

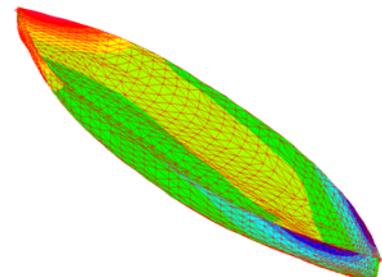
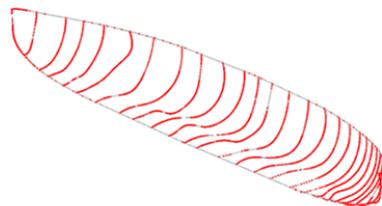
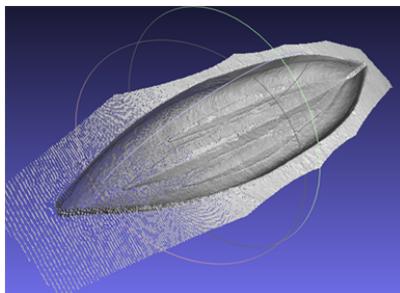


## 17. Betonkanuregatta in Heilbronn

### Bericht über die Konstruktion

des

„Ebbelwoi-Express“



## Inhaltsverzeichnis

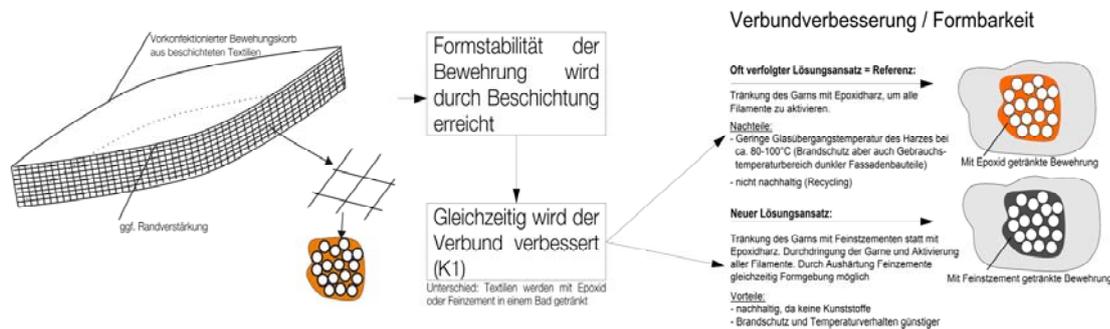
1	Allgemeines	1
1.1	Konstruktionsidee	1
1.2	Erläuterungen zur Namensgebung	2
2	Abmessungen, Gewicht und Auftriebsnachweis	3
2.1	Abmessungen und Skizze des Kanus	3
2.2	Gewicht	3
2.3	Auftriebsnachweis	3
3	Schalung, Bewehrung, Aussteifungen	4
3.1	Schalung	4
3.2	Bewehrung	4
3.3	Bemessung und Aussteifungen	6
4	Betontechnologische Umsetzung	6
4.1	Betonzusammensetzung	6
4.2	Bindemittel	8
4.3	Betonzusätze	8
4.4	Gesteinskörnung und Voruntersuchungen	9
5	Herstellung des Kanus	9
5.1	Herstellverfahren	9
5.2	Art der Auftriebskörper	9
6	Materialliste	9
7	Leitende Professoren und alle Mitwirkenden	10
8	Literatur und Quellen	10

## 1 Allgemeines

### 1.1 Konstruktionsidee

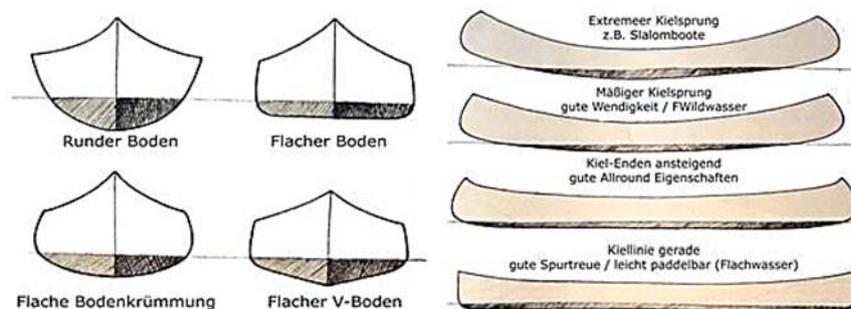
Die Studierenden sahen sich für die Teilnahme an der Betonkanuregatta 2019 vor verschiedenen Herausforderungen und haben diese im Laufe der Bearbeitungszeit bewältigt.

