
Rückprall- und Staubminderung bei modifiziertem Trockenspritzverfahren

REDUCTION OF REBOUND AND DUST FORMATION WITH MODIFIED DRY-MIX SHOTCRETING METHODS

WALTER LUKAS, INSTITUT FÜR BAUSTOFFLEHRE UND MATERIALPRÜFUNG DER UNIVERSITÄT INNSBRUCK

Beim modifizierten Trockenspritzverfahren wird ein erstarrungszeitgeregeltes Spritzbindemittel mit naturfeuchten Zuschlägen knapp vor der Spritzmaschine durch eine geeignete Einrichtung vermischt und anschließend verspritzt. Die Arbeitsbedingungen für den Düsenführer werden dabei entscheidend verbessert.

Um den Rückprall- und Staubanfall nochmals zu verringern stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Abstimmung der Maschineneinrichtung und der Bereitstellungsgemische
- Einstellung des Erstarrungsverhaltens, so daß der aufgespritzte Beton optimal eingebettet werden kann
- Verbesserung der Benetzung durch spezielle Düsenteknik; sicherlich eine der wirkungsvollsten Maßnahmen, die leider bisher zu wenig verfolgt wurde
- Verwendung von Zumahlstoffen oder Zusatzmitteln, die eine klebrige Konsistenz bewirken

In the case of the modified dry-mix shotcreting method, regulated-set special cement for shotcreting is mixed with natural moist aggregates in a suitable mixing plant just before the shotcreting machine and subsequently projected into place. This method noticeably improves the working conditions for the nozzleman.

In order to further reduce rebound and dust formation, the following measures can be taken:

- *fine-tuning of the equipment and the dry mix*
- *adjustment of the initial setting process so that the sprayed concrete can be optimally embedded*
- *better wetting by means of special nozzle technology, certainly one of the most effective measures, which unfortunately has been neglected so far*
- *additives enhancing stickiness*

1. Einleitung

In letzter Zeit werden verschiedene Modifikationen des Trockenspritzverfahrens, die sich erheblich von den herkömmlichen Verfahren unterscheiden, eingesetzt. Neben der Lösung von technologischen Problemen versucht man, einer Reihe von ökologischen Anforderungen gerecht zu werden. Besonders die Rückprall- und Staubminderung sind hier in den Vordergrund getreten. Um auf diesem Gebiet optimale Ergebnisse zu erzielen, müssen die bereits vorhandenen Lösungsansätze der Materialzusammensetzung und Auftragstechnik verbessert werden.

Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, den derzeitigen Entwicklungsstand der Bemühungen zur Reduktion der Rückprall- und Staubentwicklung im Trockenspritzverfahren, insbesondere für das modifizierte Trockenspritzverfahren (Spezialzemente ohne Erstarrungsbeschleuniger), zu analysieren und Möglichkeiten der Verbesserung aufzuzeigen.

Mit dem Wegfall von alkalihaltigen Erstarrungsbeschleunigern durch Verwendung von Spritzbindemittel (Spritzzementen) auf der einen Seite und Verwendung von alkalifreien Beschleunigern auf der anderen Seite bei der konventionellen Spritzbetontechnologie wurde bereits eine Verbesse-

nung erzielt und somit der erste Schritt in Richtung "umweltneutrale Spritzbetonherstellung" getan. Dadurch kann durch Zugabe von Additiven eine Reduzierung des Rückpralls sowie durch Einsatz von Vorbenetzungsdüsen und -techniken in Verbindung mit geeigneten Verfahren eine Staubreduzierung erreicht werden.

