

Betonkanuregatta 2017 – Aspekte der Nachhaltigkeit der Betonschalung

Rebecca Geiger¹, Henry Kohn¹ und Moritz Milch¹

¹Fachbereich 1, Zukunftssicher Bauen, Frankfurt University of Applied Sciences

Abstract. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurde das erste schwimmfähige Fahrzeug aus Beton gefertigt. Der Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. initiierte 1986 die erste deutsche Betonkanuregatta mit der komplexen Aufgabe aus den Bestandteilen Zement, Wasser, Sand sowie Zuschlägen ein schwimmfähiges und optimiertes Kanu zu bauen. Die Herausforderung besteht darin ein leichtes und trotzdem robustes Kanu herzustellen. Prämiert werden neben dem schnellsten Boot auch die Konstruktion, Gestaltung sowie das leichteste als auch das schwerste schwimmende Kanu. Zur Realisierung dieses Projekts sind vor allem zwei Themen von besonderem Belang, zum einen das Material an sich (also die Zusammensetzung des Betons sowie die Bewehrung), zum anderen die Konstruktionsweise sowie die verwendete Schalung. Das folgende Paper befasst sich im Detail mit der Konstruktionsweise und der Herstellung der Schalung.

Die Auswertung der vergangenen Betonkanuregatten zeigt, dass bei der Realisierung der bisherigen Betonkanus und deren Schalungen wenig bis gar nicht auf die Nachhaltigkeit der verwendeten Materialien geachtet wurde. Eine Prüfung der besten Ansätze war Grundlage, ob es möglich ist eine neue, nachhaltige und effiziente Herstellungsmethode der Schalung für das Betonkanu 2017 zu kreieren. Hieraus wurde eine Versuchsreihe mit Ton, gebrochenem und kinetischem Sand als nachhaltiges Schalungsmaterial durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anhand der Betonqualität der Versuchskörper analysiert und bewertet.

Als Ergebnis stellte sich heraus, dass eine Schalung aus kinetischem Sand die Anforderungen an Wiederverwendbarkeit, Realisierbarkeit der Schalung in Form und Oberflächenbeschaffenheit sowie auch in der Einfachheit der Herstellung am besten in sich vereint.

Einleitung

Wasser, Zement, Sand sowie einige weitere Zuschläge vermennt ergeben eine hoch druckfeste Struktur, die seit Jahrzehnten im Baugewerbe als Beton verwendet wird. Um neue Forschungsanreize zu setzen lobte der Bundesverband der deutschen Zementindustrie e.V. die erste deutsche Betonregatta aus. Bei der im zwei Jahresrhythmus stattfindenden Regatta messen sich Bildungsinstitute aus ganz Europa unter anderem in den Kategorien schnellstes, leichtestes/schwerstes Kanu sowie in der Konstruktion. Trotz der aktuellen Entwicklung in der Baubranche die Gedanken der Nachhaltigkeit, Ökologie und Ökonomie besonders durch Verordnungen wie die EnEV und verschiedene Zertifizierungssysteme wie das der DGNB auszubauen, werden diese bei der Konstruktion und Bewertung noch zu verhalten betrachtet.

Um herauszufinden wie der aktuelle Stand der Technik im Herstellungsprozess eines Betonkanus ist wurden zunächst die Plätze eins bis drei der Konstrukteurswertung sowie die Sieger der Kategorie leichtestes Kanu betrachtet und bewertet. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde im folgenden Schritt eine Versuchsreihe gestartet um nach einer geeigneten, nachhaltige Schalung aus Sand oder Ton zu forschen.

Analyse und Bewertung der Betonkanuregatten 2005 bis 2015

Zur Analyse der Kanus wurden die ersten drei Plätze der Konstrukteurswertung sowie die Sieger der Kategorie leichtestes Kanu der letzten sechs Regatten zunächst in Tabelle 1 aufgelistet. Als nächstes wurden diese insgesamt 24 Entwürfe aufgrund der Art des Betons sowie der verwendete Bewehrung, der Art der Schalung und wie sie hergestellt wurden und anhand eines spezifischen Alleinstellungsmerkmals betrachtet. Im Anschluss konnte basierend auf diesen Ergebnissen die verschiedenen Kanus in Tabelle 3 untereinander verglichen werden und so durch einen zum Thema der Nachhaltigkeit festgelegten Punktemaßstab in Tabelle 2 bewertet werden.

