

„Inox FEinstein“ – Das Kanu aus Stahlwollbeton

Ein Beispiel für den Einsatz von hüttensandhaltigem Feinstzement

Von Rolf-Rainer Schulz, Frankfurt am Main, und Christian Bechtoldt,
Wiesbaden

1 Einleitung

Zugegeben, „Betonkanu“ klingt schon ein wenig verrückt. Warum soll man ausgerechnet aus einem Werkstoff Boote bauen, den jeder nur als massig, schwer und wasseraufnahmefähig kennt? Aber gerade der Reiz, das scheinbar Unmögliche möglich zu machen, weckt schon seit jeher innovative Kräfte. Vielleicht hilft auch die verschmitzte Freude darüber, eigentlich etwas Widersinniges zu tun, die Fesseln standardisierter Denkweisen abzulegen, um den Weg frei zu machen für das, was oft krampfhaft herbeigeredet wird – nämlich Kreativität.

Die in zweijährigem Turnus ausgetragene Betonkanu-Regatta ist der krönende Abschluß und für einige auch die Belohnung für wochenlange oder sogar monatelange, viel Freizeit verschlingende Aktivitäten. Hier wird zu Lande und zu Wasser zur Schau gestellt, was mit Beton – genauer gesagt mit zementgebundenen Werkstoffen – alles möglich ist. Es ist tatsächlich eine Leistungsschau. Dabei wird vieles von dem verwendet und umgesetzt, was dem neuesten Entwicklungsstand entspricht – manchmal auch ein bißchen mehr. Es ist sicherlich nicht übertrieben, von „High-Tech mit zementgebundenen Werkstoffen“ zu sprechen. Den sportlichen Wettkampf kann man als das „Sahnehäubchen“ der Veranstaltung ansehen.

Während sich traditionelle Kanusportler vor allem auf Paddeltechnik, Muskelkraft und Ausdauer konzentrieren, müssen die Betonkanuten obendrein ihre Boote nach bestimmten Regeln selbst bauen. Für die besten Ergebnisse sind der Konstruk-

tionspreis und der Gestaltungspreis ausgeschrieben. In [1] wird ausführlich darüber berichtet und verdeutlicht, daß man sich schon etwas einfallen lassen muß, um den Konstruktionspreis zu gewinnen. In diesem Jahr wurde bereits die 7. Deutsche Betonkanu-Regatta ausgetragen und „der Brotkorb hängt jedesmal höher“. Bei langjährigen Teilnehmern und erfahrenen Teams ist zwar ein sehr hoher Standard erreicht, der nur schwer zu überbieten ist, doch findet eine Wiederholung oder Verfeinerung bewährter Prinzipien bei der Jury weniger Anklang als ungewöhnliche Ideen bzw. Innovationen. Manche Universitätsteams können von den neuesten Erkenntnissen und Entwicklungen ihrer Institute und Forschungslabors profitieren, was ihnen sicherlich eine gute Ausgangsposition verschafft. Doch auch ohne einen solchen Hintergrund bestehen Chancen für eine gute Platzierung, wenn man die Frei-

heit hat und auch nutzt, etwas Neues auszuprobieren. Für Hochschulen sind Diplomarbeiten ein sehr wichtiges Instrument, neue Ideen oder Konzepte umzusetzen, weiterzuentwickeln und zur Ausführungsreife zu bringen. Auch wenn das Thema „Entwicklung eines neuen Betonkanus“ viele Diplomkandidaten reizt, lassen sie sich nach den bisherigen Erfahrungen erst dann darauf ein, wenn der Titel zum Beispiel in „Entwicklung einer dünnwandigen Konstruktion unter Verwendung von“ umbenannt wird. „Betonkanu“ klingt eben doch ein wenig verrückt.

2 Der Konstruktionswettbewerb

Das Reglement für den Konstruktionswettbewerb legt zwar einige Randbedingungen fest, doch verbleibt genügend Spielraum zum Experimentieren mit Herstelltechniken, Materialien und Konstruktionsdetails. Im Vordergrund steht natürlich das Bindemittel Zement; schließlich wird die Regatta vom Bundesverband der Deutschen Zementindustrie ausgerichtet. Zulässig sind auch alle anderen Stoffe, die man sonst in Betonen oder Mörteln einsetzt, wie Zuschlag, Zusatzmittel, Zusatzstoffe und Bewehrung. Ausgeschlossen ist hingegen die exzessive Verwendung von abdichtenden und aussteifenden artfremden Materialien.



Bild 1: Das Betonkanu „Inox FEinstein“ vor der Bewährungsprobe (Foto: Lorenz)

Die Konstruktionsidee wird hoch bewertet. Aber auch mit einem geringen Bootsgewicht, pfiffigen Detaillösungen, raffinierter Schalung, sauberer Ausführung und nicht zuletzt mit einer guten Präsentation sind Punkte zu gewinnen. Weitere Einzelheiten gehen aus [1] oder den Wettbewerbsunterlagen hervor, die bei der Bauberatung Zement angefordert werden können. Der Dauerhaftigkeitsnachweis wird durch die Wasserundurchlässigkeit, d.h. Schwimmtauglichkeit (**Bild 1**), und das Überstehen mindestens eines sportlichen Wettkampfs erbracht. Nicht jedes Boot besteht diesen Test, was manchmal auch auf Fehlbedienung zurückzuführen ist. Damit sich solche Boote nicht auf dem Grund des Gewässers wiederfinden und Tauch- und Bergungsspezialisten herausfordern, sind ausreichend dimensionierte Auftriebskörper anzubringen.

3 Die Idee

Angesichts der Tatsache, daß sich zur Zeit zahlreiche namhafte Forschungseinrichtungen mit der Entwicklung, Erforschung und Anwendung von aramid-, glas- und kohlenstoffaserbewehrten Textilbetonen [2] befassen, sind hier die Chancen für Quereinsteiger, Innovationsnischen zu finden, relativ gering. Für Außenseiter sind eher Wege abseits vom allgemeinen Trend vorgezeichnet und erfolgversprechender.

Zur Zeit erleben Stahlfaserbetone nach einer langen Stagnationsphase mit dem SIFCON-System (**Slurry Infiltrated Fibre CONcrete**) [3] eine gewisse Renaissance, doch ist das dabei verwendete Herstellprinzip nur für horizontale Flächen und mehrere Zentimeter dicke Schichten geeignet. Eine weitere Einschränkung besteht darin, daß sich mit lose geschütteten Fasern keine brauchbare Orientierung in Richtung der Hauptzugspannungen erzielen läßt. Dieser Nachteil soll durch das SIMCON-System (**Slurry Infiltrated Mat CONcrete**) [4] behoben sein, bei dem gepreßte oder geklebte Stahlfasermatten eingelegt werden. Allerdings ist auch dieses in Deutschland noch recht unbekanntes System eher auf Schichtdicken im Zentimeterbereich ausgelegt. Die Besonderheit beider Verfahren besteht darin, daß der Stahlfaseranteil deutlich über den mit der herkömmlichen Einmischtechnik erreichbaren Werten liegt und auf diese Weise sehr hohe Zugfestigkeiten und ein großes Arbeitsvermögen des Betons erreicht werden können. Dies wird in Abschnitt 4 näher beschrieben.