2. Größe und Ursachen der Rückprallentwicklung

In der Literatur wird dem Problem "Rückprall" wenig Beachtung geschenkt. Die wenigen Daten, die hier angeführt sind, ergeben unterschiedliche Aussagen (Differenzen oft um 100 %). In den meisten Fällen werden die Versuchsbedingungen und die Vorgangsweise für die Rückprallermittlung nicht angegeben. Grundsätzlich wird aber die in **Bild 1** dargestellte Situation für Überkopf-Spritzarbeiten angetroffen. Beim Naßspritzverfahren werden Werte zwischen 12 - 22 % (stellenweise aber auch über 30 %) angegeben; eigene Rückprall-Untersuchungen im Naßspritzverfahren ergaben Werte zwischen 15 und 28 %. Beim Trockenspritzverfahren nach konventioneller Technologie (feuchte Zuschläge mit normalem Zement und Erstarrungsbeschleuniger) liegen zur Zeit deutlich höhere Mittelwerte (zwischen 25 und 35 %) vor. Aus eigenen Beobachtungen wissen wir, daß die Rückprallwerte bei der konventionellen Technik in der Praxis oft höher liegen. Durch entsprechende Vorbenetzungsmaßnahmen kann neben der deutlichen Reduktion von Staub auch der Rückprall geringfügig reduziert werden. In Vergleichsversuchen wurden geringfügige Reduzierungen von 5 - 8 % erreicht, sodaß bei Praxisversuchen Rückprallwerte zwischen 22 und 28 % zu erzielen sind, die somit näher jenen der Naßspritztechnologie liegen.

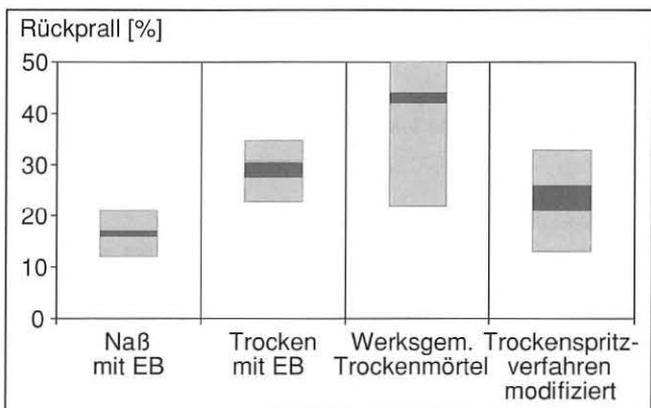


Bild 1: Rückprallentwicklung bei Überkopf-Spritzarbeiten

Die zur Zeit am Markt erhältlichen Werksgemischten Trockenprodukte mit SBM 1*) weisen noch sehr hohe Rückprallwerte (Durchschnittswerte zwischen 45 % und 55 %) auf. Auch die Staubentwicklung fällt bei diesen Produkten im Vergleich zu anderen Technologien im Trockenspritzverfahren (feuchte Zuschläge mit Normalzement mit EB bzw. Spritzbindemittel ohne EB) relativ hoch aus. Aus der Praxis

*) SBM 1 + 2: Spritzbindemittel nach Österreichischer Spritzbetonrichtlinie
 SBM 1: erfahrungsgemäß nur mit trockenem Zuschlag verarbeitbar;
 SBM 2: mit trockenem und feuchtem Zuschlag verarbeitbar

ist eine zusätzliche Abhängigkeit des Rückpralls von der Ausgangstemperatur des verarbeiteten, Werksgemischten Trockenspritzgutes bekannt (**Bild 2**). Die neuen Verfahren - insbesondere jene, die feuchte Zuschläge mit Spritzzementen verarbeiten (Spritzzemente SBM 2¹) - zeigen im Vergleich zu den anderen Trockenspritzverfahren (konventionell bzw. werksgemischte Produkte) deutlich niedrigere Rückprallwerte (22 - 26 %). Im Vergleich zu Werksgemischten Trockenmörteln wird die Staubentwicklung bei dieser Verfahrenstechnik deutlich gesenkt; beim Naßspritzverfahren liegen die Werte aber immer noch tiefer.