Tabelle 1

Plätze eins bis drei sowie Sieger leichtestes Kanu

Übersicht der Sieger der letzten 5 Regatten				
Regatta	Konstruktion 1. Platz	Konstruktion 2. Platz	Konstruktion 3. Platz	Leichtestes Kanu 1. Platz
2015 in Brandenburg a.d. Havel	ETH Zürich	TU Wien	TU Darmstadt	TU Graz
2013 in Nürnberg	ETH Zürich	FH Münster	RWTH Aachen	TU Dresden
2011 in Magdeburg	FH Nürnberg	ETH Zürich	Beuth Hochschule für Technik Berlin	ETH Zürich
2009 in Essen	ZHAW Winterthur	Hochschule Darmstadt	Hochschule Nürnberg	TU Dresden
2007 in Hannover	FH Nürnberg	TU Dresden	HTWK Leipzig	TU Dresden
2005 in Heidelberg	FH Nürnberg	TU Dresden	FH Koblenz	HS f. bild. Künste Hamburg & ETH Zürich

In der Auswertung der Ergebnisse aus Tabelle 3 stellt sich heraus, dass die Entwürfe der Technischen Hochschule Nürnberg von 2005 und der Hochschule Darmstadt von 2009 aufgrund ihrer Gesamtkonzepts besonders herausragen.

Das Darmstädter Kanu zeichnet sich vor allem durch die Herstellung aus einer Positivschalung mit einem kohlefaseramierten Spritzbeton aus. Wohingegen das Nürnberger Kanu durch seine Konstruktionsweise aus geklebten, einzelnen Dreieckssegmenten hervorsticht.

Während der Entwurf aus Darmstadt mit seiner Ausgeglichenheit glänzt ist beim Nürnberger Betonkanu die geschätzte bauökologische Bilanz besser. Aus diesem Grund wurde dieser Entwurf trotz des negativen Punkts bei der Einfachheit der Herstellung als bisher bestes Konzept bewertet.

Tabelle 2

Bewertungsmaßstab Betonkanus

Bewertungsmaßstab	
gut	1
neutral	0
schlecht	-1

Tabelle 3 Bewertung Betonkanus der Regatten 2005 bis 2015 (Teil 1/3)

Betonkanu-Regatta	2015	2015	2015
Platzierung	1. Platz	2. Platz	3. Platz
Universität	ETH Zürich	TU Wien	TU Darmstadt
Schalung – Herstellung Kanu	Carbonfasermatte - Netzschalung	Stecksystems aus CNC gefrästen MDF Platten	Plexiglas, Elementbauweise Holz Nut & Feder
Materialmenge in Relation zu Kanugröße	1	-1	-1
Gewicht Schalung (leicht = 1 schwer = -1)	1	0	0
Einfachheit der Herstellung	-1	0	0
Wiederverwendbarkeit Schalung (mehrere Kanus herstellen)	-1	1	1
Recycling / Sondermüll	-1	0	-1
Bauökologische Bilanz (Energieaufwand für Herstellung - abgeschätzt)	-1	0	-1
Reproduzierbarkeit Schalung	1	1	1
	-1	1	-1

Tabelle 4 Bewertung Betonkanus der Regatten 2005 bis 2015 (Teil 2/3)

Betonkanu-Regatta	2013	2011	2009	2007
Platzierung	3. Platz	1. Platz	2. Platz	1. Platz
Universität	RWTH Aachen	TU Nürnberg	H Darmstadt	TH Nürnberg
Schalung – Herstellung Kanu	Elementbauweise, flach gegossene Dreiecke; verleimt	Plexiglas	Modell aus Holz, Kanu abgeformt (positiv Schalung)	positiv & negativ Schalung aus Styropor gefräst; Beton in Zwischenraum gegossen
Materialmenge in Relation zu Kanugröße	1	0	1	-1
Gewicht Schalung (leicht = 1 schwer = -1)	1	0	1	1
Einfachheit der Herstellung	-1	-1	0	1
Wiederverwendbarkeit Schalung (mehrere Kanus herstellen)	1	1	1	1
Recycling / Sondermüll	-1	-1	0	-1
Bauökologische Bilanz (Energieaufwand für Herstellung - abgeschätzt)	0	-1	0	-1
Reproduzierbarkeit Schalung	1	1	1	1
	2	-1	4	1

