipiell steht einer Erhöhung der Frühfestigkeit immer ein Verlust an Endfestigkeit gegenüber. Ein Beschleuniger, der keine Festigkeitseinbußen zu späteren Zeitpunkten bewirkt, ist noch nicht erhältlich. Durch gute Abstimmung des Beschleunigers auf den Zement ist es möglich, den Verlust an Endfestigkeit bei ausreichender Beschleunigung in Grenzen zu halten. Beim Naßspritzverfahren ist die Beschleunigungswirkung wegen des schon reagierenden Zementes und der schlechteren Durchmischung etwas schwieriger, weshalb zur Zeit hauptsächlich Mittel mit zusätzlichem Klebeeffekt eingesetzt werden. Gute Beschleuniger kippen in der Beschleunigungswirkung bei Überdosierung nicht sofort um, die schlechten Auswirkungen auf den Verbrauch, die Endfestigkeit sowie den Rückprall sind aber sofort zu bemerken. Deshalb ist es wichtig, bei der Eignungsprüfung die Dosierung unter Praxisbedingungen so einzustellen

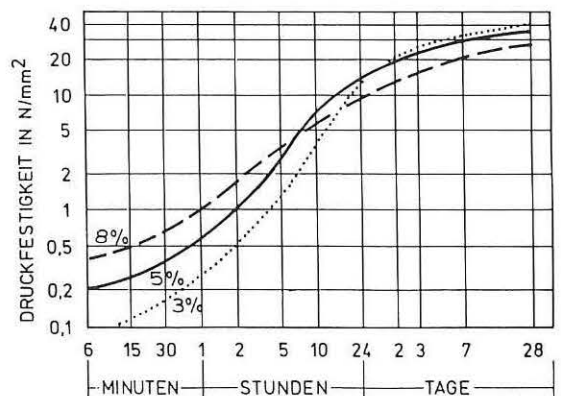


Abb.4. Festigkeitsentwicklung dreier Spritzbetone, die durch unterschiedlich hohe Dosierung eines Zusatzmittels (Typ B aus Abb.3) beschleunigt wurden.

len, daß die Anforderungen an die Frühfestigkeitsentwicklung eingehalten, nicht jedoch zu weit überschritten werden. Eine gewisse Sicherheit wegen des Auftretens von Temperaturunterschieden, Standzeiten des Mischgutes und schwieriger Bedingungen an der Auftragsfläche (Wasserandrang) ist einzuplanen.

LITERATUR

1. Kusterle, W.: Optimierung der Komponenten für Spritzbeton. Universität Innsbruck, Dissertation 1983.
2. Malhotra, V.M.: Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods. ACI Monograph No.9, Detroit 1976.
3. Malhotra, V.M., und Carette, G.C.: In Situ Testing for Concrete Strength. Progress in Concrete Technology, CANMET, Ottawa 1980, S.749-796.
4. Tassios, T., und Demiris, C.A.: A New Nondestructive Method for Concrete's Strength Determination. In: Publications from the National Technical University, No.21, Athen 1974.
5. Kaindl-Meyco-Meßgerät: Für die rasche Ermittlung der Frühfestigkeit von Spritzbeton. Firmenprospekt Intradym AG, Winterthur 1983.
6. Sällström, S.: Hallfasthetstillväxten hos sprutbetong med accelererande tillsatsmedel. IVA-Rapport No.4, Stockholm 1968, S. 143-158; Bergmekanisk diskussionsmöte, 9.2.1968, Stockholm.
7. Kusterle, W.: Ein kombiniertes Verfahren zur Beurteilung der Frühfestigkeit von Spritzbeton. Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984), S. 251-253.
8. Byfors, I.: Verfahren zur Ermittlung der Frühfestigkeit von Bauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984), S. 247-251.
9. Roth, H., und Fleischmann, A.: Neue Verfahren zur Prüfung von Spritzbetonhilfen. Heft 248, Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Wien 1984.
10. Lukas, W., und Huber, H.: Sulfatbeständiger Spritzbeton für Straßentunnelauskleidungen. Heft 192, Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Wien 1982.
11. Lutsch, H.: Neue Erkenntnisse zum Auftragen des Spritzbetons. Universität Innsbruck: Dissertation 1977.