Die Nachhaltigkeitsidee stand bei der Auswahl der Baustoffe im Vordergrund. Ziel sollte sein, ein „Bauwerk“ zu erstellen, welches durchgängig aus einer Materialgruppe besteht, um die sortenreine Rezyklierbarkeit zu ermöglichen, d.h. für den Einsatz von Kunststoffen zur Bewehrungsaktivierung mussten Alternativen entwickelt werden. Zudem sollten mit Fokus auf Energie- und Ressourcenschutz die Primärrohstoffe durch Sekundärrohstoffe ersetzt werden. Für den Beton wurden rezyklierte Zuschläge verwendet und es wurde versucht, den Anteil an Portlandzementklinker möglichst gering zu halten. Als Bewehrungsmaterial wurden nach Voruntersuchungen mit Vliesen und Textilien aus Basalt- und Glasfasern Textilien aus Glasfaser ausgewählt. Bei der Beschichtung der Textilbewehrung wurde auf eine Epoxidharzbeschichtung verzichtet und, ökologisch sinnvoller, stattdessen eine Feinstzementsuspension eingesetzt. Hierbei gelang ein Beitrag zur Lösung des immer noch sehr aktuellen Problems von textilbewehrten Betonen – die Verbesserung des Verbunds von Multifilamentgarnen im Beton (Abb. 1). In Laborversuchen konnten deutlich verbesserte Verbundeigenschaften zwischen den Filamentgarnen und der Betonmatrix nachgewiesen werden. Die ansonsten mäßige Bewehrungsausnutzung konnte um ca. 37% gesteigert werden. Der Festigkeitsverlust über die Zeit, der bei AR-Glasbewehrung häufig thematisiert wird, wurde aufgrund der begrenzten Einsatzzeit des Kanus nicht weitergehend untersucht.



**Abb. 1: Beschichtung der textilen Bewehrung mit Feinstzement statt Epoxid**

Die Kanuform wurde aus dem Abguss eines Kunststoffkanus gewonnen (s. a. Abschnitt 3.1). Die Auswahl der Geometrie erfolgte hinsichtlich der in Abb. 2 dargestellten Einflüsse aus Kiellinie und Bauform auf die Eigenschaften des Kanus (Spurtreue, Lagestabilität etc.).



**Abb. 2: Kanutypen und -formen [1] als Vorüberlegungen zur Auswahl Kanugeometrie**

Ein Boot mit flachem Boden kann vergleichsweise leicht im Wasser gedreht werden. Bei ruhigem Wasser (auf dem Neckar der Fall) liegt es außerdem stabil im Wasser. Ein runder oder gekrümmter Boden hat den Vorteil, dass sich das Boot auch bei schräger Lage in unruhigen Gewässern nicht dazu neigt, zu kentern. Ein v-förmiger Boden sorgt dafür, dass das Kanu bei der Fahrt gut in seiner Spur zu halten ist. Die hier für den Bau gewählte Geometrie (siehe Abb. 3) ermöglicht es, die Vorteile der genannten Formen in idealer Weise zu vereinen. Dabei wurde aufgrund der ruhigen Wasserbedingungen vor Ort ein eher breites und flaches Profil gewählt. Trotzdem verhindert die leicht gekrümmte Form ein leichtes Kentern und die kleine Spitze am unteren Rand sorgt für Spurtreue. Darüber hinaus wirkt die Bodenform (Abb. 3, rechts) wie ein Faltenwerk und kann allein durch seine Geometrie Verformungen begrenzen. Als weiterer positiver Effekt wird durch die Faltenwirkung ein Durchstanzen des Kanubodens bei Punktlasten aus Personen verhindert.

Darüber hinaus wollten die Studierenden die Konstruktion des Kanus möglichst exakt mit Finite-Elemente-Berechnungen wissenschaftlich begleiten. Hierzu kam ein Laserscanningverfahren zur genauen Erfassung der Kanuschalungsform zum Einsatz, um hieraus ein digitales Modell zu erzeugen (s. Abschnitt 3.3).

## 1.2 Erläuterungen zur Namensgebung

Die Studierenden der FRA-UAS stammen zu einem hohen Anteil aus der Frankfurter Region. Diese Verbundenheit sollte in der Projektidee des Betonkanus thematisiert werden. Der aus diesen Überlegungen entstandene „Ebbelwoi-Express“ stellt untrennbar die Verbindung zwischen der Stadt Frankfurt und dem dortigen, fließenden Gewässer her. Damit ist nicht etwa der Main gemeint, sondern der regional sehr beliebte und über Hessen hinaus bekannte Apfelwein – oder mundartlich: „Ebbelwoi“. Der klassische Apfelwein wird aus einem so genannten Bembel ausgeschenkt und aus gerippten Gläsern getrunken. Außenhaut unseres Betonkanus bildet diese gerippte Struktur ab.

## 2 Abmessungen, Gewicht und Auftriebsnachweis

### 2.1 Abmessungen und Skizze des Kanus

Die Grenzwerte der Kanuabmessungen in der Wettbewerbsausschreibung wurden durch die gewählte Kanuform eingehalten (s. Abb. 3). Die Schalendicke beträgt 5 mm.