Tabelle 5

Bewertung Betonkanus der Regatten 2005 bis 2015 (Teil 3/3)

Betonkanu-Regatta	2007	2005	2005	2005
Platzierung	3. Platz	1. Platz	2. Platz	leichtestes Kanu
Universität	HTWK Leipzig	TH Nürnberg	TU Dresden	TU Graz
Schalung – Herstellung Kanu	vorgesägte Spanten 5-10mm breite Holzleisten beplankt, Kunstharzbeschichtet, Spritzbeton	flache Schalung (150 Einzelteile mit 2 Komponentenkleber verklebt)	Textilschalung = Bewehrung Beton ist flexibel, Herstellung 9 Lappen, dann biegen und zusammensetzen	CNC gefräste Dämmplatten (XPS)
Materialmenge in Relation zu Kanugröße	-1	1	1	-1
Gewicht Schalung (leicht = 1 schwer = -1)	0	1	1	1
Einfachheit der Herstellung	0	-1	-1	1
Wiederverwendbarkeit Schalung (mehrere Kanus herstellen)	1	1	-1	1
Recycling / Sondermüll	0	0	-1	-1
Bauökologische Bilanz (Energieaufwand für Herstellung - abgeschätzt)	0	1	1	-1
Reproduzierbarkeit Schalung	1	1	0	1
	1	4	0	1

Eigene Versuche: Betonieren in vorbereitete Schalungen aus Ton und Sand

Um herauszufinden, ob sich Schalungen aus Ton oder kinetischem Sand auf das Erhärtungsverhalten des Betons auswirken, wurden Probekörper hergestellt. Die Betoneigenschaften sollen mit denen eines Probekörpers aus herkömmlicher Herstellung verglichen werden. Es soll herausgefunden werden, ob Sand oder Ton als Schalungsmaterial für das Betonkanu 2017 verwendet werden kann. Als Ergänzung wurde der gleiche Versuchsaufbau mit einer Schalung aus gebrochenem und zugleich feuchtem Sand durchgeführt. Alle Probekörper werden ohne Bewehrung hergestellt.

Sand hat die Eigenschaft Wasser zu binden, was das Abbinde-Verhalten des Betons negativ beeinflussen könnte, deshalb wurde die Überlegung angestellt die Schalung einzufrieren, und so den Wasserentzug zu verhindern. Es wird erwartet, dass während des Auftauens der Sand das gefrorene Wasser an den aushärtenden Beton abgibt und so eine bessere Betonqualität erreicht werden kann.

Bewertungskriterien der Betoneigenschaften:

- Oberflächenbeschaffenheit
- Porigkeit
- richtig ausgehärtet oder sandende Oberfläche?

Verwendeter Beton (Feinmörtel):

Die Zusammensetzung des Betons orientiert sich an der Betonrezeptur des vorhergehenden Kanuteams „Pendulus Caementum“. Der Beton ist bereits hinsichtlich seiner Festigkeit, seines Verbundverhaltens sowie seiner Verarbeitbarkeit optimiert worden. Dies hat zur Folge, dass der Feinmörtel folgende Eigenschaften aufweist:

- max. Fließfähigkeit
- thixotropes Verhalten (Viskosität nimmt infolge andauernder mechanischer Beanspruchung ab und erst nach beendigter Beanspruchung wieder zu.)
- Entmischungsstabilität
- dichtes Gefüge

Statt des damals verwendeten Quarzmehls $> 0,09\text{mm}$ wurde diesmal ein Quarzmehl $< 0,09\text{mm}$ benutzt. Infolgedessen erhöht sich der Anteil an Fließmittel von 0,7 auf 1,05 % v.Z. Außerdem kommt es wegen des höheren

Oberflächenanteils zu einem Anstieg der Gefügedichtheit, was mit Hilfe des Fließmittels „Sika ViscoCrete 1050“ kompensiert wurde.

Zusammensetzung Beton (Feinmörtel):

Art/Bestandteil	kg/m ³	g / 0,5 dm ³
Zement CEM III / A 42,5 N	950,0	475,0
Wasser	389,5	194,75
Steinkohlenflugasche	237,5	118,75
Quarzmehl < 0,09mm	465,1	232,5
w/z-Wert	0,41	0,41
FM Sika ViscoCrete 1050	1,05 % v.Z.	1,05 % v.Z.

