

Grundlagen für die Nutzwertanalyse für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton

Rainer Schach¹, Manuel Hentschel²

Zusammenfassung: Im Rahmen des Transferprojektes sollen baubetriebliche Rahmenbedingungen und Kennwerte, die zur Beurteilung der wirtschaftlichen Anwendung des Verfahrens geeignet sind, erarbeitet werden. Untersucht werden soll die Applikation von textilbewehrtem Beton im Bereich der Sanierung und Verstärkung von großflächigen Betonbauteilen. Generell können Bauaufgaben in sehr vielen Fällen durch verschiedene Bauverfahren realisiert werden, die sich regelmäßig hinsichtlich der Kosten, der benötigten Bauzeit aber auch hinsichtlich der gelieferten Qualität und des Einflusses auf die Umwelt unterscheiden. Aus baubetrieblicher Sicht wird traditionell über den kalkulatorischen Verfahrensvergleich jenes Verfahren ermittelt, mit dem die Realisierung am wirtschaftlichsten ausgeführt werden kann. Falls qualitative Kriterien beim Verfahrensvergleich mit berücksichtigt werden sollen, stehen verschiedene Methoden zur Auswahl. Der Begriff Nutzwertanalyse wird häufig als Synonym für diese nichtmonetären Bewertungsverfahren verwendet. In diesem Sinne ist auch der Titel des Beitrages zu verstehen. Die Grundlage bilden die baubetrieblichen Rahmenbedingungen, welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes bestimmt werden. Hierzu zählen unter anderem die Entwicklung einer Trockenmischung des zu verwendenden Betons aus der bisher verwendeten Standardrezeptur der TU Dresden und geeigneter Maschinen für die Applikation des textilbewehrten Betons.

Summary: The aim of this transfer project is to identify general conditions and to develop suitable criteria within the framework of construction management which allow to assess the economic efficiency of procedures. The main issue of the project is to investigate the application of textile reinforced concrete in the field of rehabilitation and strengthening of large concrete elements. In general, there are very various methods to realize construction tasks. These methods will

¹ Prof. Dr.-Ing., Institut für Baubetriebswesen, TU Dresden

² Dipl.-Ing., Institut für Baubetriebswesen, TU Dresden

usually differ with respect to costs, required construction period but also in terms of delivered quality and impact on the environment. The construction management uses traditionally a calculative comparison to determine the preferred technology which allows the most economic realization of the investigated construction task. If this calculative comparison of potential construction technologies should also take into account quality criteria, several extended methods can be applied. The term value benefit analysis is often used as a synonym for these non-monetary assessment methods. The title of this article should be interpreted in this sense. The value benefit analysis is based on construction conditions, which will also be defined in the context of this research project. These conditions include for example the development of a dry mixture of the concrete based on the standard formulation of the TU Dresden and the determination of the most appropriate machinery for the application of textile reinforced concrete.

1 Ausgangssituation und Annahmen

Bisherige Untersuchungen zu Bauteilverstärkungen durch textilbewehrten Beton erfolgten im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 ausschließlich an kleinformatischen Elementen unter konstanten Laborbedingungen. Bauteile mit baustellentypischen Dimensionen sowie in der Praxis auftretende wechselnde Einflüsse konnten und sollten dabei nicht berücksichtigt werden. Dies gilt für Verfahren, Materialien (z. B. Feinbeton), Geräte sowie klimatische Bedingungen. Falls der Feinbeton mit Spritzgeräten aufgebracht wird, ist zum Beispiel bekannt, dass hohe Spritzdrücke zu Schädigungen der eingelegten Glas- oder Carbonfasern und damit zu Festigkeitsverlusten führen können. Hohe Spritzdrücke können auch die Lage (Position und Ebenheit) der textilen Bewehrung negativ beeinflussen [6]. Andererseits ist bekannt, dass hohe Spritzdrücke zu einer guten Verdichtung und damit zu einem guten Verbund zwischen dem Feinbeton und dem Untergrund führen. Bisherige Erkenntnisse über den Einsatz von Spritzbetonpumpen, wie diese zum Beispiel bei der Verstärkung oder Sanierung von Betonbauteilen verwendet werden, zeigen, dass diese Geräte für textilbewehrten Beton eher nicht geeignet sind. Erfahrungen mit der Applikation von textilbewehrten Beton auf größeren Flächen wurden bei der Sanierung einer Hyparschale an der Fachhochschule in Schweinfurt [3], beim Bau einer Brücke in Oschatz [2] sowie bei der Sanierung einer Kuppel und eines Gewölbes des Finanzamtes Zwickau gesammelt.