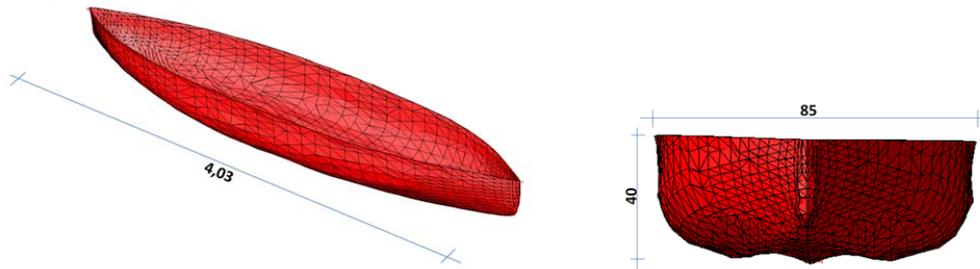


Abb. 3: Abmessungen der gewählten Kanuform

### 2.2 Gewicht

Das Kanu soll nach der rechnerischen Auslegung mit einer mittleren Schalendicke von 5 mm hergestellt werden, damit ergibt sich mit einer Rohdichtedichte des erhärteten Mörtels von  $1830 \text{ kg/m}^3$  und einer Schalensfläche von  $4,16 \text{ m}^2$  ein rechnerisches Gewicht von  $42,5 \text{ kg}$  (inkl. Aussteifungen). Unter Berücksichtigung von Produktionsungenauigkeiten und der Auftriebskörper aus Kork wird ein Gesamtgewicht von ca.  $65 \text{ kg}$  angenommen.

### 2.3 Auftriebsnachweis

Die Auftriebskraft kann anhand folgender Formel errechnet werden:

$$F_a = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot V$$

mit:

$F_a$  Auftriebskraft [kN]

$\gamma_{\text{Wasser}}$  Wichte von Wasser [=  $10 \text{ kN/m}^3$ ]

$V$  Volumen des verdrängten Wassers [ $\text{m}^3$ ]

Die berechnete Auftriebskraft muss größer als die Gesamtlast des Kanus sein, um ein Untergehen zu vermeiden.

#### a) Schwimmendes Kanu

Gesamtmasse (Kanu + 2 Kanuten):	265 kg (Annahme: Kanu 65 kg, 2 Kanuten à max. 100 kg)
Gewichtskraft $F_G$ :	2,65 kN
Rechnerische Grundfläche des Kanus:	$4,03 \times 0,85 \times 2/3$ (Völligkeit) = $2,3 \text{ m}^2$
Mittlerer Tiefgang:	0,18m (Annahme: 0,15 bis 0,20m Tiefgang)
Volumen des Verdrängten Wassers $V$ :	$0,41 \text{ m}^3 = (2,3 \text{ m}^2 \times 0,18 \text{ m})$
Auftriebskraft $F_a$ :	$F_a = 10 \text{ kN/m}^3 \times 0,41 \text{ m}^3 \approx 4,1 \text{ kN}$
Auftriebsnachweis:	$F_a > F_G \rightarrow 4,1 \text{ kN} > 2,65 \text{ kN}$ - Nachweis erbracht!

#### b) Untergegangenes Kanu

Gesamtmasse (Kanu ohne Kanuten) $G$ :	65 kg
Auszugleichende Gewichtskraft $F_G$ :	0,65 kN (unterer/oberer Wasserdruck hebt sich auf) + Zuschlag 0,5 kN (Ausschreibung) = 1,15 kN
Volumen der Auftriebskörper:	$V = F_G / \gamma_{\text{Wasser}} = 0,115 \text{ m}^3$

### 3 Schalung, Bewehrung, Aussteifungen

#### 3.1 Schalung

Die Schalung für den Ebbelwoi Express ist aus einem professionellen Kunststoff-Kanu entstanden. Hierfür wurde eine Negativ-Form des Kanus erstellt und diese mit einer glasfaserverstärkten Epoxidharz-Schicht nachgebildet. Diese wurde in eine Styrodur-Hülle eingebettet, die nun als Schalung dient. Zur Erstellung der Schalung wurde wie folgt vorgegangen (Abb. 4):

Mittels Glasfaserkunststoff konnte ein Kunststoffkanu abgegossen werden. Dazu diente als Hilfe ein zusammengesetzter Styrodurblock in welche die GFK-Abgussfigur eingeschäumt wurde. Daraus ergibt sich im gesamten eine verwendbare steife Schalungsform. Die oben erklärte Abgussfigur wurde durch ein Laserscan-Verfahren exakt aufgemessen und durch verschiedene rechnergestützte Bearbeitungsprozesse von einer Punktwolke in ein digitales Schalungs- und Schalenmodell überführt.

Durch ausbessern, spachteln und anschließendes schleifen, werden Unebenheiten ausgebessert und behoben.

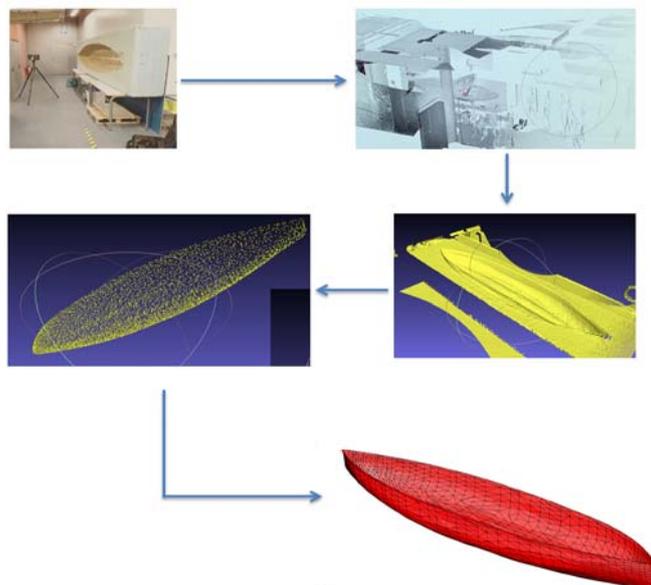


Abb. 4: Entwicklung der Schalung bis zum FEM-Modell

#### 3.2 Bewehrung

In Voruntersuchungen wurden mit Blick auf Nachhaltigkeit sowie Auswirkung auf den Produktionsprozess folgende Bewehrungen untersucht (Abb. 5):