Die Konstruktion des Betonkanus „Inox FEinstein“ der FH Frankfurt am Main basiert auf der Idee, ähnlich hohe Stahlfasergehalte bei beliebiger Formgebung mit sehr viel geringeren Schichtdicken und mit gerichteten Fasern zu realisieren. Herkömmliche

Stahlfasern erschienen für diese Zwecke viel zu grob und zu wenig flexibel. An Stahlwolle als Faserbewehrung wurde zwar schon länger gedacht, doch alle Versuche, Mörtel oder Zementleim im Gießverfahren einzubringen, scheiterten. Der Durchbruch gelang erst, als versucht wurde, Stahlwolle mit Feinstzement-Suspensionen zu injizieren. Dazu war allerdings eine doppelwandige Schalung (**Bild 2**) erforderlich, wobei die Innenschalung zur Kontrolle des Injektionsvorgangs möglichst transparent sein sollte.

4 Stahlfaserbeton

4.1 Herkömmlicher Stahlfaserbeton (FRC = fibre reinforced concrete)

Fasern im Zementstein bzw. im Beton sollen die Zug- und Biegezugfestigkeit sowie die Verformbarkeit bei hoher Beanspruchung (Duktilität), die Energieaufnahme und die Schlagfestigkeit erhöhen. Gleichzeitig nimmt die Sprödigkeit und Reißneigung ab. Fasern wirken vor allem durch die Behinderung der Ribbildung und Ribausbreitung, besonders im Mikroribbereich. Die optimale Wirkung von Stahlfasern wird bekanntlich bei möglichst großem Stahlfaseranteil, großer Faserlänge und möglichst geringem Durchmesser sowie gleichmäßiger Verteilung und Orientierung in Beanspruchungsrichtung erzielt. Mit der herkömmlichen Einmischtechnik sind diese Optimierungsziele nicht realisierbar, weil sich bei Fasergehalten > 3 Vol.-% die Verarbeitbarkeit dramatisch verschlechtert und nur mit kurzen und relativ dicken Fasern verhindert werden kann, daß diese beim Mischen verfilzen und verklumpen (Igel-Bildung). Bei konventionellem Stahlfaserbeton wird zwar gegenüber unbewehrtem Beton eine gewisse Steigerung der Duktilität und der Schlagfestigkeit erreicht, doch können aufgrund der verhältnismäßig geringen Faseranteile das Dehnungsvermögen, die Zugfestigkeit und das Ribverhalten nicht in der angestrebten Weise verbessert werden.

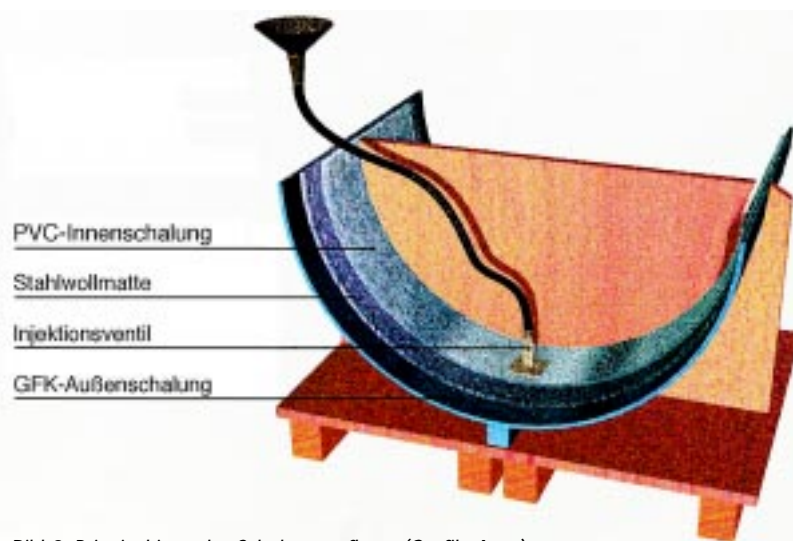


Bild 2: Prinzipskizze des Schalungsaufbaus (Grafik: Anyz)

4.2 Hochleistungs-Stahlfaserbeton (HPFRC = high performance fibre reinforced concrete)

Hochleistungs-Stahlfaserbeton zeichnet sich durch hohe Festigkeit, Zähigkeit und ein sehr großes Arbeitsvermögen aus. Des Weiteren zeigt er eine hervorragende Rißbreitenbeschränkung und einen sehr günstigen Rißbildungsmechanismus mit der Entstehung vieler feiner, nicht zusammenhängender Risse. Damit wird eine höhere Wasserundurchlässigkeit und ggf. eine Selbstheilung sehr feiner Risse erzielt und auf diese Weise die Dauerhaftigkeit deutlich verbessert. Beispiele solcher Hochleistungs-Stahlfaserbetone sind SIFCON und SIMCON.

4.2.1 SIFCON

Zur Herstellung von SIFCON [3] werden zunächst Stahlfasern lose auf den Untergrund gestreut und anschließend mit einem fließfähigen Mörtel vergossen. Dabei haben sich Stahlfasern mit Endhaken und einer Länge von 30 mm sowie einem Durchmesser von 0,5 mm als günstig erwiesen. Neben einer besonders feinen Rißverteilung, die die Undurchlässigkeit gegenüber Flüssigkeiten oder Gasen erhöht, werden durch den extrem hohen Stahlfaseranteil (bis 14 Vol.-%) auch der Abriebwiderstand und die Schlagfestigkeit signifikant verbessert. Daher kann SIFCON sogar als Abdichtung gemäß den Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) eingesetzt werden. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind die Instandsetzung von Betonfahrbahnen, Start- und Landebahnen von Flughäfen, Parkdecks sowie Tosbecken im Wasserbau. Die große Duktilität erlaubt es, das Material auch über große Flächen fugenlos einzubauen. Allerdings gestaltet sich das gleichmäßige Einstreuen der Fasern sehr zeitaufwendig. Wegen der ungleichmäßigen Faserverteilung und -orientierung können die gewünschten Eigenschaften nur mit relativ hohen Fasergehalten erzielt werden. Das Herstellverfahren ist für schmale, hohe Bauteile eher ungeeignet.

Bild 3: Abschnitt einer Stahlwollmatte



4.2.2 SIMCON

Das SIMCON-System [4] ist eine Weiterentwicklung des SIFCON-Systems, wobei statt lose gestreuter Fasern in der Regel durchgehende Stahlfasermatten verwendet werden, die aus Edelstahl bestehen können. Dabei handelt es sich um Geflechte mit Schichtdicken zwischen 12 mm und 50 mm. Die einzelnen Stahlfasern haben bei Durchmessern von etwa 0,3 mm bis 0,5 mm und Faserlängen von 20 cm bis 30 cm ein großes Faser-Schlankheitsverhältnis. Übliche Fasergehalte liegen etwa zwischen 1 Vol.-% und 6 Vol.-%. Höhere Fasergehalte sind mit den bisher verfügbaren Matten kaum zu realisieren. Bei einem Fasergehalt von rd. 6 Vol.-% werden Biegezugfestigkeiten bis zu 40 N/mm² erreicht. Außerdem nehmen die Zähigkeit, das Energieaufnahmevermögen und die Schlagfestigkeit zu. Für zugbeanspruchte Bauteile ist es vorteilhaft, daß nach Überschreiten der Matrixzugfestigkeit (Zustand II) viele feine, nicht zusammenhängende Risse (Mikrorisse) statt einzelner größerer Risse entstehen. Durch diese sehr wirksame Beschränkung der Rißbreite wird die Dauerhaftigkeit deutlich verbessert. Im Vergleich zu eingestreuten Kurzfasern können vorgegebene Eigenschaften mit einem geringeren Faservolumen erreicht werden, da eine genauere Einstellung der Faserverteilung und Faserorientierung möglich ist.