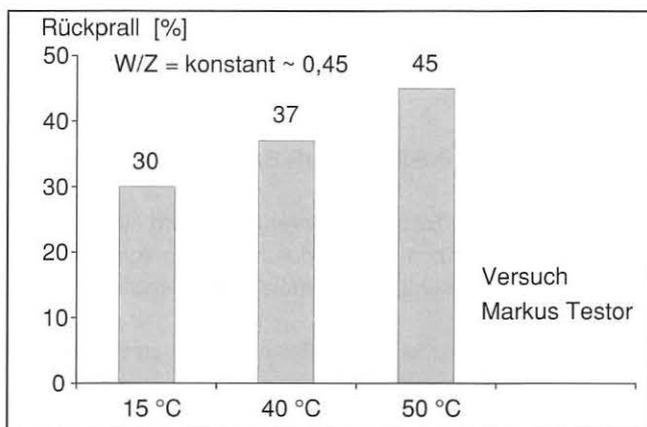


Bild 2: Abhängigkeit des Rückpralles von der Ausgangstemperatur - SBM 1 Werksgemischtes Trockenmischgut

Aufgrund verschiedener Beobachtungen der Frühfestigkeitsentwicklung und der Rückprallbeeinflussung in der Praxis kann folgender grundsätzliche Zusammenhang skizziert werden (**Bild 3**):

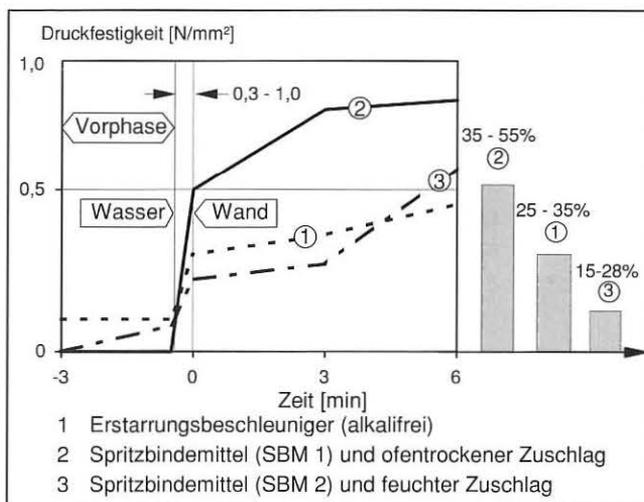


Bild 3: Schematische Darstellung; Zusammenhang Rückprall - Frühfestigkeit

Konventionelle Verfahren (Kurve 1) zeigen infolge der Vermischung des Zementes mit den feuchten Zuschlägen in der Vorphase (Zeit vor Wasserzugabe) eine Vorreaktion (geringe bis stärkere „Festigkeitsentwicklung“), welche von der Lagerungszeit abhängig ist. Nach der Zugabe des Wasser

ser- und EB-Mittelanteiles beschleunigt sich die Reaktion und zeigt unmittelbar nach dem Auftrag eine mäßige Festigkeitsentwicklung, welche sich durch die Zusammensetzung des Zementes und EB-Mittels ergibt. Das Werksgemischte Trockenmischgut dagegen zeigt beim Auftragen nach Zugabe des Wasseranteils sofort an der Wand eine sehr hohe Frühfestigkeitsentwicklung (siehe Kurve 2), die in eine moderate Form übergeht. Bei Verwendung von abgestimmten Spritzzementen (Spritzbindemittel - insbesondere SBM 2) entsteht vor dem Auftragen (Mischvorgang) durch die feuchten Zuschläge kein Vorhydratationseffekt, somit kommt es auch zu keinen negativen Auswirkungen. Erst bei Zugabe des Wassergehaltes an der Düse ergibt sich - abhängig vom Erstarrungs- bzw. Erhärtungsverhalten des Zementes - eine mehr oder weniger starke Ausbildung der Frühfestigkeitsentwicklung, welche wiederum die Rückprallentwicklung beeinflußt. Je langsamer sich die Frühfestigkeit unmittelbar nach dem Auftragen entwickelt, desto günstiger wird die Rückprallentwicklung beeinflußt. Die spezielle Zusammensetzung der Spritzzemente ergibt kurzfristig einen relativ geringen Anstieg, unmittelbar nach Auftrag (Kurve 3) - etwa nach 2 - 5 Minuten - wird ein sehr starker Anstieg der frühen Festigkeitsentwicklung erreicht. Dadurch ist ein sicheres Auftragen größerer Schichtdicken möglich. Systeme, wie diese Spritzzemente mit geringer Vorhydratation, weisen in der Praxis geringen Rückprall auf; daraus lassen sich für die Rückprallreduzierung folgende Anforderungen darlegen:

- Einstellung des Erhärtungsverlaufes in sehr frühen Zeiten (unmittelbar nach dem Auftrag bis zum nächsten Schichtauftrag) auf ein weiches, gering ansteifendes System, das zur Möglichkeit größerer Schichtstärken kurz nach dem Auftragen eine sehr rasche Festigkeitsentwicklung aufweisen soll.
- Einsatz von Verfahrenstechniken sowie von gezielten Arbeitsabläufen, die dem speziellen Verhalten der Spritzzemente Rechnung tragen und auf diese abgestimmt sein sollten (kleiner Flächenaufträge und kürzere Wartezeiten beim Auftrag einzelner Schichtstärken).

Grundsätzlich lassen sich zwei Techniken zur Erreichung eines möglichst weichen Spritzuntergrundes anwenden:

- Erhöhung des W/Z-Wertes zur Erzeugung einer weichen Konsistenz am aufgetragenen Spritzbeton. Diese technologische Maßnahme läßt sich insofern vertreten, da normalerweise bei Trockenspritzbetonen W/Z-Werte von 0,4 eingestellt werden. Darüber hinaus stellt sich bei der Verwendung von Spritzzementen eine überdurchschnittlich hohe Festigkeitsentwicklung ein. Allerdings zeigen sich bei aufgetragenen Spritzbetonen (z. B. 0/8 und 380 kg/m³ Bindemittel) ab einem W/Z-Wert von etwa 0,50 - 0,52 Absackungsneigungen, die für die Praxis ungeeignet sind.
- Zugabe von Substanzen, welche die "Klebrigkeit" des Spritzbetons verbessern und eine Rückprallreduzierung bewirken; zur Zeit weisen jedoch die am Markt vorhandenen Produkten starke Festigkeitsabfälle auf oder die angebotenen Produkte sind im Preis zu hoch.
- Zugabe von Substanzen, bei denen ein höherer W/Z-Wert verwendet werden kann, ohne daß Absackungen auftreten.

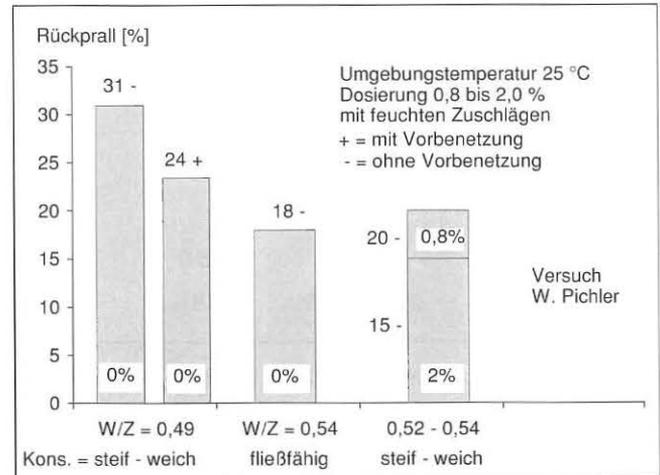


Bild 4: Auswirkung eines Rückprallminderers bei Verwendung von Spritzzement (Type SBM 2) und feuchten Zuschlägen mit Rückprallminderern im Laborprüfstand mit und ohne Vorbenetzung