Abb. 5: Untersuchte Bewehrungen

Bei den Versuchen an dem dichten Basaltfaservlies bestand die gesamte Bindemittelmatrix aus eingepresster Feinstzementsuspension. Bei den Glastextilvarianten wurde die ausgewählte Mischung aus Abschnitt 4.1 verwendet. Die Untersuchung der Tragfähigkeit erfolgte mit Zug- und Biegekörperversuchen an Streifenproben (Abb. 6). Die Versuche wurden mit einer Geschwindigkeit von 1,5 mm/min durchgeführt.



Abb. 6: Zug- und Biegekörperversuche

Die Versuche am injizierten Basaltfaservlies zeigten hohe Tragfähigkeiten. Das dichte Basaltvlies erfordert aber aufgrund der Injizierung einen hohen Schalungsaufwand bei der Herstellung des Kanus. Daher fiel die Entscheidung auf eine einseitige Schalung und die Verwendung von Glastextilien (ITA). Die Auswertung der Zugversuche an den Glasfasertextilien ist in Abb. 7 zu erkennen.

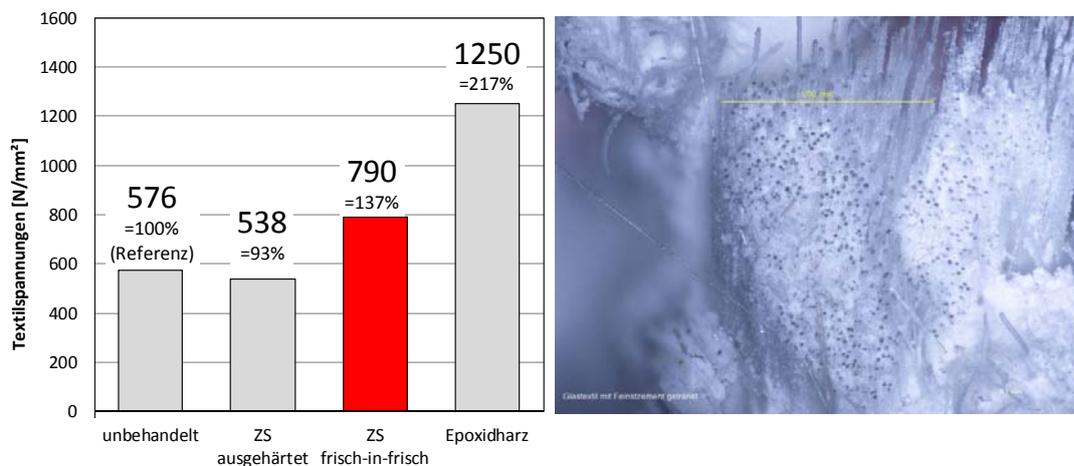


Abb. 7: links, Textilspannungen ermittelt aus Zugversuchen (Mittelwerte); rechts, Durchtränkung des Glastextils mittels Feinstzement, Aufnahme mittels Auflichtmikroskop

Um die Wirksamkeit der Multifilamente zu aktivieren, wurde das Glastextil in Feinstzement der Fa. Dyckerhoff (Mikrodur R-U) getränkt. Mikrodur R-U ( $\rho = 2,9 \text{ kg/dm}^3$ ) weist einen hohen Gehalt an Hüttensand auf und weist eine Korngröße von  $\leq 9,5 \mu\text{m}$  auf.

Die Variante mit Zementsuspension, getränkt und ausgehärtet zeigt keine Vergrößerung der Bruchspannung gegenüber der Referenz. Die Variante mit Zementsuspension, getränkt und frisch-in-frisch eingebaut weist eine deutliche Verbesserung der Bruchspannung auf (+37%). Durch die Tränkung mit Epoxidharz lässt sich die Bruchspannung gegenüber dem ungetränkten Textil verdoppeln (+117%). Zugunsten der Nachhaltigkeit und Rezyklierbarkeit wurde jedoch auf den Einsatz von Epoxidharz verzichtet und stattdessen die Variante Glastextil mit Zementsuspension, frisch-in-frisch eingebaut, gewählt. Mit dieser rein mineralischen Beschichtung lassen sich bereits bemerkenswerte Festigkeitssteigerungen erreichen.

### 3.3 Bemessung und Aussteifungen

Die Finite-Elemente-Methode dient der Berechnung des physikalischen Verhaltens von Strukturen, deren Geometrie mit klassischen Berechnungen wenn überhaupt, nur mit sehr großem Aufwand zu berechnen ist. Die Form wird mit Hilfe von endlich vielen Flächenelementen (Drei- oder Vierecke) angenähert. Nach Eingabe von Materialkennwerten, Randbedingungen und einwirkenden Lasten errechnet der Computer Spannungen, Verformungen und erforderliche Bewehrungen der untersuchten Bauteilstruktur.