Aufgabe des Teilprojektes T 6 innerhalb des Sonderforschungsbereiches 528 ist, Methoden, Geräte und Parameter zu bestimmen, die die Grundlage für den erfolgreichen Transfer der bisherigen Erkenntnisse in die Praxis bilden. Hierzu sollen zahlreiche Großversuche sowohl an Platten über Kopf als auch an Wand- und Bodenplatten durchgeführt werden.

2 Projektbeschreibung

2.1 Allgemeine Ziele

Im Rahmen des Transferprojektes sollen baubetriebliche Rahmenbedingungen und Kennwerte, die zur Beurteilung der wirtschaftlichen Anwendung des Verfahrens geeignet sind, erarbeitet werden. Untersucht werden soll die Applikation von textilbewehrtem Beton im Bereich der Sanierung und Verstärkung von großflächigen Betonbauteilen. Dabei spielen die Erkenntnisse zu geeigneten Maschinen zum Mischen des Betons, zum Aufbringen des Frischbetons einschließlich der Wahl geeigneter Spritzdüsen ebenso eine Rolle, wie Erkenntnisse zum Einsatz des Personals und zur Strukturierung der Arbeitskolonne, welche die Applikation des textilbewehrten Betons vornehmen soll. Ziel des Forschungsprojektes ist es, alle notwendigen Arbeitsschritte zu bestimmen und zu beschreiben, zu simulieren und deren Kosten durch geeignete Kennwerte nachzuweisen. Es werden damit Erfahrungen gesammelt, die in Form von Schulungen und Handlungsanweisungen an später ausführende Unternehmen übertragen werden können. Weitere wichtige Schwerpunkte sind Untersuchungen zur Qualitätssicherung, zum Umweltschutz und zu Sicherheit und Gesundheitsschutz beim Umgang mit dem neuen Bauverfahren.

2.2 Projektbeteiligte

Das Wesen eines Transferprojektes besteht darin, dass Unternehmen Know-How zur Verfügung stellen und damit einen substantiellen Beitrag zum Forschungsziel geben können. Als Kooperationspartner konnten folgende Unternehmen gewonnen werden:

- Bilfinger Berger AG wird unter anderem gewerbliches Fachpersonal und Geräte zur Verfügung stellen.
- Putzmeister AG wird die notwendige Applikationstechnik und das Know-How zum Mischen, Spritzen und Auftragen des Frischbetons bereitstellen.
- Pagel Spezialbetone GmbH & Co. KG (PAGEL) wird maßgeblich die Entwicklung und Lieferung einer geeigneten Trockenmischung unterstützen.

Seitens der TU Dresden zeichnen das Institut für Baubetriebswesen sowie das Institut für Massivbau verantwortlich, die beide der Fakultät Bauingenieurwesen angehören. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den anderen Projektnehmern der Sonderforschungsbereiche 528 und 530 ist selbstverständlich und wird regelmäßig praktiziert. Herauszuheben ist die Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustofflehre der Fakultät Bauingenieurwesen und dem ebenfalls zur Fakultät gehörenden Otto-Mohr-Laboratorium (OML).

3 Methodische Ansätze zur Bewertung von Bauverfahren

Bauaufgaben können in sehr vielen Fällen durch verschiedene Bauverfahren realisiert werden, die sich regelmäßig hinsichtlich der Kosten, der benötigten Bauzeit, aber auch hinsichtlich der gelieferten Qualität und des Einflusses auf die Umwelt unterscheiden. Aus baubetrieblicher Sicht wird traditionell über den kalkulatorischen Verfahrensvergleich jenes Verfahren ermittelt, mit dem die Realisierung am wirtschaftlichsten ausgeführt werden kann [1].