4.2.3 Stahlwollbeton

Stahlwolle ist ein handelsübliches Produkt, das unter anderem in Form von

Matten (Bild 3), z.B. als Rollenware mit 1 m Breite und nahezu beliebiger Länge, geliefert werden kann. Stahlwollmatten zeichnen sich dadurch aus, daß die Fasern überwiegend parallel (unidirektional) gepackt sind, aber durch die etwas wellige Form einerseits miteinander verfilzen, sich andererseits aber auch auf Distanz halten. Je nach Verarbeitung entsteht ein räumlicher woll- oder watteartiger Filz. Die einzelnen Fasern sind sehr dünn und biegsam. Bei der für das Betonkanu verwendeten Stahlwolle betrug der Faserdurchmesser < 0,1 mm. Im Verhältnis dazu sind die Faserlängen von einigen Dezimetern bis über einem Meter (im Durchschnitt rd. 60 cm) sehr groß. Ihr Verhältnis Länge/Durchmesser beträgt > 1000 und liegt somit sehr weit über dem kritischen Wert, bei dem sich eine Zunahme der Faserlänge für Stahlfaserbeton noch eigenschaftsverbessernd auswirken würde. Die Mattendicke kann zwar im Lieferzustand etwa einen Zentimeter betragen, läßt sich jedoch aufgrund der sehr großen, watteartigen Verformbarkeit auf wenige Millimeter, d.h. auf einen Bruchteil der ursprünglichen Dicke, zusammenpressen. Durch mehrere übereinander gelegte Matten kann so eine beliebig dicke kreuzweise oder sternförmige Bewehrung hergestellt werden. Da auch Stahlwolle aus rostfreiem Edelstahl im Handel erhältlich ist, scheint die Korrosionsproblematik lösbar. Die Verarbeitung der Matten ist äußerst einfach, da sie sehr flexibel, an fast alle Oberflächenformen anpaßbar, zusammendrückbar

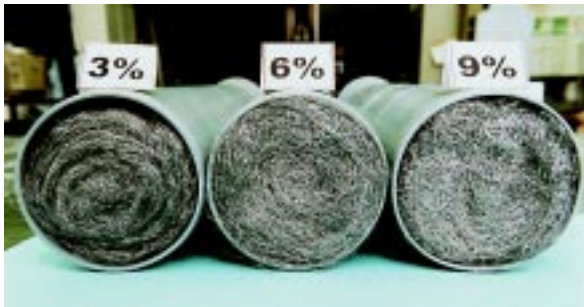


Bild 4: Kunststoffrohre, gefüllt mit aufgerollten Stahlwollmatten; Probenherstellung für die Druckfestigkeitsprüfung



Bild 5: Geschliffene Endflächen der Druckfestigkeitsprüfkörper

und mit der Schere zu schneiden sind. Bauteile oder Formen lassen sich damit sogar umwickeln. Die Stahlwollmatten werden mit einer Faserorientierung entsprechend dem erwarteten Spannungsverlauf in die Form eingelegt oder ggf. auf dem vorhandenen Bauteil punktuell fixiert und durch Anbringen der zweiten Schalungshälfte mit einem entsprechenden Anpreßdruck auf die gewünschte Dicke zusammengepreßt. Dies sind nach den Zielvorstellungen (vgl. Abschnitt 3) und Erläuterungen in Abschnitt 4.1 genau die Voraussetzungen, um mit Stahlfaserbetonen optimale Eigenschaften zu erzielen. Der Fasergehalt läßt sich, wie oben erwähnt, durch das Zusammenpressen der Matten steuern. Auf diese Weise entsteht allerdings ein scheinbar undurchdringlicher Filz, der sich mit herkömmlichen Bindemitteln nicht mehr verfüllen läßt.

Dieses Problem konnte durch das Injizieren von Feinstzementen gelöst werden, von denen aus der Geotechnik oder Bauwerksinstandsetzung bekannt ist, daß sie sich selbst in kleinste Poren, Hohlräume und Risse injizieren lassen. Tastversuche verliefen sehr erfolgreich und es zeigte sich später, daß sogar stark zusammengepreßte oder zusammengewickelte Matten mit bis zu 9 Vol.-% Faseranteil (Bild 4) mit Feinstzement-Suspensionen noch einwandfrei zu verpressen waren (Bild 5). Nachdem erste Versuche die hervorragende Eindringfähigkeit derartiger Suspensionen und deren prinzipielle Eignung für den vorgesehenen Zweck bestätigten, galt es im nächsten

Schritt, eine anforderungsgerechte Zusammensetzung der Suspension und eine geeignete Ausführungsmethode für ein schwimmfähiges, leichtes und dennoch ausreichend stabiles Betonkanu zu entwickeln [5].

5 Feinstzement

5.1 Spezifikationen

Feinstzemente bzw. Feinstbindemittel sind sehr feinkörnige hydraulische Bindemittel, die durch stetige und eng abgestufte Korngrößenverteilungskurven sowie ihre chemisch-mineralogische Zusammensetzung charakterisiert werden [6]. Sie sind vergleichbar mit Zementen nach DIN 1164-1, unterscheiden sich jedoch davon im wesentlichen durch die große Kornfeinheit und die Begrenzung des Größtkorns (Bild 6). Das Größtkorn wird durch den Korndurchmesser beschrieben, den 95 M.-% (d_{95}) der Partikel unterschreiten und der höchstens einen Durchgangswert von 16 μm aufweisen darf ($d_{95} \leq 16 \mu\text{m}$) [7].

Feinstzemente bestehen im allgemeinen aus den üblichen Zementhauptbestandteilen, wie z.B. Portlandzementklinker und Hüttsand, sowie Sulfatträger und werden ggf. durch Zusatzstoffe und Zusatzmittel ergänzt. Für derartige Bindemittel liegen Gutachten zur Umweltverträglichkeit aus wasserhygienischer Sicht vor. Die mineralischen Ausgangsstoffe der Feinstzemente werden getrennt vermahlen und anschließend bis zur vorgegebenen Feinheit gesichtet. Die getrennte Aufbereitung und das Mischen der einzelnen Komponenten ermöglichen die Herstellung einer Vielzahl unterschiedlicher Feinstzementsorten, die sich je nach Verwendungszweck hinsichtlich stofflicher Zusammensetzung und Feinheit unterscheiden.

5.2 Anwendungsgebiete in der Geotechnik und Bauwerksertüchtigung

Durch die Entwicklung von Feinstzementen wurden die Anwendungsmög-

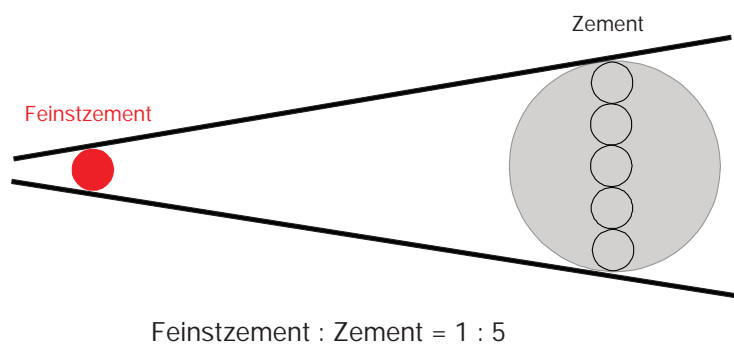


Bild 6: Größtkornvergleich Feinstzement/Zement

lichkeiten von Injektionsmaßnahmen mit hydraulischen Injektionsmitteln in den Bereichen Geotechnik und Bauwerkserhaltung (z.B. Beton, Mauerwerk) erheblich erweitert. Mit Wasser in hochtourigen Mischern gemischt, erreichen Feinstzement-Suspensionen aufgrund ihrer geringen Teilchengröße ein hervorragendes Eindringvermögen. Dadurch können Porenräume, Fehlstellen und Risse im Baugrund und im Bauwerk zur Abdichtung und/oder Verfestigung gefüllt werden, für die konventionelle Zemente nicht mehr geeignet sind.