Zunächst muss die Struktur modelliert werden. Mit Hilfe eines Laserscanners wurde eine Punktwolke der Schalung erstellt. So sollte die Form des Kanus möglichst exakt abgebildet und für die statischen Berechnungen digitalisiert werden. Danach waren mehrere Schritte notwendig, um die Punktwolke in eine Auto-CAD-Datei übertragen zu können: Die Anzahl der Punkte musste zunächst auf eine rechenbare Zahl reduziert werden, um damit dreieckige Modellflächen bzw. Flächenelemente zu generieren. Mit dem Finite-Elemente-Programm Dlubal RFEM [4] wurden zunächst Spannungen und Verformungen des Kanus unter dem Einfluss der verschiedenen Lastkombinationen ermittelt.

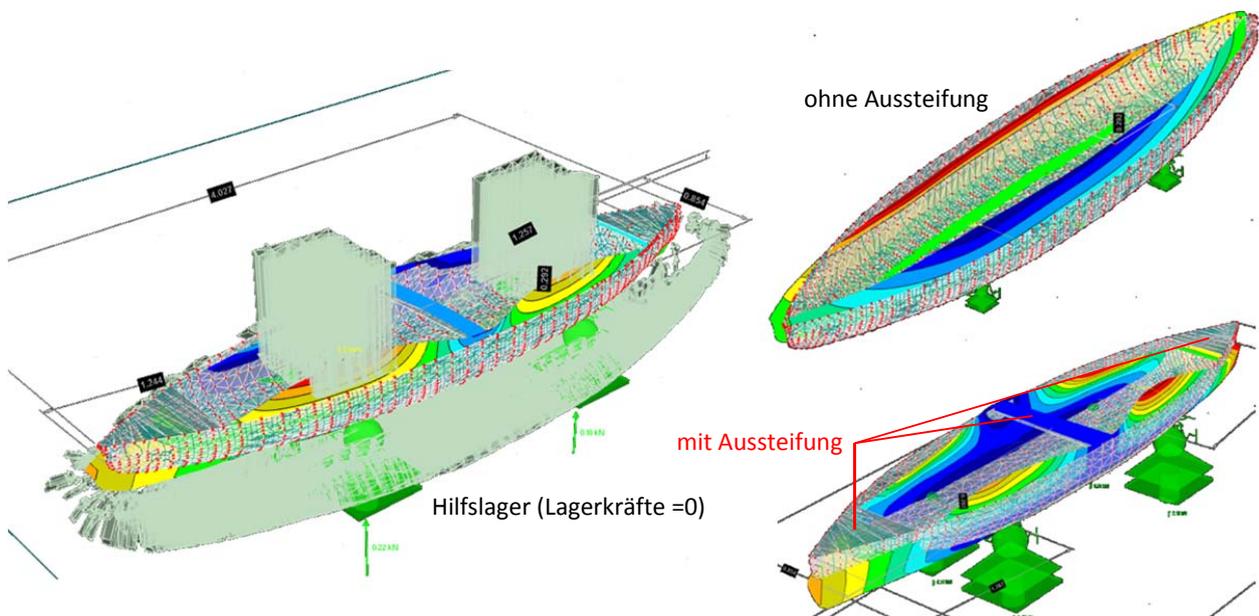


Abb. 8: Kanu mit Lastfällen (links) und Vergleich der Verformungen ohne und mit Aussteifungen (rechts)

Dabei mussten alle auftretenden Lastfälle simuliert werden, damit das Kanu später allen Belastungen (Ausfahren, Transport, Nutzung, Gleichgewichtslage im Wasser) standhält. Anschließend konnten unter Berücksichtigung der in den Versuchen ermittelten Materialkennwerte für Beton (Druckfestigkeit  $f_{cm,28d} = 38 \text{ N/mm}^2$ ) und Textilbewehrung (s. Abb. 7) Schlüsse auf die Dimensionierung der Querschnitte gezogen werden. Ergebnis der Bemessung (Abb. 8) ist eine mittlere Querschnittstärke von 5 mm und jeweils eine randnahe Bewehrungslage des mit Feinstzement getränkten Glastextils (Abb. 7,  $a_t = 0,88 \text{ cm}^2/\text{m}$  je Lage). Die Berechnung zeigt auch, dass unter einfachen Gebrauchslasten Risse nicht auszuschließen sind. Daher werden zusätzlich zur textilen Bewehrung noch randnahe Kurzfasermatten (Typ Duramat, Fa. Durapact) zur Begrenzung der Rissbildung platziert. Außerdem wurden Aussteifungen angesetzt und berechnet, um die Verformungen des freien Rands zu begrenzen (Abb. 8).