Beim kalkulatorischen Verfahrensvergleich werden nur monetäre Kriterien bewertet, nicht jedoch weitere Kriterien, wie zum Beispiel Qualitätsziele, Einflüsse auf die Bauzeit, Einflüsse auf die Umwelt sowie Sicherheit und Gesundheitsschutz. Im Rahmen des Forschungsprojektes soll jedoch der textilbewehrte Beton nicht allein unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet werden. Die anderen Kriterien sind ebenfalls adäquat zu berücksichtigen.

Bei dem Transferprojekt soll daher über ein geeignetes multikriterielles Bewertungsverfahren die Verstärkung von Bauteilen mit textilbewehrtem Beton untersucht werden. Besonders in Frage kommen dabei die folgenden Methoden:

- Nutzen-Kosten-Analyse (NKA),
- Nutzwertanalyse (NWA) und
- Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA).

Nachfolgend soll das Wesen der genannten Verfahren kurz dargestellt werden. Auf weiterführende Literatur wird verwiesen [9].

3.1.1 Nutzen-Kosten-Analyse

Bei der Nutzen-Kosten-Analyse³ wird unterstellt, dass alle Kriterien als Nutzen oder Kosten bewertbar oder messbar und monetär quantifizierbar sind. Ihrer Natur entsprechend sind beispielsweise Investitionskosten, Betriebskosten, Personalkosten oder Materialkosten bereits monetär quantifiziert. Andere Kriterien, wie unter anderem Qualität, ökologische Auswirkungen, Sicherheit und Gesundheitsschutz sowie Risiken bei der Anwendung des Verfahrens, werden bei der Nutzen-Kosten-Analyse anhand von Äquivalenzkostenansätzen beschrieben und damit vergleichbar gemacht. Die Entscheidung, welche Alternative bevorzugt wird, erfolgt anhand des Quotienten aus den Nutz- und Kostenwerten [8].

³ Die Nutzen-Kosten-Analyse führt zu einem Nutzen-Kosten-Faktor, der den Nutzen im Verhältnis zu den Kosten ausdrückt. Eine Kosten-Nutzen-Analyse stellt ein vergleichbares Verfahren dar.

3.1.2 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse stellt ein multikriterielles und somit multidimensionales Bewertungsverfahren dar [10]. Auf eine Monetarisierung der Nutzen wird gänzlich verzichtet [8]. Es wird ein mehrdimensionales Zielsystem eingeführt. Die Kriterien werden entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers gewichtet [8]. Die zu bewertenden Alternativen werden in allen Kriterien zum Beispiel mit einer Punktzahl zwischen Null und Zehn bewertet. Der Nutzwert selbst ergibt sich aus der Summe der gewichteten Bewertungen. Der Begriff Nutzwertanalyse wird häufig als Synonym für nichtmonetäre Bewertungsverfahren verwendet. In diesem Sinne ist auch der Titel des Beitrages zu verstehen.

3.1.3 Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Bei der Kosten-Wirksamkeits-Analyse wird zwischen monetären Kriterien und nicht monetären Kriterien unterschieden. Die nicht monetären Kriterien werden im Sinne einer Nutzwertanalyse zu einer Wirksamkeit zusammengefasst, dieser Wirksamkeit werden die Kosten gegenüber gestellt [9]. Im Auswahlprozess wird dann ein Zielsystem definiert. Die Ergebnisfindung erfolgt hierbei entweder über einen so genannten Kosten-Wirksamkeits-Quotienten oder die Kosten und Wirksamkeiten werden in Form von Matrizen gegenübergestellt.

Welche Methodik bei einem konkreten Verfahrenvergleich schließlich zur Anwendung kommt, soll an dieser Stelle nicht weiter untersucht werden. Für alle Verfahren ist es jedoch notwendig, die verfahrenstechnischen Grundlagen festzulegen.