Zusätzlich verwendete Arbeitsmittel für die Betonage:

- Holzschalung (Abmessungen Probekörper: 5 cm x 2,5 cm x 3 cm)
- Trennmittel (nur bei Kontrollprobekörper)
- Styrodur
- Pinsel (nur bei Kontrollprobekörper)
- Zwangsmischer (ca. 0,5 dm³ Füllinhalt)
- Waage
- Schüssel
- Messer, Spachtel
- Laserthermometer
- Schutzmaske, Schutzhandschuhe
- Betonkelle
- Abdeckfolie
- Gefrierschrank
- Ton (hauptsächlich feinkörnige Minerale)
- Sand (kinetischer Sand: 98% Quarzsand, 2% PDMS Polydimethylsiloxan)
- Feuchter gebrochener Sand (Körnung 0/2, Basalt)

Eigenschaften Schalungsmaterial

Kinetischer Sand:

Spezieller Modelliersand, der seine Form bei Einfluss von Feuchtigkeit verliert. Er ist werkseitig nicht staubend und trocknet auch auf Dauer nicht aus. Dieses Material hält seine Form auch ohne äußere Einwirkungen. Bei Kontakt mit der Hand „zerfließt“ er in der Hand und wird formbar.

Er besteht zu 98% aus reinem Quarzsand und zu 2% aus Polydimethylsiloxan, dieses Zusatzmittel ist ungiftig, chemisch inert, besitzt antibakterielle Eigenschaften und ist durch seine spezielle Oberflächenstruktur in der Lage Luftblasen abzuführen.

Ton:

Bei höherem Wassergehalt ist er plastisch verformbar, sowie belastbar. Beim Trocknen wird er spröde und kann weniger Lasten aufnehmen.

Gebrochener Sand:

Handelsüblicher gebrochener Sand der Körnung 0/2 aus Basalt in feuchtem Zustand leicht klebend, fest und formbar und hält bedingt seine Form. Senkrechte Flächen und positive Ecken lassen sich mit diesem Material schlecht modellieren.

Abbildung 1 Schalungen aus Ton und kinetischem Sand in Holzform



Vorgehensweise Betonage

1. Vorbereitung der Schalung:

Vor dem Betonieren müssen fünf Schalungen vorbereitet werden. Hierbei wird jeweils das entsprechende Schalungsmaterial in eine vorgefertigte Holzform (8 cm x 8 cm x 8 cm) eingebracht und die Oberfläche per Hand geglättet. Der Ton und auch der Modellersand enthalten eine Grundfeuchte, es ist darauf zu achten, dass diese bestehen bleibt.

Anschließend werden je eine Form mit Sand und eine mit Ton tiefgefroren. Der Versuchsaufbau des Probekörpers mit einer Schalung aus gebrochenem Sand wurde im Nachhinein durchgeführt, dafür wurde eine neue Betonmischung angesetzt. Die Probleme beim Aushärteverhalten des Betons lassen darauf schließen, dass bei der zweiten Mischung ein Fehler unterlaufen ist. Der gebrochene Sand wird zuerst befeuchtet, anschließend wird genauso verfahren wie bei den vorangegangenen Probekörpern.

2. Vorbereitung der Betonage:

Es ist wichtig, dass die für das Betonieren benötigten Holzschalungen schmutz- und staubfrei sind. Deshalb werden diese vor dem Betonieren mit Druckluft gereinigt. Damit der Beton sich beim Ausschalen gut aus der Schalung lösen lässt, wird diese vorher mit einer Trennfolie ausgekleidet bzw. der Probekörper mit der herkömmlichen Styrodurschalung mit einem Trennmittel beschichtet. Jeweils eine Form aus Sand und eine aus Ton werden bei -10°C tiefgefroren und nach 24 Stunden entnommen. Bei Erreichen einer Oberflächentemperatur von 0°C werden die Formen mit Beton gefüllt. Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur wird ein Laserthermometer zu Hilfe genommen. Die Formen, die bei Zimmertemperatur gelagert sind, können sofort mit Beton gefüllt werden.