## 4 Betontechnologische Umsetzung

### 4.1 Betonzusammensetzung

Die Herstellung von Zement als wesentlicher Bestandteil des Mehrstoffsystems Beton oder Mörtel ist ein sehr aufwändiger und energieintensiver Prozess. Vor allem der Brennprozess bei sehr hohen Temperaturen

führt zu einem bedeutenden Energiebedarf und einem nicht zu vernachlässigenden Beitrag zum weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 5%. Durch Zusatzstoffe zum Zement oder Betonzusatzstoffe als Ersatz für den Portlandzementklinker oder den Zement durch Primär- oder Sekundärrohstoffe konnte die Energiebilanz sowie der Schadstoffausstoß in den letzten Jahrzehnten bereits deutlich reduziert werden. Eine gängige Methode den Zementanteil im Beton zu verringern ist es, Teile des Zements durch das Abfallprodukt Flugasche zu ersetzen. Jedoch ergibt sich auch hier ein Problem: Durch den geplanten Kohleausstieg wird das Nebenprodukt Flugasche irgendwann nicht mehr anfallen. Dementsprechend wurde für dieses Kanu die Aufmerksamkeit bei der Rezepturgestaltung auf Zusatzstoffe gelegt, welche zum einen die Flugasche ersetzen können, es zum anderen aber auch schaffen können, den Zement komplett zu substituieren. Dafür wurden Stoffe gesucht, die infolge geeigneter mineralogischer Zusammensetzung ähnliche Hydratationsprodukte entwickeln wie Zement. Hierfür kamen Metakaolin, Geopolymer, Papier- und Reisschalenasche in Frage [2],[5]. Zu Papierasche und Geopolymer konnten in diesem Semester keine Proben erstellt werden. Metakaolin entsteht als Abfallprodukt bei der Blähglasherstellung und trägt mit einer Partikelgröße von 10 µm im Zementleim zur Verfüllung der Zwischenräume der Gesteinskörnung bei. Reisschalenasche zählt zu den künstlichen Puzzolanen, die bei der Verbrennung von Reisschalen bei ca. 600 Grad entsteht.

Die Versuchsmatrix (Abb 9) stellt den Aufbau der systematischen Versuchsreihen dar. Es sind die Zielkonsistenzen, ermittelt nach DIN 1015-3 und die systematisch variierenden Parameter aufgeführt.

Ausgehend von der Ausgangsmischung mit Flugasche (grau) wurden die Mengen an Zusatzstoff, Wasser und Zement in kleinen Schritten modifiziert, bis die gewünschten Konsistenzen erreicht wurden. Die Flugasche wurde durch Metakaolin (grün) und Reisschalenasche (blau) ersetzt.

Das nachfolgende Diagramm (Abb. 10) zeigt die in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [6] ermittelte Druckfestigkeit der verschiedenen Rezepturen, die die gewünschten Zielkonsistenzen erreicht haben.