4 Verfahrenstechnische Grundlagen

Mit Beginn des Projektes zeigte sich, dass die verfahrenstechnischen Randbedingungen für die baupraktische Anwendung von textilbewehrtem Beton zur Verstärkung von Bauteilen in wesentlich größerem Maße offen waren, als dies anfangs angenommen wurde. Dies bezieht sich insbesondere auf

- die Herstellung des Feinbetons,
- die zu verwendenden Geräte sowie
- das Optimierungspotenzial der verfahrenstechnischen Parameter.

4.1 Herstellung des Feinbetons

Bei der Vielzahl der in den vergangenen Jahren durchgeführten labortechnischen Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 wurde für alle Versuche eine SFB-Referenz-Rezeptur aus CEM III als Standardrezeptur verwendet [4], [6]. Die Herstellung des Frischbetons erfolgte konventionell durch Abwiegen der Zuschlagstoffe und Mischen in einem Zwangsmischer.

Die Projektbeteiligten entschieden aufgrund der Erkenntnisse der bisher umgesetzten Praxisprojekte (Sanierung einer Hyparschale an der Fachhochschule in Schweinfurt [3], Bau einer Brücke in Oschatz [2], Sanierung einer Kuppel und eines Gewölbes des Finanzamtes Zwickau), dass diese Methode für den erfolgreichen praktischen Einsatz von textilbewehrten Beton weniger gut geeignet ist. Aus diesem Grunde wurde festgelegt, dass mit Vorversuchen getestet werden sollte, ob eine Trockenmischung auf Basis der Standardrezeptur entwickelt werden könnte. Hauptziel war dabei, eine Trockenmischung (lieferbar in vorkonfektionierter Sackware) zu entwickeln, die sich hinsichtlich der Eigenschaften des unter Wasserzugabe entstehenden Frischbetons und auch hinsichtlich des Festbetons nicht wesentlich von der Standardrezeptur unterscheidet. Als Anforderungen beim Frischbeton wurden in Anlehnung an die der bestehenden Standardrezeptur der TU Dresden zu Grunde liegenden Kriterien insbesondere definiert:

- Spritzfähigkeit,
- Verarbeitbarkeit,
- Formungseigenschaft beim Einlegen des Geleges,
- Standfestigkeit.

Für den Festbeton des textilbewehrten Betons wurden folgende Kriterien definiert:

- Festigkeit,
- Porosimetrie und
- Schwindmaße.

Es sollte auch untersucht werden, ob der bei der Standardrezeptur verwendete CEM III durch einen CEM I ersetzt werden könnte. Zunächst wurden neben der Standardrezeptur aus CEM III drei weitere Trockenmischungen hergestellt.

Um die Eignung der einzelnen Mischungen zu prüfen, wurden diese unter annähernd gleichen Bedingungen untersucht. Die Mischungen wurden unter Zugabe von Wasser einzeln in einem BEBA B6 Doppelwellenmischer mit Speisfass fünf Minuten gemischt. Zur Prüfung der Spritzfähigkeit kam anschließend eine PFT N2V Vario Förderpumpe⁴ mit einer PFT $\frac{3}{4}$ Förderschnecke⁵ und einer Kombination aus vier gekoppelten Förderschläuchen (drei

⁴ Hersteller: Putz- und Fördertechnik Knauf

⁵ Hersteller: Putz- und Fördertechnik Knauf; Der Einsatz erfolgte unter reduzierter Leistung.

Schlauchlängen mit je 13 m und einem Durchmesser von 35 mm sowie eine Schlauchlänge mit sechs Metern und 25 mm Durchmesser) zum Einsatz. Die gesamte Förderlänge betrug 45 Meter. Vor dem Anfordern wurden die Förderschläuche mit Zementschlämmen befüllt, die vor und nach dem jeweiligen Frischbeton gefördert wurden. Als Spritzdüse kam eine PAGEL-MAWO-Düse⁶ zum Einsatz. Der Frischbeton aus der jeweiligen Mischung wurde im PAGEL-Spritzstand dreilagig mit einem Druck von konstant 5 bar und mehr als 5 m³/Minute aufgespritzt. [7]