3. Herstellung des Betons (Feinmörtels):

Für die Herstellung des gewünschten Betons werden zunächst die einzelnen Ausgangsstoffe (Tabelle: „Zusammensetzung Beton“) exakt abgewogen. Schutzkleidung wie Handschuhe und Staubmaske sind beim Abwiegen obligatorisch. Sind die Ausgangsstoffe abgewogen, so werden diese mittels Zwangsmischer zu einem dünnflüssigen Zementleim verarbeitet. Zuerst kommt Wasser mit dem sich bereits darin befindenden Fließmittel in den Mischer. Anschließend kommen die weiteren Bestandteile wie Zement und Quarzmehl hinein. Zuletzt wird noch die Flugasche hinzugegeben. Diese sorgt unter anderem dafür, dass die Hydrationswärme bei dem verwendeten „Hightech-Beton“ nicht zu hoch wird. Beim Mischen des Betons ist zu beachten, dass nach der Zugabe jedes Ausgangsstoffes zunächst kurz gemischt wird. Neben der Reihenfolge der Ausgangsstoffe ist auch die

Mischzeit wichtig. Denn erst nach ausreichender Mischzeit zeigt das Fließmittel seine Wirkung und der Beton lässt sich gut verarbeiten.

4. Herstellung der Probekörper:

Ist der Zementleim fertig hergestellt, so kann dieser in die vorbereiteten Schalungen gegeben werden. Aufgrund der Dünflüssigkeit des Materials muss er nicht gesondert verdichtet werden.

Ausschalen der Probekörper

Referenzkörper

Der Referenzkörper konnte aufgrund der Beschichtung der Schalung leicht gelöst werden.

Probekörper eins Ton-Schalung (20,8°C Oberflächentemperatur)

konnte unter zu Hilfenahme eines Spachtels grob vom Probekörper getrennt werden, am Beton befinden sich jedoch noch Rückstände von Ton, die nach einer Woche Trocknungszeit mit einer Bürste entfernt werden konnten.

Der Ton in unmittelbarer Nähe zum Beton ist stark verschmutzt und kann so nicht weiter verwendet werden, es entstand jedoch insgesamt weniger Abfall (38g Abfall) als bei Probekörper 2.

(Gewicht Schalung: 888g, Gewicht übriger Ton: 850g)

Probekörper zwei Ton-Schalung (-1,0°C Oberflächentemperatur)

Auch dieser Probekörper konnte mithilfe eines Spachtels grob vom Ton getrennt werden, am Beton befinden sich jedoch noch starke Rückstände, die nach einer Woche Trocknungszeit entfernt werden konnten. Das Ausschalen war schwieriger als bei Probekörper 1, da der Ton durch das Einfrieren rissig geworden ist und der Beton in diese geflossen ist; die Verbindung Beton - Schalung ist somit stärker. Der Ton in unmittelbarer Nähe zum Beton ist daher stärker verschmutzt und kann so nicht weiter verwendet werden.

(296g Abfall, Gewicht Schalung 896g, Gewicht übriger Ton 600g)

Probekörper drei kinetische Sand-Schalung (21,8°C Oberflächentemperatur)

Der kinetische Sand konnte nach dem Ausschalen per Hand sehr leicht vom Probekörper entfernt werden. Reste des Sands konnten ähnlich wie beim Ton nach einer Woche komplett entfernt werden. Für eine noch bessere Oberfläche wurde sie mit Sandpapier der Körnung 120 geglättet. Der Sand ist komplett ohne Beton-Rückstände und kann somit fast zu 100% weiter verwendet werden, es entsteht kein Abfall.

Probekörper vier kinetische Sand-Schalung (0,2°C Oberflächentemperatur)

Der gefrorene kinetische Sand konnte nach dem Ausschalen per Hand sehr leicht vom Probekörper entfernt werden. Reste des Sands konnten ähnlich wie beim Ton nach einer Woche komplett entfernt werden. Auch bei diesem Probekörper ist ein nachträglicher Schliff für eine höhere Oberflächengüte empfehlenswert. Der Sand ist komplett ohne Beton-Rückstände und kann somit fast zu 100% weiter verwendet werden. Das Ausschalen der Probekörper 3 und 4 ließ keinen nennenswerten Unterschied erkennen.