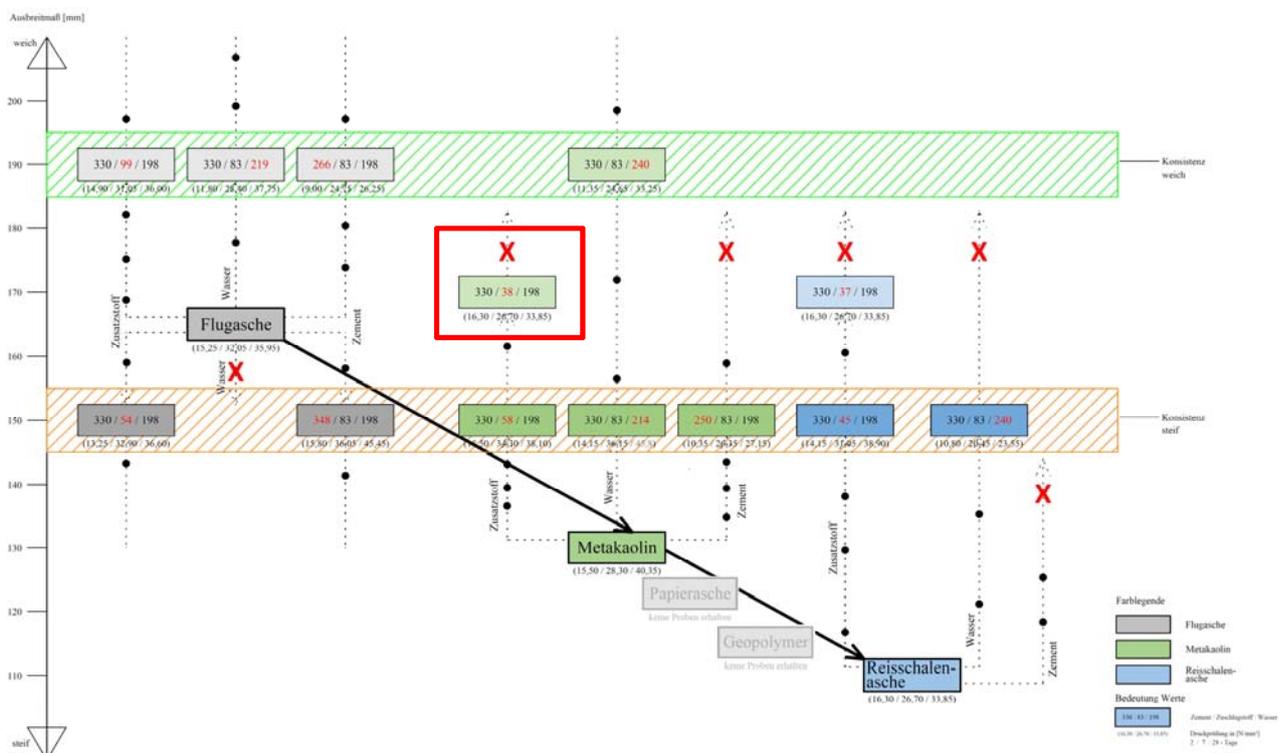


Abb 9: Versuchsmatrix der Betonuntersuchungen

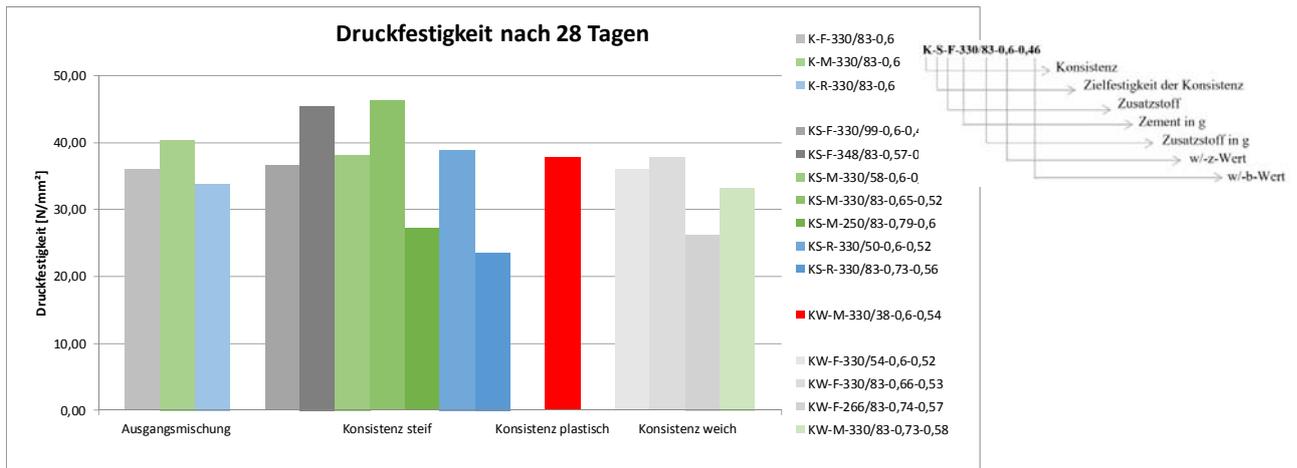


Abb. 10: Druckfestigkeitswerte ausgewählter untersuchter Mischungen nach 28 d, die gewählte Mischung für dieses Kanu weist eine plastische Konsistenz auf (vgl. Abb. 10, 11 rot). Die 28d-Druckfestigkeit wurde zu  $f_{c,28d} = 38 \text{ N/mm}^2$  ermittelt.

Ausgewählt wurde für die Verwendung in einer einseitigen Schalung eine Rezeptur mit plastischer Konsistenz (s. Tab. 1). Der Beton weist eine mittlere Druckfestigkeit von  $f_{cm,28d} = 38 \text{ N/mm}^2$  ( $f_{cm,2d} = 15 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{cm,2d} = 32 \text{ N/mm}^2$ ) sowie eine zugehörige Biegezugfestigkeit von  $f_{ctm,fl,28d} = 4,2 \text{ N/mm}^2$  auf. Der Wasserzementwert beträgt  $w/z = 0,60$ , der Wasserbindemittelwert  $w/b = 0,54$ .

Bestandteil	Dichte	Masse trocken
CEM III/A 42,5 N (na)	3,0 kg/dm <sup>3</sup>	655,5 kg/m <sup>3</sup>
Metakaolin	2,8 kg/dm <sup>3</sup>	75,5 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	1,0 kg/dm <sup>3</sup>	393,3 kg/m <sup>3</sup>
Rezykliertes Sand (0,09 – 0,5 mm)	2,2 kg/dm <sup>3</sup>	750,8 kg/m <sup>3</sup>

Tab. 1: Zusammensetzung des ausgewählten Betons

## 4.2 Bindemittel

Der CEM III/ A 42,5 N (na) der Firma Dyckerhoff („HOZ Doppel“) ist ein Zement, der durch gemeinsames Vermahlen von Portlandzementklinker, Hüttensand und Gips hergestellt wird [3]. Der Klinkergehalt ist auf 65 M.-% begrenzt. Durch seine flache Kornverteilung entstehen besondere Eigenschaften wie geringer Wasserbedarf, ausgeprägtes Wasserrückhaltevermögen, günstige Verarbeitbarkeit, leichte Verdichtbarkeit und hohe Dichtigkeit. Zudem liefert CEM III einen Beitrag zum Umweltschutz, da durch den Einsatz von Hüttensand fossile Brennstoffe eingespart werden und so die Emissionen vermindert werden.