Die Ergebnisse dieses ersten Versuchszyklus zeigten, dass drei von vier der untersuchten Trockenmischungen als gebrauchstauglich eingestuft werden konnten. Die besten Spritzergebnisse ergaben sich an der der Standardrezeptur nachgestellten Mischung Versuchsprodukt (VP) 1, bei der allerdings der Zement CEM III/B durch einen Zement CEM I 42,5 R ersetzt wurde. Diese Mischung VP1 und die Mischung VP2 zeigten bei den Spritzapplikationen am Spritzstand die besten Formungseigenschaften hinsichtlich weicher Konsistenz und dem hier zweilagig zwischen den einzelnen Frischbetonlagen eingelegten Glasfasergewebe mit einer Maschenweite von ca. 5 mm. [7]

In einem zweiten Versuchszyklus wurden Prüfversuche durchgeführt, um die Festbetoneigenschaften der einzelnen Mischungen zu überprüfen. Insbesondere wurden hier Versuche zu der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit durchgeführt. Beide Mischungen zeigten hier gute Ergebnisse, die mit denen der Standardrezeptur der TU Dresden vergleichbar sind. Die Ergebnisse dieses zweiten Versuchszyklus zeigen jedoch zu denen im ersten Versuchszyklus gewisse Unterschiede, die nach Einschätzung der Beteiligten u. a. auf die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen während der Aushärtungsphase zurückzuführen sind. Die Probekörper im ersteren Fall wurden im Vergleich zu den zweiten Versuchen länger unter Wasser gelagert. Außerdem verwendete man im ersten Versuchszyklus einen Doppelwellenmischer, um eine ausreichende Durchmischung der Trockenmischung zu gewährleisten, während die Mischung im zweiten Versuchszyklus mit einem Einquirlgerät hergestellt wurde.

Im Rahmen des zweiten Versuchszykluses wurden in zwei verschiedenen Laboren A und B die Ausbreitmaße bestimmt. Die Ergebnisse sind den Bild 1 und Bild 2 zu entnehmen. Aus Bild 1 ist zu entnehmen, dass die gemessenen größten und kleinsten Werte der VP 1 weniger differieren als die der Standardrezeptur der TU Dresden. Aus Bild 2 ist dieser beschriebene Unterschied zwischen der Standardrezeptur und der VP 1 nicht erkennbar. Die Unterschiede konnten vorerst nicht weiter geklärt werden. Es wurde jedoch vermutet, dass diese auf die unterschiedlichen Mischverfahren zurückzuführen sind. Nach Einschätzung der Projektbeteiligten, wirkt sich ein hohes Ausbreitmaß kurze Zeit nach Wasserzugabe negativ im Spitzversuch aus, da die Standfestigkeit nicht sofort gegeben ist. Als vorteilhaft beurteilen die Forschungsteilnehmer das nur gering abnehmende Ausbreitmaß der Mischungen VP1 und VP2, da damit für die Spritzapplikation mehr Zeit in der Verarbeitbarkeit zur Verfügung steht. Diese Annahmen wurden bei weiteren Spritzversuchen bestätigt, wobei die Mischung

⁶ Es handelt sich hierbei um eine so genannte Mantelluftstromdüse. Vergleiche Abschnitt 5.2

VP1 auch hier bessere Ergebnisse zeigte. Im Ergebnis wurde festgelegt, dass die Trockenmischung VP1 für weitere Versuche verwendet werden soll.