Probekörper fünf gebrochener Sand (21,8°C Oberflächentemperatur)

Der Probekörper ist nach einer Trocknungszeit von 7 Tagen noch nicht vollständig ausgehärtet. Die Oberfläche lässt sich mit dem Fingernagel eindrücken. Eine grobe Entfernung des Sandes ist möglich, jedoch muss der Beton erst noch weiter aushärten, um die Form nicht zu zerstören. Eine Ecke wurde bereits beim Ausschalen beschädigt. Es besteht Grund zu der Annahme, dass bei diesem Durchgang nicht das richtige Wasser-Zement Verhältnis eingehalten wurde. Der verbleibende Sand ist ohne Beton-Rückstände und kann somit weiter verwendet werden, es bleiben allerdings Sandrückstände am Probekörper, die nicht wiederverwendet werden können.

Auswertung der Ergebnisse

Nach dem Ausschalen der Probekörper werden diese auf ihre Oberflächenbeschaffenheit untersucht und miteinander verglichen. Außerdem wird dokumentiert, welche Porigkeit der Beton aufweist und wie exakt die gewünschte Form erreicht werden konnte.

Referenzkörper – Styrodur-Schalung

Der Referenzkörper ist mit einer Standard Schalung aus Styrodur hergestellt. Er soll als Vergleichsmaßstab dienen. Die Oberflächenbeschaffenheit des Betons ist glatt, allerdings weist der Beton auch eine hohe Porigkeit auf. Die gewünschte Quaderform wurde exakt erlangt, etwas ungenaue Kanten bzw. Ecken sind auf ein nicht exaktes ausschneiden der Form zurückzuführen.

Abbildung 2 Referenzkörper in Styrodurschalung



Abbildung 3 Referenzkörper ausgeschalt



Probekörper eins – Ton-Schalung (20,8°C Oberflächentemperatur)

Die Oberflächenbeschaffenheit des mit Ton ausgeführten Probekörpers ist sehr glatt. Poren auf der Betonoberfläche sind keine zu erkennen. Die Konturen und Kanten des Probekörpers sind nicht besonders exakt, was auf die Größe des Probekörpers zurückzuführen ist. Ein größerer Probekörper sollte einfacher und genauer herzustellen sein. Die Oberfläche ist sehr eben und spiegelt die glatte und ebene Schaloberfläche des Tons wider.

Abbildung 4 Probekörper eins (links), zwei (rechts)



Abbildung 5 Probekörper eins beim Ausschalen



Abbildung 6 Probekörper eins (links), Probekörper zwei (rechts)



Abbildung 7 Probekörper zwei beim Ausschalen



Probekörper 2 – Ton-Schalung (-1,0°C Oberflächentemperatur)

Die Oberflächenbeschaffenheit des mit gefrorenem Ton ausgeführten Probekörpers ist sehr rau und uneben, ähnelt einer gespachtelten Oberfläche. Poren auf der Betonoberfläche sind keine zu erkennen. Die Konturen und Kanten des Probekörpers sind sehr ungenau. Dies ist auf die Größe des Probekörpers zurückzuführen. Dieser hat nicht die gewünschte Form erlangt; die Ecken und Kanten sind nicht gut ausgebildet, die Oberfläche ist sehr uneben und wirkt wie gespachtelt. Dies ist begründet durch die rissige Struktur des gefrorenen Tons.

Fazit Ton:

Mit bei Raumtemperatur gelagertem Ton lässt sich der bessere Probekörper herstellen. Da Ton durch das enthaltene Wasser beim Einfrieren rissig wird und dies die Oberfläche der Schalung zum Nachteil hin beeinflusst.

Generell lässt sich mit Ton eine sehr glatte Oberflächenstruktur erzielen, auch ohne das Aufbringen eines Trennmittels auf die Schalung.

Probekörper drei – Sand-Schalung (21,8°C Oberflächentemperatur)

Die Oberflächenbeschaffenheit des dritten Probekörpers ist eine sehr raue, stark sandende Oberfläche, ähnlich wie Schleifpapier. Was auf Sandrückstände der Schalung zurückzuführen ist, um diese von der Betonoberfläche zu entfernen, wurde sie mithilfe von Schleifpapier (Körnung 500) gereinigt. Anschließend ist die Betonoberfläche sehr glatt und ebenmäßig. Poren im Beton sind keine zu erkennen. Die Konturen und Kanten des Probekörpers sind exakt. Kanten und Ecken sind lot- und fluchtgerecht. Die Oberfläche ist eben und gleichmäßig, jedoch sehr rau und körnig. Das spiegelt die sandige Schaloberfläche wider.