Zum planmäßigen Einsatz von Feinstzementen für Injektionen in Lockergestein wurde das „Vorläufige Merkblatt für Einpreßarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein“ erarbeitet [8]. Für derartige Anwendungen muß grundsätzlich zwischen Verfestigungs- und Abdichtungsinjektionen unterschieden werden. Ein Hauptanwendungsgebiet von Feinstzementen in Lockergestein sind Abdichtungsinjektionen für Baugrubensohlen im Grundwasserbereich. Für diese Anwendungen wurden besondere Feinstzemente entwickelt, die sich im wesentlichen durch eine sehr gute Abdichtungswirkung in Böden mit hohen Feinsandgehalten auszeichnen.

In der Bauwerkserhaltung können Feinstzemente (z.B. gemäß der ZTV-RISS 93 [7]) sowohl schließend, abdichtend als auch kraftschlüssig für Riß- und Hohlrauminjektionen eingesetzt werden. Es lassen sich sogar Rißbreiten von $\leq 0,05$ mm injizieren, die bisher nur mit Reaktionsharzen gefüllt werden konnten. Ein weiteres Anwendungsbeispiel für Feinstzemente ist die Instandsetzung von schadhafte Betonwerksteinfußböden [9]. Durch Unterfüllen hohl liegender Platten mit Feinstzement-Suspension und Penetration des Bindemittels in den minderfesten, porösen Verlegemörtel kann die Verbundfestigkeit des Betonwerksteinfußbodens sowie die Eigenfestigkeit des Mörtelbetts wesentlich verbessert werden.

5.3 Feinstzement-Suspensionen

Zur Erzielung guter mechanischer Eigenschaften, eines geringen Schwin-

dens und einer möglichst geringen Porosität sollte der w/z-Wert einer Feinstzement-Suspension deutlich unter 0,80 liegen. Gleichzeitig muß die Suspension hervorragende Fließeigenschaften besitzen, um das vorgesehene Fasernetzwerk möglichst drucklos zu durchdringen bzw. die Hohlräume porenfrei auszufüllen. Besonders bei den für das Betonkanu angedachten Bauteildicken von unter 10 mm müssen Fehlstellen ausgeschlossen werden. Eine Reduzierung des w/z-Werts erhöht jedoch die Fließgrenze der Suspension und führt zum schnelleren Ansteifen. Wegen der Feinheit der Feinstzemente und aufgrund des damit verbundenen hohen Wasseranspruchs ist bei niedrigen w/z-Werten die Zugabe von Zusatzmitteln zur Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften unumgänglich. Desweiteren ist für die Suspension auch eine ausreichend lange Verarbeitungszeitspanne erforderlich, was neben dem Einsatz geeigneter Zusatzmittel (z.B. Fließmittel) eine Berücksichtigung der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung des Feinstzements bedingt. Eine Verkürzung der Verarbeitungszeit äußert sich durch ein vorzeitiges Ansteifen der Suspension. Das Ansteifen wird durch eine Brückenbildung (Agglomeration) zwischen den Bindemittelpartikeln infolge der Hydratation verursacht und würde ggf. den Injektionserfolg negativ beeinflussen. Zusätze wie Fließmittel bewirken eine Dispergierung der Bindemittelpartikel und verhindern dadurch die Agglomerationsneigung in der Suspension [10]. Damit ist eine Herabsetzung der Viskosität und eine Verzögerung des Hydratationsfortschritts über den Verarbeitungszeitraum möglich.

Als besonders vorteilhaft hat sich die Verwendung von Feinstzementen auf Hüttensandbasis erwiesen, da sie nicht nur einen hohen Sulfatwiderstand aufweisen, sondern durch ihre geringere Reaktivität im Vergleich mit Feinstzementen auf Portlandzementbasis eine längere – und damit günstigere – Verarbeitungszeit haben und zur Erzielung des gleichen w/z-Werts geringere Zusatzmittelgehalte erfordern. Eine weitere Beeinflussung

der Eigenschaften von Feinstzementen ist durch die Zugabe inerte Zusatzstoffe (z.B. Gesteinsmehl) oder puzzolischer Zusatzstoffe (z.B. Microsilica) möglich, die allerdings auf die Korngrößenverteilung des Feinstzements abgestimmt sein müssen.

Die entscheidende Kenngröße für eine erfolgreiche Injektion mit Feinstzement ist jedoch die Begrenzung des Größtkorns, die sich deutlich auf das Eindringvermögen der Suspension in den vorhandenen Porenraum auswirkt. Hierbei ist zu beachten, daß sich die Korngrößenverteilung des Zements während der Verarbeitungszeit nicht in den größeren Bereich verschieben darf. Eine solche Gefahr besteht, da sich im Laufe der Hydratation auf der Oberfläche der Zementpartikel Hydratationsprodukte bilden, die zu einer Kornvergrößerung führen. Dieser Effekt muß durch die Zugabe geeigneter Zusatzmittel für eine gewisse Zeitspanne unterdrückt werden (**Bild 7**).

Für die ersten Versuchsreihen bei der Herstellung des Betonkanus wurde ein Feinstzement auf Hüttensandbasis mit einem Größtkorn (d_{95}) von $\leq 9,5$ μm ausgewählt. Zur Reduzierung des w/z-Werts auf 0,50 war die Zugabe von 3 M.-% eines hochwirksamen Fließmittels erforderlich (**Bild 7**). Damit konnte eine fließfähige Suspension mit geringer Viskosität und einer ausreichenden Verarbeitbarkeitszeit von etwa 90 Minuten erreicht werden. In weiteren Versuchen wurde Microsilica (Slurry) in einer Menge von 10 M.-% bis 15 M.-% eingesetzt, was zwar zu einer Erhöhung der Viskosität führte, aber dafür eine weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bewirkte. Die Suspension wurde mit einem für Feinstzemente üblichen hochtourigen Mischaggregat aufbereitet, um einen optimalen Dispergierungsgrad zu erreichen.

6 Eigenschaften des Stahlwollbetons

6.1 Biegezugfestigkeit

Für die Minimierung der Wanddicke und damit auch des Bootgewichts war

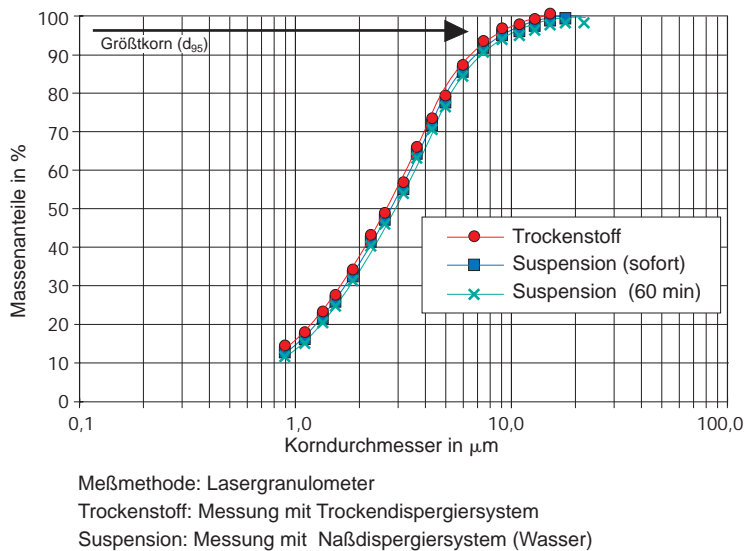


Bild 7: Korngrößenverteilung des Feinstzements (Gegenüberstellung von Trockenstoff und Suspension)