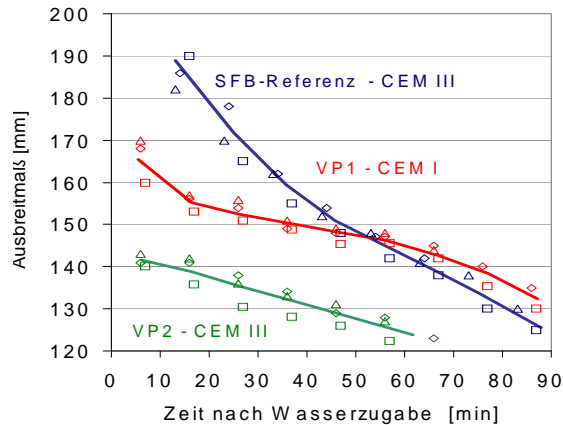


Bild 1: Ausbreitmaß der getesteten Trockenmischungen im Labor A

Fig 1: Slump of the tested dry mixtures in labor A

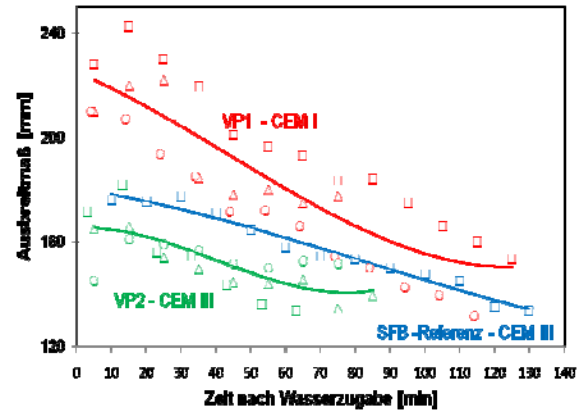


Bild 2: Ausbreitmaß der getesteten Trockenmischungen im Labor B

Fig 2: Slump of the tested dry mixtures in labor B

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die unterschiedlichen Spritzdüsen, Mischer und Pumpen unter Einsatz der beiden Trockenmischungen VP1 und VP2 getestet.

4.2 Geräte

Die Erfahrungen der beteiligten Praxispartner konnten für eine zielgerichtete Auswahl von geeigneten Geräten zur Spritzapplikation des textilbewehrten Betons genutzt werden. Aus der Vielzahl von verfügbaren Geräten wurden drei Geräte für spezielle Maschinentests ausgewählt. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Gerätekennwerte. Als Trockenmischungen wurden die VP1 und VP2 Mischung von PAGEL verwendet.

Tabelle 1: Bereitgestellte Maschinen mit Kennwerten**Table 1: Provided machines and characteristic data**

Maschinenkennwerte	Schneckenpumpe S5	Schneckenpumpe SP 11 Beliso	Strobot 406 S
Ausführung	Tellermischer	Hubmischer	Strobot 406 S
Schneckenpumpe	2L6	2L6	FH 40/EW 40
Fördermenge	7 - 40 l/ min	5 - 40 l/ min	0 - 15 l/ min
Förderdruck	25 bar	25 bar	30 bar
Förderweite	bis 60 m	120 m	bis 48 m
Förderhöhe	bis 40 m	60 m	bis 30 m
Antriebsmotor	5,5 kW, 400 V/ 50 Hz	15,7 kW, Dieselmotor	230- 250 V, 50 Hz
Mischantrieb	2,2 kW	-	2,2 kW
Trichtervolumen	100 l	180 l	70 l
Gewicht	400 kg	750 kg	65 kg

Zunächst wurden die jeweiligen Mischungen in dem Zwangsmischer der Schneckenpumpe S5 unter Zugabe einer vordefinierten Wassermenge drei Minuten lang gemischt. Die Trockenmischung wurde direkt als 25 kg Sackwaren geliefert und konnte damit bequem in den Zwangsmischer gefüllt werden. Vom Zwangsmischer gelangt das Frischbetongemisch bei der Schneckenpumpe S5 direkt in die Pumpe. Für die Tests an der Strobot 406 S musste der Frischbeton händisch in die Pumpe umgefüllt werden. Die Schneckenpumpe SP 11 Beliso wurde nicht getestet, da diese analoge Kennwerte aufzeigt, wie die SP 5. Der Unterschied zur SP 5 liegt bei der SP 11 im Antriebssystem, welches hier mit Diesel erfolgt.

Bei allen Tests wurde der Frischbeton direkt durch einen 40 m langen Förderschlauch gepumpt. Am Ende des Förderschlauches wurden drei verschiedene Düsenttechnologien eingesetzt. Zum Einsatz kamen hier eine konventionelle Putzerdüse des Unternehmens Putzmeister, die PAGEL-MAWO-Düse und die Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse.