Abbildung 8 Probekörper drei und vier in Sand Schalung



Abbildung 9 Probekörper drei ausgeschalt



Probekörper vier – Sand-Schalung (0,2°C Oberflächentemperatur)

Der vierte Probekörper konnte ebenso leicht von der Schalung getrennt werden wie der Dritte. Auch die weiteren Eigenschaften des Probekörpers sind nahezu identisch zu Nummer drei. Der einzige Unterschied liegt darin, dass die Oberfläche weniger sandet, was durch das Schleifen bei Beiden komplett behoben werden konnte.

Abbildung 10 Probekörper vier beim Ausschalen



Abbildung 11 Probekörper vier ausgeschalt



Fazit Sand:

Sowohl mit gefrorenem als auch mit raumtemperiertem Sand lassen sich sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Exaktheit der erreichten Form und der Oberflächenbeschaffenheit erzielen.

Auch in puncto Verarbeitung liegt das alternative Schalmaterial Sand vorn. Von der Qualität der Oberfläche lässt das Einfrieren hier keinen nennbaren Unterschied erkennen und ist aufgrund des höheren Aufwands somit auch nicht empfehlenswert. Die Probekörper aus der Sandschalung ergeben eindeutig bessere Ergebnisse als aus den Ton Schalungen.

Probekörper fünf – gebrochener Sand-Schalung (21,8°C Oberflächentemperatur)

Das positive Ergebnis mit der Sandschalung wirft die Frage auf, ob mit normalem gebrochenem Sand auch so gute Ergebnisse erzielt werden können. Da die Verfügbarkeit und die Kosten hier wesentlich günstiger sind.

Deshalb wurde anschließend noch ein fünfter Versuch durchgeführt. Der Probekörper konnte nach einem Tag Aushärtungszeit jedoch nicht ausgeschalt werden, auf der Betonoberfläche hat sich Wasser gesammelt. Selbst nach einer Woche war der Beton noch nicht völlig ausgehärtet und konnte mit dem Fingernagel beschädigt werden. Beim Ausschalen ist eine Ecke des Betons abgebrochen.

Die Oberflächenbeschaffenheit des mit gebrochenem Sand ausgeführten Probekörpers ist sehr rau und stark sandend, vergleichbar mit grobem Schleifpapier. Poren auf der Betonoberfläche sind keine zu erkennen.

Die Konturen und Kanten des Probekörpers sind nicht exakt. Die grobe Körnung der Schalung befindet sich in der Betonoberfläche und lässt sich auch mithilfe von Schleifpapier nicht entfernen. Das Ergebnis dieses Versuchs ist zum Bauen eines Betonkanals mit den damit verbundenen hohen Anforderungen an die Qualität des Betons nicht brauchbar.

Abbildung 12 Probekörper fünf in gebrochener Sand Schalung



Abbildung 13 Probekörper fünf nach dem Ausschalen



Abbildung 14 Gegenüberstellung aller Probekörper
(von links: Referenzkörper, Probekörper drei, vier, eins, zwei)



Bewertung der Ergebnisse

Um eine Bewertung der getesteten Schalungen vornehmen zu können wurde eine Tabelle erstellt, in der die ökologischen Aspekte des Schalungsmaterials, die Herstellung der Schalung, sowie die Ergebnisse der Betonqualität gegenübergestellt sind.

Für jeden Aspekt konnten maximal drei Punkte erlangt werden. Hier hat sich gezeigt, dass der Sand im Hinblick auf die Ökologie wegen seiner Wiederverwendbarkeit des Schalungsmaterials besser abschneidet. Auch im Hinblick auf die Herstellung ist raumtemperierter Sand positiver zu bewerten. Bezüglich Kosten und Verfügbarkeit ist Ton die bessere Variante.

Es wäre zu klären, ob der Sand auch selbst im Labor hergestellt werden kann und ob dies dann kostengünstiger wäre im Vergleich zum teuren Modelliersand aus dem Künstlerbedarfsgeschäft.

Das Ergebnis der Betonqualität ist mit einer Sandschalung eindeutig besser. Alles in Allem geht die Schalung aus raumtemperiertem Sand als beste Variante der Gegenüberstellung hervor.