es von großem Interesse, inwieweit sich die zum Teil erstaunlichen Ergebnisse für die Biegezugfestigkeit, die im Rahmen einer Diplomarbeit [5] ermittelt wurden, bestätigen ließen. Im Rahmen von Ergänzungsuntersuchungen [11] sollte auch der Einfluß unterschiedlicher Fasergehalte bestimmt werden. Die Probenherstellung ist in Bild 8 dargestellt. Wie beim Bau des Betonkanus bestand eine Schalungshälfte aus 5 mm dickem durchsichtigem PVC. Es stellte sich jedoch beim Nachmessen der Probendicke heraus,

daß bei hohem Bewehrungsgehalt die Steifigkeit der PVC-Platten zu gering war, um die mehrlagige, ausschließlich faserparallel verlegte Stahlwolle auf das gewünschte Maß zusammenzudrücken. Als besonders problematisch erwies sich die Realisierung eines Stahlwollgehalts von 9 Vol.-%. Wegen zu großer Verformungen des nur 5 mm dicken PVC-Deckels konnte dieser angestrebte hohe Bewehrungsgrad nicht erreicht werden. Tatsächlich betrug der maximale Stahlwollgehalt rd. 8 Vol.-%. Dies zeigt, daß die

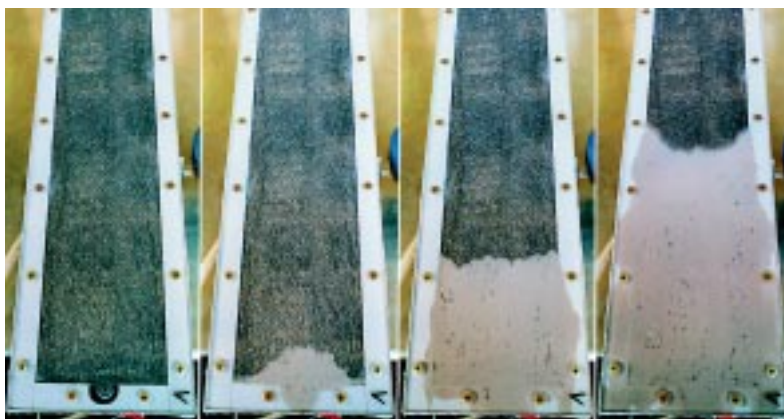


Bild 8: Herstellung der Probeplatten zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit; mehrere Stadien des Injektionsvorgangs

Schalung wegen des erforderlichen Anpreßdrucks bei hohen Fasergehalten sehr steif ausgelegt sein muß.

Die Biegezugprüfungen wurden nach Wasserlagerung der Proben im Alter von 28 Tagen auf einer elektromechanischen Universalprüfmaschine DIN 51223 - 20 kN - Klasse 1 mit einer geregelten Vorschubgeschwindigkeit von 15 mm/min durchgeführt. Die Versuche erfolgten an je 3 Platten mit den Maßen 5 mm x 100 mm x 320 mm im Dreipunkt-Biegeversuch, wobei der Auflagerabstand auf 240 mm eingestellt wurde (Bild 9). Die Spannungen sowie die Durchbiegungen jeder Probe wurden kontinuierlich aufgezeichnet und sind in Bild 10 dargestellt. Mit zum Teil mehr als 70 N/mm² wird die Biegezugfestigkeit vergleichbar zusammengesetzter Mörtel und Betone ohne Bewehrung um etwa das Zehnfache übertroffen. Bemerkenswert sind auch die erreichten sehr großen, noch nutzbaren Durchbiegungen von mehr als 10 mm bei Maximallast sowie das Bruchverhalten. Auffällig ist der zunächst steile Anstieg und der dann folgende Knick am Anfang der Spannungs-Verformungs-Linien, die danach bis zum Bruch nahezu linear verlaufen. Die beschriebene Unstetigkeit läßt erkennen, wann die Zugzone der Matrix reißt und der Zustand II erreicht ist. Die Risse werden aufgrund des geringen Faserdurchmessers fein verteilt und sind zunächst für das bloße Auge nicht wahrnehmbar. Durch das Reißen der Betonzugzone ändert sich die Steifigkeit, was in dem anschließenden flacheren Kurvenverlauf zum Ausdruck kommt. Anders als bei herkömmlichen Faserbetonen tritt am Ende des sehr großen elastischen Bereichs ein schlagartiges Versagen mit Makrorißbildung auf, ohne ausgeprägten abfallenden Ast der Spannungs-Verformungs-Linie. Dies ist ein Zeichen dafür, daß die Faserzugfestigkeit aufgrund der ausgezeichneten Verbundwirkung vollständig ausgenutzt wird und das von üblichen Stahlfaserbetonen bekannte Herausziehen der Fasern weitgehend unterbleibt. Die hier vorhandene Faserlänge liegt offensichtlich oberhalb der kritischen

Faserlänge, die für die Ausnutzung der Faserzugfestigkeit erforderlich ist. Nach dem Steilabfall bewahrt eine Resttragfähigkeit von über 10 N/mm^2 die höher bewehrten Proben vor dem völligen Auseinanderbrechen.

Während eine Steigerung des Bewehrungsgehalts von 3 Vol.-% auf 6 Vol.-% zu einer signifikanten Zunahme der Biegezugfestigkeit und des Arbeitsvermögens führt (Bild 10), ist dies bei weiterer Steigerung von 6 Vol.-% auf 8 Vol.-% nicht mehr der Fall. Wegen der genannten Schwierigkeiten bei der Realisierung hoher Stahlfasergehalte und aufgrund der wenigen Resultate sollte daraus allerdings nicht gefolgert werden, daß keine weitere Zunahme möglich wäre.

6.2 Druckfestigkeit

Wenngleich für denkbare Anwendungen des vorliegenden Verbundwerkstoffs das Biegeverhalten im Vordergrund stehen dürfte, wurde auch das Verhalten unter Druckbeanspruchung in Abhängigkeit vom Fasergehalt untersucht [11]. Dies geschah vor allem deshalb, weil man sich bei zementgebundenen Werkstoffen bevorzugt an der Druckfestigkeit und dem Spannungs-Stauchungs-Verhalten orientiert.

Zur Herstellung der Proben wurden etwa 500 mm lange PVC-Rohre mit einem Durchmesser von 70 mm verwendet, die an einem Ende mit einer Schraubmuffe verschlossen wurden. Von der anderen Seite ließen sich etwa 10 cm lange aufgewickelte Stahlwollrollen hineinstopfen. Der Fasergehalt konnte abhängig vom Anpreßdruck beim Wickeln eingestellt werden. Während bei der ersten Probenreihe zur Bestimmung der Druckfestigkeit nur Fasergehalte bis zu 8,3 Vol.-% erreicht werden konnten, war es bei der zweiten Probenreihe durch Änderung der Wickeltechnik möglich, den angestrebten Stahlwollgehalt von 9 Vol.-% zu erreichen (Bild 4). Auch dieser scheinbar undurchdringliche Filz ließ sich problemlos mit einer Feinstzement-Suspension injizieren. Der Verpreßvorgang dauerte je nach Fasergehalt zwischen