Bei der Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse und der Putzerdüse wird die Spritzluft von einem extern angeschlossenen Kompressor (Putzmeister-Maschinenkompressor mit 8 bar Druck und ca. 300 l/min Luftmenge) ganz am Ende des austauschbaren Düsenkopfes in den Frischbeton eingeführt. Die Luft wird dabei am Düsenende in den Frischbeton eingeblasen. Dieses hat zum Vorteil, dass die Düse mit relativ wenig Treibgas auskommt. Nach dem Aufspritzen

auf die Spritzwand mit der Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse zeigte die Oberfläche eine sehr homogene und ebene Spritzstruktur (siehe Bild 3). Die Ergebnisse mit der einfachen Putzerdüse waren deutlich schlechter (siehe Bild 4).

Bei der PAGEL-MAWO-Düse wird die Kompressorluft direkt im Schaft der Spritzdüse in den Frischbeton eingeblasen. Dabei zeigte sich jedoch, dass die verfügbare Luftmenge des oben genannten Maschinenkompressors (300 l/min) für diese Spritztechnologie nicht ausreichend war. Es sind bei dieser Spritztechnologie eindeutig größere Luftmengen notwendig, um ein geeignetes Spritzbild an der Spritzwand zu erzeugen. Dieses wurde bei den Versuchen in Aichtal nicht weiter untersucht (siehe Bild 5).



Bild 3: Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse

Fig 3: Putzmeister-Strobl-air injector



Bild 4: Einfache Putzerdüse

Fig 4: simple fettle gun



Bild 5: PAGEL-MAWO-Düse

Fig 5: PAGEL-MAWO-injector

Bei den Versuchen konnten deswegen noch keine abschließenden Aussagen zur Porosität und zu den Haftzugeigenschaften des textillbewehrten Betons unter Einsatz dieser beiden Düsenttechnologien getroffen werden. Dieses wurde in anschließenden Laborversuchen durch PAGEL und das Institut für Baustofftechnik separat untersucht. Grundsätzlich werden als Referenzwerte die technischen Regeln zur Wasserhaltung gemäß dem „W300-Arbeitsblatt“ [3] verwendet. Mit beiden Spritzdüsen konnten die erforderlichen Grenzwerte des im W300-Arbeitsblatt vorgegeben Grenzwertes zur Porosität weder bei 1 bar noch bei 5 bar Luftdruck erreicht werden. Die Streuung zwischen den Ergebnissen bei unterschiedlichen Drücken war bei der PAGEL-MAWO-Düse stärker zu erkennen. Die Ergebnisse der Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse zeigten konstantere Werte. Außerdem zeigte die Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse auch bei geringer Luftmenge stabile Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Geräten werden in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst.

4.2.1 Pumpen

Die verwendete S5-Pumpe zeichnete sich durch eine große Bandbreite der möglichen Förderleistung aus. Die notwendige und zu empfehlende Fördermenge zum Auftrag von Frischbeton bei dem textilbewehrten Beton liegt jedoch nach Einschätzung der Beteiligten nur bei etwa 4 l/min bis 5 l/min. In dieser geringen Menge ist die S5 nicht mehr genau genug justierbar. Vorteilhaft ist, dass sie standardmäßig mit einem über der Schneckenpumpe angeordneten Zwangsmischer ausgestattet ist.

Die Strobl Förderpumpe wird vorrangig im Bereich Auftrag von Farben oder ähnlichen Materialien verwendet. Sie lässt sich ideal regeln und bringt sehr stabile Ergebnisse im Bereich 4 l/min bis 5 l/min Förderleistung.

Für weitere Versuche wird von der Firma Putzmeister AG empfohlen, dass die S5-Pumpe so umgebaut wird, dass die Fördermenge in dem Bereich fein eingestellt werden kann, der für die hier notwendigen kleinen Fördermengen besonders benötigt wird.