Das Metakaolin der Firma poraver ist ein puzzolanischer Zusatzstoff auf Basis von amorphem Alumosilikat. Aufgrund dessen, dass es ein Abfallprodukt aus der Blähglasherstellung ist, erfüllt es die Anforderungen an Nachhaltigkeit, die an die Betonrezeptur gestellt wurden. Die zementähnliche Partikelgröße trägt im Zementleim zur Verfüllung der Zwickel der Gesteinskörnung im Gefüge bei und erhöht damit die Festigkeit der Matrix. Die Frühfestigkeit des Metakaolin ist eher gering, nimmt aber im Laufe der Zeit signifikant zu. Zudem verringert der Einsatz von Metakaolin die Porosität des Gefüges und erhöht somit die Dauerhaftigkeit.

## 4.3 Betonzusätze

Zugunsten der Nachhaltigkeit wurde auf ein Fließmittel in der Betonzusammensetzung verzichtet. Die erforderlichen Frisch- und Festbetoneigenschaften konnten durch die Rezepturoptimierung sichergestellt werden.

#### 4.4 Gesteinskörnung

Im Sinne der Nachhaltigkeit wurde rezyklierter Sand aus dem Recyclingwerk der Fa. Büttel GmbH in Worms als Gesteinskörnung ausgewählt. Die Korngröße wurde im Bereich von 0,09-0,5mm gewählt, um den Wasseranspruch und die Verarbeitbarkeit zu optimieren. Die benötigte Korngruppe wurde aus rezykliertem Betonsand 0/5 gesiebt.

### 5 Herstellung des Kanus

#### 5.1 Herstellverfahren

Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung war das Kanu noch nicht hergestellt. Als geplantes Herstellungsverfahren in der außenseitigen Schalung wird das Laminierverfahren eingesetzt. Dabei wird die Bewehrung (Glasfasertextil) zunächst in Feinstzement getränkt und dann frisch-in-frisch in die Frischbetonschicht eingelegt. Insgesamt wird der Querschnitt so von außen nach innen schichtweise in der Schalung aufgetragen.

#### 5.2 Art der Auftriebskörper

Um die Nachhaltigkeit als durchgängiges Konzept zu verfolgen, werden die Auftriebskörper aus Kork hergestellt. Die Korken wurden in den in der Gastronomie gesammelt. Die Boje soll ebenfalls aus Kork erzeugt werden.

### 6 Materialliste

Wir bedanken uns bei den nachstehend erwähnten Firmen für die Unterstützung und die Materialspenden:

Material	Einheit	Menge
Betonzusammensetzung		
CEM III/A 42,5 N (na) (Dyckerhoff)	kg	22,7
Metakaolin (poraver)	kg	2,6
Wasser	kg	13,6
Rezyklierter Sand (0,09–0,5 mm), Büttel GmbH	kg	26
Bewehrung		
AR-Glastextil (ITA, RWTH Aachen, 390 g/m <sup>2</sup> )	kg	4,0
AR-Glas-Kurzfasermatte (Durapact, 120 g/m <sup>2</sup> )	kg	0,5
Feinstzement Mikrodur R-U (Dyckerhoff)	kg	4
Sonstiges		
Auftriebskörper / Boje aus Kork (0,15 g/cm <sup>3</sup> )	kg	17,3/~3
Knieunterlage (nicht aussteifende, nicht lastverteilende Korkplatten)	kg	2

Tab. 2: Planung des Materialeinsatzes

## 7 Leitende Professoren und alle Mitwirkenden

### Leitende Professoren / Ausbilder:

Prof. Dr.-Ing. Petra Rucker-Gramm, Prof. Dr.-Ing. Michael Horstmann, Dipl.-Ing. Martin Beberweil, M.Eng. Dominik Nagel

### Studierende:

Elisabeth Schäfer, Kübra Durna, Lucas Arthen, Ljubica Galic, Dominik Bukovsak, Ali Ihsan Cakmakci, Jaqueline Tejada y Perez, Jacqueline Mirocha, Amal Suleiman (Ruderer), Janik Amthor, Madeleine Brüssau (Kapitän), Marvin Meschkat (Kapitän), Sascha Rumpeltes, Tim Giehl, Yannick Jochmann, Valentin Schaffer (Ruderer),

Vorarbeiten im WS 2018/2019: Ekaterina Frese, Ioannis Patras, Dennis Tränkle, Jwan Yousif, Hasan Tüm, Milica Zaric, Anastassija Genzel, Soraya Kochsiek, Sascha Wende, Lasse Leichthammer, Miriam Röcker, Tobias Albrecht, Tobias Weiler, Antonio Grohse

## 8 Literatur und Quellen

- [1] [www.kanuten.com](http://www.kanuten.com)
- [2] Röser, F.: Über die Reaktivität von Betonzusatzstoffen – Ein versuchsbasiertes Hydratationsmodell. Dissertation Universität Darmstadt, 2018.
- [3] [www.phoenix-zement.de](http://www.phoenix-zement.de)
- [4] RFEM5: FEM-Programm der Fa. Dlubal, Version 5.10.
- [5] Herbst, Rübner, Weimann: Möglichkeiten der Nutzung industrieller Reststoffe im Beton. S. 303 ff.
- [6] DIN EN 12390-3: Prüfung von Frischbeton – Teil 3: Druckfestigkeiten von Probekörpern. Beuth Verlag GmbH. Berlin. 2017