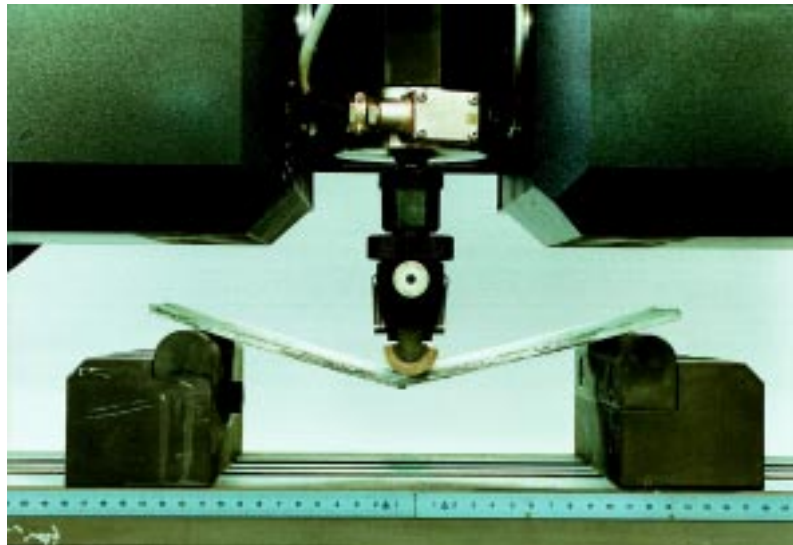


Bild 9: Prüfung der Biegezugfestigkeit

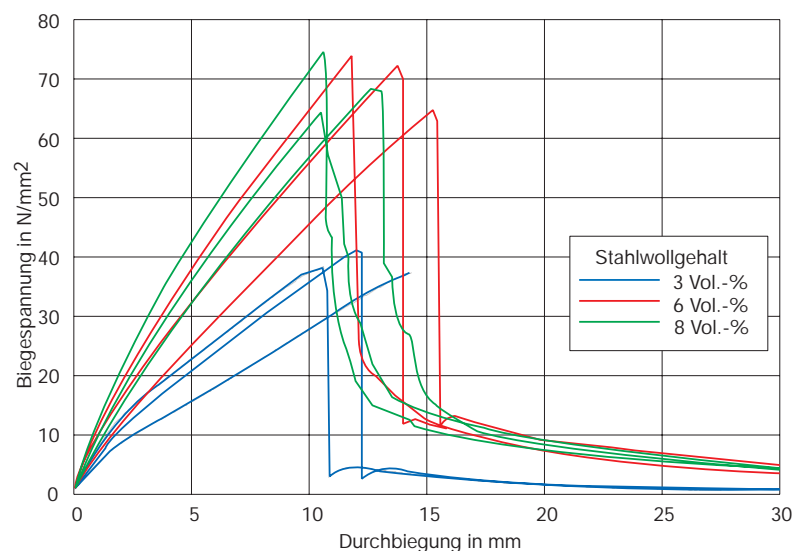


Bild 10: Zusammenhang zwischen Biegespannung und Durchbiegung bei Stahlwollbeton in Abhängigkeit vom Stahlwollgehalt

1 Minute und 5 Minuten und erfolgte über Packer in den Schraubmuffen am Fußende der senkrecht stehenden Rohre. Problematischer gestaltete sich die Herstellung der mit Sand gefüllten Vergleichsproben ohne Stahlfasern. Der Zuschlaggehalt dieser Vergleichsproben betrug bei der ersten Probenreihe 65 Vol.-% und bei der zweiten 57 Vol.-% (Tafel 1). Das Verpressen der etwa 500 mm hohen

„Sandsäulen“ (Korngruppe 1/2 mm) erforderte höhere Verpreßdrücke und wesentlich mehr Geduld.

Nach dem Entschalen lagerten die Proben bis zur Prüfung unter Wasser.

Erst am Prüfungstag wurden die Prüfkörper auf die gewünschte Länge gesägt, wobei je Variante an 2 Prüfkörpern mit 70 mm Durchmesser und 200 mm Länge die Spannungs-

Tafel 1: Druckfestigkeitsergebnisse von Injektionsprobekörpern mit unterschiedlichen Stahlwoll- und Zuschlaggehalten

Serie	Stahlwollgehalt Vol.-%	Zuschlaggehalt Vol.-%	Druckfestigkeit in N/mm ²		
			h:d ≈ 3 : 1		h:d = 1 : 1
			Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Prüfkörper 3
1	0	65 ^{*)}	39,3	44,7	45,5
	3	–	51,8	45,0	53,3
	6	–	59,6	45,6	63,1
	8,3	–	61,4	54,0	58,5
2	0	57	37,2	30,7	35,1
	3	–	53,9	43,7	48,1
	6	–	52,2	52,8	58,5
	9	–	60,4	71,3	79,3

^{*)} Zuschlag abgeseibt

■ kraftgeregelt ■ dehnungsgeregelt

Stauchungs-Linie bestimmt und an einem Prüfkörper mit Länge = Durchmesser = 70 mm die Druckfestigkeit geprüft wurde. Die relativ große Probenschlankeit (h : d ≈ 3 : 1) minderte zwar die Festigkeit, ermöglichte aber eine genauere Messung des Verformungsverhaltens. Die Prüfung erfolgte bei den Prüfkörpern der Serie 1 kraftgeregelt mit 0,5 N/mm² · s und

bei den Prüfkörpern der Serie 2 mit h : d ≈ 3 : 1 dehnungsgeregelt mit 0,02 % / s auf der obengenannten Prüfmaschine im 600 kN-Lastbereich.

Die zuvor beschriebene Anordnung der Stahlwollmatten behinderte die Querdehnungen, die das Druckversagen des Betons einleiten (Bild 11). Daher nahmen mit steigendem Faser-

gehalt die Druckfestigkeit und das Arbeitsvermögen zu. Es wurden Bruchstauchungen von bis zu 3 % erreicht (Bild 12). Während die Vergleichsproben erwartungsgemäß spröde brachen, zeigten die bewehrten Proben abhängig vom Fasergehalt ein großes Arbeitsvermögen mit bis zu 1,7 % Stauchung bei Höchstlast. Als Bruch wurde der steile Abfall der Last gewertet, obwohl noch eine geringe Resttragfähigkeit verblieb. Da bei den Stahlwollbetonen kein Zuschlag verwendet wurde, lagen die aus den Diagrammen entnommenen E-Moduli mit Werten zwischen 10000 N/mm² und 15000 N/mm² erwartungsgemäß niedrig. Die Druckfestigkeiten stiegen mit zunehmendem Fasergehalt und erreichten bei 9 Vol.-% im Mittel 70 N/mm², während die Druckfestigkeit der unbewehrten Proben im Mittel nur etwa 40 N/mm² betrug (Bild 13). Einzelwerte der Druckfestigkeitsuntersuchungen gehen aus Tafel 1 hervor.