In Bild 4 ist der Konsistenzeinfluß auf die Rückprallentwicklung dargestellt. Bei dem unter Praxisbedingungen durchgeführten Versuch (SBM 2-Zement mit feuchtem Zuschlag ohne Erstarrungsbeschleuniger) ergibt sich ein Rückprall von 31 %. Der Wassergehalt wurde so gewählt, daß sofort nach dem Auftragen an der Wand (8 - 10 cm) eine relativ weiche Konsistenz vorlag (entspricht einem rückgerechneten W/Z-Wert inklusive der Eigenfeuchte der Zuschläge von 0,49). Bei Erhöhung des Wassergehaltes auf einen W/Z-Wert von 0,54 ergab sich unter sonst gleichen Verarbeitungsbedingungen ein Rückprall von nur 18 %. Allerdings wies der aufgetragene Spritzbeton eine sehr weiche Konsistenz auf und konnte daher nicht in größeren Schichten aufgetragen werden. Die Zugabe eines Additives auf mineralischer, anorganischer Basis (kein Klebeffekt) erlaubt einen relativ hohen W/Z-Wert (ab 0,50 bis 0,54). Trotz eines hohen W/Z-Wertes wurde durch diese Zugabe ein Absacken des aufgetragenen Spritzbetons in größeren Schichtstärken verhindert. Eine Abhängigkeit von der Dosierung war bei diesen Versuchen in gewissem Maße gegeben; bei 2 % ergab sich ein Rückprall von ca. 15 %, bei 0,8 % ein Rückprall von etwa 20 %. In Praxisversuchen wurden diese positiven Effekte nur teilweise bestätigt.

In weiteren Versuchen, die in Bild 5 (Produkt A) und Bild 6 (Produkt B) dargestellt werden, sind verschiedene Firmenprodukte auf anorganischer Basis mit teilweise organischen Zusätzen hinsichtlich der Rückprallminderung geprüft worden. Ein Spritzbeton mit Normalzement (PZ 275 F) mit Erstarrungsbeschleuniger wurde einem mit SBM 2 ohne Erstarrungsbeschleuniger gegenübergestellt. In beiden Fällen wurden feuchte Zuschläge verwendet, wobei für den Normalzement eine Vorhydratation von etwa 45 Min. vorgesehen wurde. Beide Mittel (A + B) zeigten mit zunehmender Dosierung bei Normalzement eine Abnahme des Rückpralls; bei Mittel B schlug der Effekt bei zu hoher Dosierung um. Bei den Versuchen wurde mit gleichen rheologischen Eigenschaften nach dem Auftragen gearbeitet. Für beide Produkte war es notwendig, den jeweiligen Wasseranteil mit