4.2.2 Mischer

Der Zwangsmischer auf der S5 erwies sich als Vorteil, wird aber von allen Forschungsprojektbeteiligten als kein Muss-Kriterium für die Auswahl der Spritzmaschine angesehen. Bei der Strobl-Förderpumpe, die nur ohne Mischer gebaut wird, wird ein separater Mischer benötigt. Prozesstechnisch wird ein separater Mischer als nachteilig angesehen.

4.2.3 Spritzdüsen

Die Spritzergebnisse mit der Putzerdüse wurden als zu schlecht bewertet. Die Ergebnisse mit der Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse sind sehr gut. Der Beton zeigt eine sehr geschlossene und homogene Struktur und Standfestigkeit. Die Ergebnisse mit der PAGEL-MAWO-Düse sind ähnlich gut wie bei der Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse. Kleine Abstriche gibt es hier, da ein höherer Druckluftbedarf notwendig ist. Bei den durchgeführten Versuchen war die anliegende Druckluft nicht ausreichend. Beim Einsatz der PAGEL-MAWO-Düse zeigte sich eine höhere Nebelentwicklung. Dies wurde als störend empfunden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse aus allen Versuchen, dass der Einsatz der Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse als Referenzdüse in Zukunft angestrebt wird.

4.2.4 Kompressor

Der handelsübliche Kompressor mit einer Leistung von 300 l/min bei 5 bar wird bei der Verwendung der Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse als tauglich befunden.

4.3 Optimierungspotential der verfahrenstechnischen Parameter und Ausblick

Bereits die ersten Praxistests zeigen deutlich, dass für einen verfahrenstechnisch optimierten und somit wirtschaftlichen Einsatz bei der Herstellung von textilbewehrtem Beton zur Verstärkung bestehender Bauteile wesentliche Eckpunkte und Rahmenbedingungen der Technologie, die für die bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen nicht relevant waren und daher festgeschrieben waren, neu festzulegen sind. Aus der Vielzahl der noch offenen Verfahrensparameter werden wenige beispielhaft genannt:

- Einwirkung von Feuchtigkeit auf das Gelege,
- Transport des Geleges,
- Vorkonfektionierung des Geleges,
- Applikationstechnik des Geleges,
- Vorbehandlung des Untergrundes,
- Nachbehandlung des Frischbetons.

Es ist Aufgabe der anstehenden weiteren Untersuchungen, hier jeweils Suboptima zu definieren, die dazu führen, dass die Verstärkung bestehender Bauteile mit textilbewehrtem Beton als Alternative zu konventionellen Verfahren in Zukunft angewandt werden kann.

5 Literatur

- [1] BERNER, F.; KOCHENDÖRFER, B.; SCHACH, R.: *Grundlagen der Baubetriebslehre – Band 2*, Teubner, Wiesbaden, 2008
- [2] CURBACH, M., GRAF, W., JESSE, D., SICKERT, J.-U., WEILAND, S.: *Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton*. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 6, 2007
- [3] CURBACH, M., HAUPTENBUCHNER, B., ORTLEPP, R., WEILAND, S.: *Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalentragwerks in Schweinfurt*. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 6, 2007
- [4] CURBACH, M., JESSE, F.: *Beton im Textilbeton – Die Entwicklung*. In: Lohaus, L. (Hrsg.): *Ingenieurbaustoffe – Konstruktive Wege in die Zukunft*. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Harald Schorn, Universität Bochum, Eigenverlag, 2001
- [5] DIN, DVGW, *Technische Regel Arbeitsblatt W 300 – Wasserspeicherung – Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Wasserbehältern in der Trinkwasserversorgung*, Beuth-Verlag, 2005-06
- [6] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, Dissertation, 2004, Dresden
- [7] PAGEL: *Versuchsbericht* 05.09.2008
- [8] SCHACH, R.: *Investitionskosten der Verkehrswege Transrapid und ICE*. *Tagungsband zur 1. Dresdner Fachtagung Transrapid*, Dresden, 2001
- [9] SCHACH, R.; JEHL, P.; NAUMANN, R.: *Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbahn*. Springer, Berlin Heidelberg, 2006
- [10] ZANGEMEISTER, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik*. Zangemeister & Partner, 4. Aufl., München, 1976