7 Bau des Betonkanus „Inox FEinstein“

7.1 Schalung

Als Außenschalung für das Betonkanu konnte eine von früheren Bootsbau-

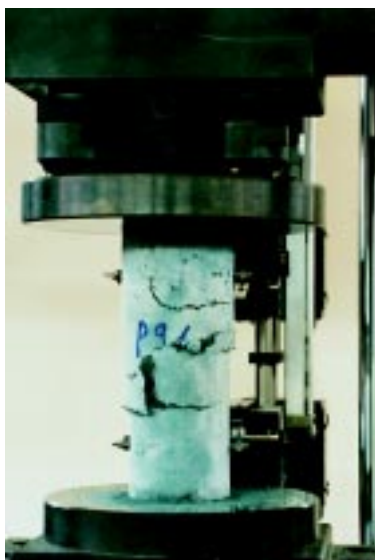


Bild 11: Druckversuch zur Bestimmung der Spannungs-Stauchungs-Linie

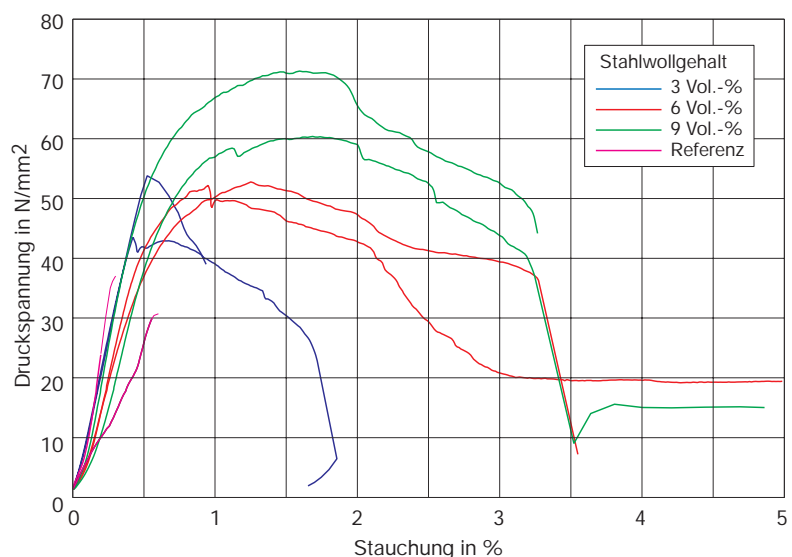


Bild 12: Spannungs-Stauchungs-Linien von Stahlwollbeton

ten vorhandene glasfaserverstärkte Kunststoffschalung (GFK) verwendet werden, nachdem einige Reparatur- und Ergänzungsmaßnahmen vorgenommen worden waren. Die für die doppelwandige Schalung erforderliche Innenschalung wurde hingegen völlig neu gestaltet. Der Spalt zwischen Innen- und Außenschalung sollte im Mittel 4 mm betragen, im Bereich des Kiels etwas mehr. Für die Anpassung der Innenschalung an diese Vorgaben wurde eine Schaumstoffmatte entsprechender Dicke in die GFK-Außenschalung eingelegt und mit Zementleim getränkt. Nach dem Erhitzen war die gewünschte Spaltweite fixiert. Im Rahmen der bereits oben erwähnten Diplomarbeit [5], die den Bootsbau vorbereiten sollte und bei der Kanusegmente im Maßstab von 1:1 hergestellt wurden, hatten sich durchsichtige Schalungselemente aus Kunststoff als günstig erwiesen. Dabei konnten der Einpreßvorgang kontrolliert und erforderlichenfalls Lufteinschlüsse durch Klopfen beseitigt werden. Die 5 mm dicken Plexiglas-Platten (PMMA) waren zwar im erwärmten Zustand plastisch verformbar – dies jedoch nur für eine viel zu kurze Zeit. Daher mußten umfangreiche Studien zur Auswahl geeigneter Kunststoffe betrieben werden. Zuletzt wurden 5 mm dicke durchsichtige PVC-Platten gewählt, die nach dem Erwärmen ausreichend lange umformbar blieben (**Bild 14**), preiswerter als PMMA und sehr gut schweiß- und klebbar waren. Nach dem Zugschnitt und Einformen der etwa 40 cm breiten Kunststoffsegmente wurden die Fugen auf der Seite, die als Schalhaut diente, geschweißt und auf der außenliegenden Seite mit Laschenstreifen verklebt (**Bild 15**). Da beim Einpressen der Feinstzement-Suspension mit erheblichen Auftriebskräften gerechnet werden mußte, wurde die Innenschalung entsprechend kräftig mit Holzspanten ausgesteift.

7.2 Einlegen der „Bewehrung“

Die Stahlwollmatten wurden mit einer Schere zugeschnitten und mindestens zweilagig kreuzweise verlegt.

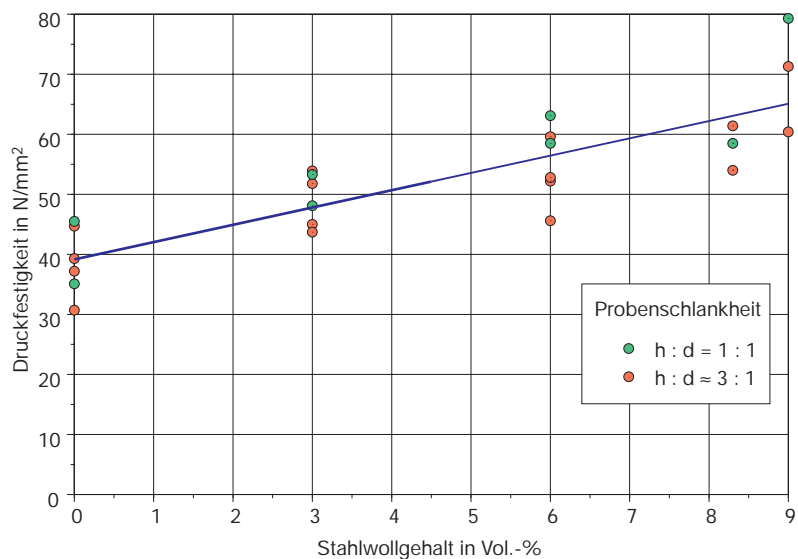


Bild 13: Einfluß des Stahlwollgehalts auf die Betondruckfestigkeit

Bild 14: Einlegen und Anpassen der erwärmten PVC-Schalungselemente (Foto: Lorenz)



Bild 15: Eindrücken der mit Packern bestückten Innenschalung, Zusammenpressen der Stahlwollmatten (Foto: Lorenz)



Der Kielbereich erhielt zusätzliche Mattenlagen als Verstärkung. Bei einer angestrebten Wanddicke von 4 mm hätten 2 Mattenlagen einem Bewehrungsgehalt von 6 Vol.-% entsprochen. Durch das Überlappen der Stöße und „Auftragen“ im Bereich der engen Radien ließ sich die Stahlwollbewehrung nicht mit der Innenschalung auf die vorgesehene Spaltweite zusammenpressen (Bild 15). Beim Andrücken der Aussteifungen erwiesen sich die von der einen Seite geschweißten und von der anderen Seite mit Laschen geklebten Stöße der PVC-Schalungselemente als sehr empfindlich und drohten zu zerbrechen. Aus Vorsichtsgründen konnte der Anpreßdruck nicht weiter erhöht werden. Daher blieb die Spaltweite mit teilweise bis zu 10 mm deutlich über dem angestrebten Wert, und es wurde entsprechend mehr Feinstzement-Suspension benötigt. Dadurch wog das Boot zuletzt mit über 100 kg mehr als doppelt soviel wie ursprünglich geplant.

7.3 Herstellung des Stahlwollbetons im Injektionsverfahren

Das Einbringen der Feinstzement-Suspension erfolgte über handelsübliche Packersysteme (Einfüllstutzen) und Injektionspressen. Die Suspension wurde entgegen der Schwerkraft von unten nach oben injiziert, damit eventuelle Luftpockets durch Entlüftungsöffnungen entweichen konnten. Deshalb mußte die Anordnung der Packer in Abhängigkeit der herzustel-

lenden Geometrie sorgfältig gewählt werden. Weil man dem angekündigten Ausbreitverhalten der Feinstzement-Suspension zunächst nicht vertraute, wurden vorsichtshalber insgesamt 32 Packer mit Heißkleber an der Innenschalung befestigt (Bild 15), von denen letztlich aber nur etwa ein Dutzend benötigt wurden. Die Befestigung der Packer erwies sich als verbesserungsbedürftig. Bei später durchgeführten Anschlußuntersuchungen (s. Abschnitt 6) wurden die Packer mit Kontermuttern angeschraubt und konnten dann problemlos höhere Verpreßdrücke bzw. mechanische Beanspruchungen aufnehmen. Durch die hervorragenden Fließigenschaften der Suspension war nur ein geringer Injektionsdruck (< 1 bar) nötig, um das dichte Fasernetzwerk zu durchdringen und die Hohlräume vollständig auszufüllen. Der geringe Druck verhinderte eine mögliche Entmischung der Suspension (Bildung eines Filterkuchens) und unterstützte damit im Bauteil die Erzielung homogener Eigenschaften. An die Dichtigkeit der verwendeten Schalung wurden hohe Anforderungen gestellt, da eventuelle Fehlstellen durch die extrem fließfähige Suspension zu Leckagen führen konnten, die sich während des Verpreßvorgangs nur schwierig hätten beseitigen lassen.