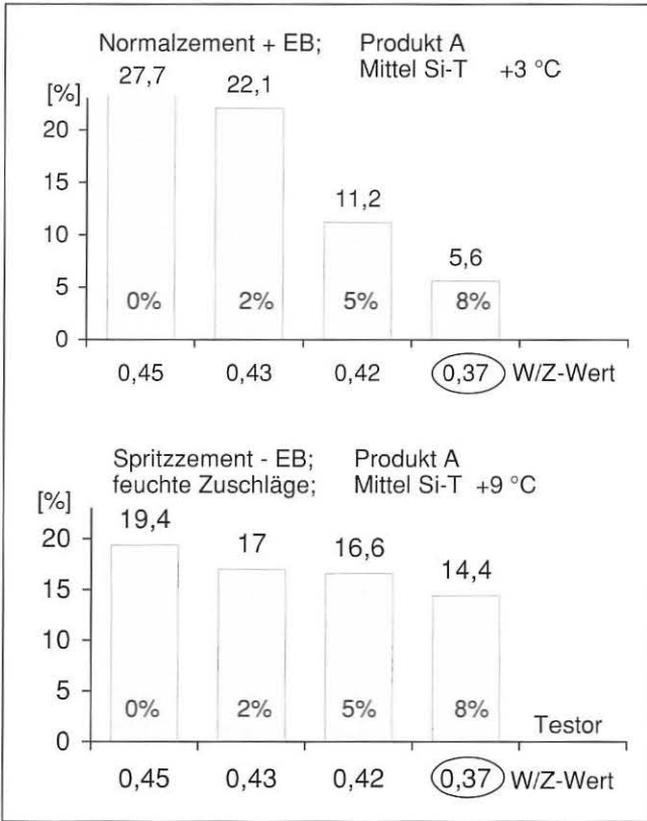


Bild 5: Rückprallverhalten bei Normal- und Spritzzementen mit und ohne EB-Mittel

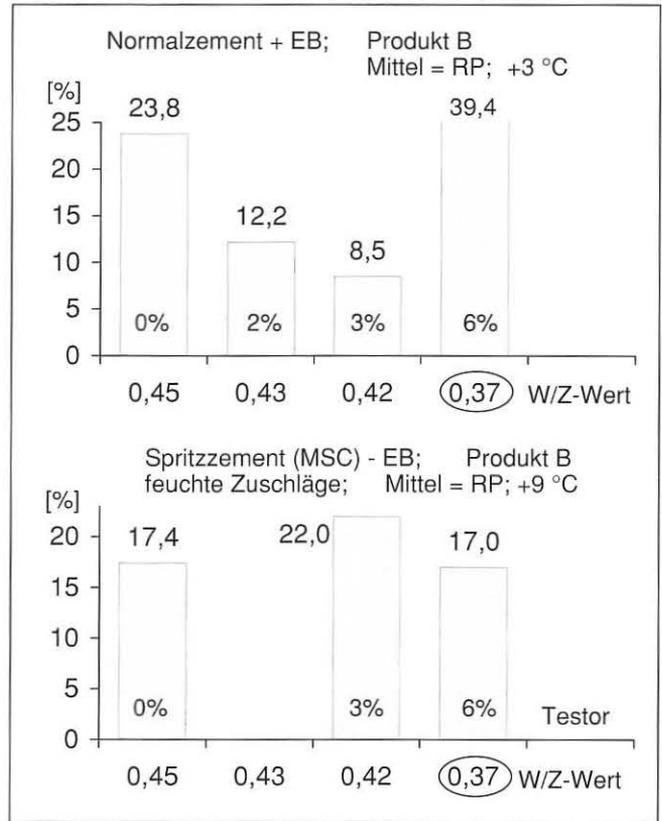


Bild 6: Rückprallverhalten bei Normal- und Spritzzementen mit und ohne EB-Mittel

zunehmender Erhöhung des Additivanteiles zu reduzieren. Bei den Versuchen mit SBM 2 ergab sich unter den gleichen Verarbeitungs- und Auftragsbedingungen keine wesentliche Rückprallveränderung.

Hinsichtlich der Reduzierung der Staubentwicklung laufen zur Zeit einige Verbesserungsversuche. Ziel all dieser Maßnahmen ist es, das wenig feuchte bzw. trockene Zement/ Zuschlaggemisch noch vor dem Düsenaustritt intensiv mit Wasser zu vermischen. Dabei werden neben den bewährten Methoden bei den konventionellen Auftragstechnologien verschiedene Neuentwicklungen angeboten. Eine exakte Beurteilung der Verfahrenstechniken ist zur Zeit noch nicht möglich, da diese erst seit kurzem am Markt angeboten werden. Ebenso ist die exakte Bewertung in der Praxis sehr schwierig vorzunehmen. Die hier angewendete Methode basiert auf der relativen Staubermittlung. Dazu ist es notwendig, Meßpunkte an vergleichbaren Positionen anzuordnen. Weiters muß berücksichtigt werden, daß Einflüsse aus dem Tunnelprofil und der Belüftung große Auswirkungen haben können. Da solche Bedingungen (z.B. konstante Lüftung) in der Praxis nur sehr selten gegeben sind, hat man versucht, immer an der gleichen Meßstelle zu arbeiten.