Tabelle 6

Bewertung der Ergebnisse

Untersuchter Aspekt	Ton 20,8°	Ton - 1,0°	Sand 21,8°	Sand 0,2°
Ökologische Aspekte				
Wiederverwendbarkeit	1	2	3	3
nachhaltiger Rohstoff	3	3	3	3
Schadstoffe	3	3	3	3
Summe Punkte	7	8	9	9
Herstellung				
Verarbeitung	2	2	3	3
benötigte Hilfsmittel (Werkzeug, Gefrierschrank, etc.)	2	1	3	2
Einfachheit der Herstellung	2	1	3	2
Gewicht Schalung	1	1	2	2
Benötigte Hilfskonstruktion für Schalung	2	2	1	1
Trennung Probekörper - Schalung	1	2	3	3
Negativ-Schalung	2	2	3	3
Positiv-Schalung	3	3	3	3
Nachbearbeitung der Oberfläche notwendig -1; nicht nötig - 3	2	1	1	2
Summe Punkte	15	14	21	19
Rahmenbedingungen				
Haltbarkeit	3	3	3	3
Verfügbarkeit	3	3	2	2
Kosten	3	3	1	1
Summe Punkte	9	9	6	6
Probekörper				
Oberfläche	3	1	2	3
Glattheit Oberfläche nach Nachbearbeitung	2	2	3	3
Formgenauigkeit	2	1	3	3
Summe Punkte	7	4	8	9
Gesamt Punktzahl	38	35	44	43

Ausblick

Im weiteren Vorgehen, könnte geprüft werden, ob herkömmlicher Sand tatsächlich aufgrund seiner Eigenschaften nicht als Schalungsmaterial geeignet wäre. Hier könnte es problematisch sein die ideale Feuchte, die der Sand haben müsste, herzustellen und konstant zu halten.

Das erzielte Ergebnis des gebrochenen Sandes könnte verfälscht sein, da es Probleme mit der Betonzusammensetzung gab. Hier wäre der Versuch noch einmal durchzuführen und die Ergebnisse zu überprüfen.

Des Weiteren wäre es denkbar, eine andere Sandkörnung zu testen und so das Ergebnis der Oberflächenbeschaffenheit zu optimieren.

Zusätzlich wäre zu prüfen, ob gefrorener Sand bessere Ergebnisse erzielen kann.

Außerdem müsste die Überlegung angestellt werden, wie die an sich geeigneten Schalungsmaterialien, Ton und kinetischer Sand in den Maßstab eins zu eins übertragen werden können.

Bei der Ton-Variante könnte eine grobe Kanu Form aus Ziegelsteinen, ähnlich dem Herstellungsprozess einer Kirchenglocke, welche abschließend nur noch mit einer relativ dünnen Schicht aus Ton verkleidet wird, um die finale Form herzustellen, funktionieren.

Gleiches könnte auch mit dem kinetischen Sand funktionieren, allerdings wären die Kosten hier ungemein höher als bei voriger Variante. Aus diesem Grund wäre es fraglich, ob die schlechte Wirtschaftlichkeit dieser Art der Schalungsherstellung die an sich guten Ergebnisse rechtfertigt oder alternativ der kinetische Sand selbst im Labor hergestellt werden kann. In diesem Schritt wäre die Zusammensetzung zu überprüfen, eventuell genügt auch ein geringerer Anteil an Polydimethylsiloxan zum kostengünstigen Quarzsand hinzuzufügen.

Bei einer Herstellung mit einer Positiv-Schalung wäre davon auszugehen, dass die Oberflächenbeschaffenheit der Schalhaut keine negativen Auswirkungen auf die Dichtheit und die Oberflächenbeschaffenheit des Betons und somit auf die Schwimmfähigkeit des Kanus haben wird. Da die äußerste Schicht und somit die „Schwimmhaut“ nicht in direktem Kontakt mit der Schalung steht.

Durch das Aufbringen eines sehr dünnflüssigen, fast lackartigen Betons als letzte Schicht, kann eine sehr glatte Oberfläche erzielt werden.

Weiter ist zu prüfen, ob die erarbeitete Herstellungsmethode mit der vorgesehenen Naturfaserbewehrung vereinbar ist und so ein ökologisches, schwimmfähiges Kanu entstehen kann.