Das Injizieren erfolgte sehr behutsam mittels Handpumpe. An einigen Stellen, an denen die Bewehrung sehr konzentriert lag, mußte jedoch der Verpreßdruck etwas erhöht werden,

wodurch die Gefahr von Undichtigkeiten zunahm. Aufgrund der durchsichtigen Hart-PVC-Innenschalung konnten während des Injektionsvorganges aufgetretene Luftpockets sofort entdeckt und z.B. durch Klopfen beseitigt werden.

7.4 Nachbehandlung und Nachbearbeitung

Wegen der weitgehend diffusionsdichten Innen- und Außenschalung aus Kunststoff bot sich eine Nachbehandlung durch Belassen in der Schalung geradezu an. Zum Entschalen nach etwa 14 Tagen wurde Wasser in einen feinen Spalt zwischen Schalung und Bootswandung gespritzt. Die auf diese Weise aktivierten Auftriebskräfte lösten den Bootskörper sehr schonend von der Schalhaut.

Das Nacharbeiten, z.B. Verfüllen von vereinzelt aufgetretenen Lunkern oder Schlieren, geschah „stilecht“ in Injektionstechnologie. Die betroffenen Bereiche wurden mit transparenter Klebfolie überklebt und mittels Einwegspritzen „nachinjiziert“ (Bild 16). Nach ausreichendem Erhärten der Reparaturstellen ließ sich die Folie problemlos entfernen.

8 Bewährung in der Praxis und Plazierung im Wettbewerb

Wenngleich den Betonkanu-Konstrukteuren als Wettkampfteilnehmer und -teilnehmerinnen kein besonderer sportlicher Erfolg vergönnt war, konnte das Kanu der Fachhochschule Frankfurt am Main durch die Teilnahme an mehreren Vorläufen seine sehr gute mechanische Belastbarkeit, Schwimmfähigkeit und Wasserundurchlässigkeit unter Beweis stellen. Dies war, wie oben erwähnt, eine notwendige Voraussetzung für die Teilnahme am Konstruktionswettbewerb, den das Betonkanu „Inox FEinstein“ für sich entscheiden konnte. Die erfolgreiche Umsetzung einer ungewöhnlichen Herstelltechnik und Materialkombination gab den Ausschlag für den 1. Platz des Frankfurter Betonkanus im Konstruktions-



Bild 16: Nachinjizieren an Lunkern und Schlieren



Bild 17: Das Betonkanu „Inox FEinstein“ mit transparenter PVC-Innenschalung (Foto: Lorenz)

wettbewerb der 7. Deutschen Betonkanu-Regatta 1998.

Der Name des Betonkanus „Inox FEinstein“ (Bild 17) offenbart einige Besonderheiten der Konstruktion: „Inox“ steht für rostfrei, „FE“ für Stahl und „(Fe)instein“ für Zementstein aus Feinstbeton.

9 Zusammenfassung

Das Betonkanu „Inox FEinstein“ der FH Frankfurt am Main erreichte den 1. Platz im Konstruktionswettbewerb der 7. Deutschen Betonkanu-Regatta 1998 mit einer Konstruktion aus Stahlwollbeton. Die Herstellung erfolgte mit einer doppelwandigen Schalung, in der Stahlwollmatten mit einer Suspension aus Feinstzement verfüllt wurden. Dieser neue Verbundwerkstoff wurde zwar eigens für das Betonkanu der Fachhochschule Frankfurt am Main entwickelt, doch kommt er aufgrund seiner vielsprechenden Eigenschaften auch für bautechnische Anwendungen im kommerziellen Bereich in Betracht. Das Einbringen von Feinstzement-Suspensionen im Injektionsverfahren eröffnet die Möglichkeit, hochgradig bewehrte, beliebig geformte dünnwandige Bauteile herzustellen. Die mechanischen Eigenschaften sind dadurch gekennzeichnet, daß die Stahlwollfasern aufgrund ihres günstigen Längen/Durchmesser-Verhältnisses weit oberhalb der kritischen Faserlänge liegen und ihre Zugfestigkeit vollständig ausgenutzt wird. Das führt dazu, daß sie nicht, wie sonst bei Stahlwollbeton üblich, nach Überschreiten der Maximalspannung aus der Matrix herausgezogen werden, sondern bis zum Bruch gedehnt werden können.

10 Literatur

- [1] Bayer, E.: Siebte Deutsche Betonkanu-Regatta 1998. Beton 48 (1998) Nr. 11, S. 668-572.
- [2] Neuer Baustoff Textilbeton – erster Sachstandsbericht zur aktuellen technischen Entwicklung. Bauen mit Textilien 1 (1998) Nr. 2, S. 19-26.
- [3] Breitenbücher, R.; Wörner, J.D.: Ein neuer Hochleistungsbeton. SIFCON – Slurry Infiltrated Fibre Concrete. Beton 45 (1995) Nr. 12, S. 861-866.
- [4] Hackman, L.E.; Farrel, M.B.; Dunham, O. O.: Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON). Concrete International (1992) Nr. 12, S. 53-56.
- [5] Engelhardt, E.; Klusak, M.: Entwicklung eines Konstruktions- und Fertigungsverfahrens für dünnwandige, wasserundurchlässige Faserbetonschalen unter Verwendung von Feinstbindemitteln. Diplomarbeit, FH Frankfurt am Main, 1998 (unveröffentlicht).
- [6] Perbix, W.; Teichert, H.-D.: Feinstbindemittel für Injektionen in der Geotechnik und im Betonbau. Taschenbuch für den Tunnelbau 1995, S. 353-389; Verlag Glückauf GmbH, Essen.
- [7] Bundesminister für Verkehr: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Füllen von Rissen in Betonbauteilen (ZTV-RISS 93). Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 1993.
- [8] Vorläufiges Merkblatt für Einpreßarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein. Bautechnik 70 (1993) H. 9, S. 550-560.
- [9] Perbix, W.; Krüger, T.; Bechtoldt, C.: Feinstzemente – Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie-Boden-Technik. Industriebau 41 (1995) H. 4, Industrie-Boden-Technik, S. 77-85.
- [10] Umlauf, R.: Rheologische Eigenschaften von Zementleimen und deren Beeinflussung. Vortrag, Bauchemie Kongreß 1997, Nürnberg.
- [11] Beberweil, M.: Untersuchungen zur Durchführbarkeit von Betoninstandsetzungen mittels Feinstzementinjektion und Stahlwolle-Bewehrung. Studienarbeit, FH Frankfurt am Main, 1998 (unveröffentlicht).

Danksagung

An dieser Stelle sei dem Team der Fachhochschule Frankfurt am Main für seinen großartigen und erfolgreichen Einsatz gedankt. Mitwirkende waren:

Thomas Anyz / Oliver Bauch / Stefanie Baus / Martin Beberweil / Christian Dirks / Tobias Henrich (Chefkonstrukteur) / Thomas Herz (Laboringenieur) / Jürgen Hiemisch / Branco Jovic / Holger Kolczyk (Chefkonstrukteur) / Holger Lack / Alexander Lorenz / Elke Otte / Ivanca Pavic / Henrik Schöniger / Torsten Unger

Unser Dank gilt auch der Schreinerei der FH Frankfurt am Main, den Sponsoren und Veranstaltern.