Grundsätzlich läßt sich aber die in Bild 7 dargestellte Verbesserung ableiten. Hier wurde in einem Versuchstunnel unter konstanten Bedingungen Werksgemischtes Trockengemisch mit einem W/Z-Wert von 0,48 und einer Temperatur von 20° C aufgetragen. Als Spritzmaschine kam eine konventionelle Trockenspritzmaschine zum Einsatz. Beim Nullversuch wurde unter definierten Meßbedingungen an einer bestimmten Meßposition ein Wert von 4,5 (relative In-

tensität) erreicht. Bei Verwendung von speziell entwickelten neuen Vorbenetzungsdüsen läßt sich die Staubentwicklung merklich reduzieren und zeigt, daß bei diesen Versuchen ein Wert zwischen 1,0 und 1,5 (relative Intensität) erreicht werden kann. Gleichzeitig mit der Staubreduzierung tritt auch eine geringe aber merkbare Reduzierung des Rückpralls durch die Vorbenetzung auf.

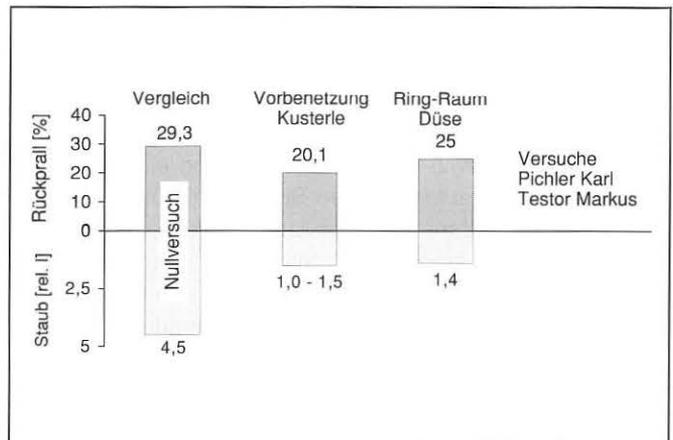


Bild 7: Einfluß verschiedener Düsen auf Rückprall und Staubentwicklung

3. Zusammenfassung

Bei der Analyse der Rückprallentwicklung zeigt sich, daß die Entwicklung der Frühfestigkeit einen wesentlichen Einfluß

hat. Die Frühfestigkeitsentwicklung Neuer Spritzbindemittel (Typ SBM 1 und SBM 2) ist teilweise schon an diese Anforderungen angepaßt; weitere Verbesserungen sind jedoch notwendig. Zusatzstoffe und Zumahlstoffe bewirken eine wesentliche Verbesserung der Konsistenz und eine Erhöhung des W/Z-Wertes (0,45 - 0,52) des aufgetragenen Spritzbetons, ohne daß ein Absacken auftritt. Die zeitlich begrenzte weiche Konsistenz wirkt sich immer positiv auf die Rückprallentwicklung aus.

Zielführend wäre eine Abstimmung zwischen der geringen Frühfestigkeitsentwicklung zu sehr frühen Zeiten (5 - 10 Minuten) beim Auftrag von mehreren Einzelschichten und der Entwicklung der Früh- und Endfestigkeiten zu späteren Zeiten (ca. ab 3 - 5 Std.). Auch die Abwicklung der Auftragsarbeit hat einen wesentlichen Einfluß.

Die Staubentwicklung kann durch entsprechende Vorbenetzungsmaßnahmen reduziert werden. Die zur Zeit angebotenen Verfahrenstechniken sind jedoch noch nicht ausgereift und müssen verbessert werden.

4. Literaturverzeichnis

- [1] **Bauer, G.:**
Materialtechnologische Bewertung neuentwickelter Trockenspritzverfahren. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 1995.
- [2] **Pichler, K.:**
Die Auswirkung verschiedener Benetzungssysteme beim Trockenspritzverfahren aus die technologischen Werte des Spritzbetons. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 1995.
- [3] **Pichler, W.:**
Umweltneutraler Spritzbeton im Trockenspritzverfahren für die NÖT - Alkalifreie Erstarrungsbeschleunigung, Entwicklung und Technologie, Dissertation, Universität Innsbruck, 1995.
- [4] **Eichler, K.:**
Rückprallrecycling und Rückprallreduzierung von Spritzbeton beim Trockenspritzverfahren, Dissertation, Universität Innsbruck, 1996.

