This project has received funding from the Eurostars-2 joint programme with co-funding from the European Union Horizon 2020 research and innovation programme

Schlussbericht zum Vorhaben

„Entwicklung und Pilotherstellung von Geopolymerbeton mit recyclebarer Wachsschalung für verschiedene Betonieren-Technologien (Guss-, Laminier- und Spritztechnologie)“

im Rahmen des Eurostars Projekts

Robocrete

„Robotergestützte Herstellung von recyclebarer Wachsschalung für nachhaltige Geopolymerbeton-Bauteile Gesamtprojekttitel“

Falk Martin, Manuel Vöge

BNB Beton- und Naturstein Babelsberg GmbH
Walter-Klausch-Str. 17A
14482 Potsdam

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2040B
Projektlaufzeit: 01.10.2020 – 19.03.2024

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzbericht 2
1.1 Aufgabenstellung / Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand 2
1.2 Ablauf der Arbeitspakete und Beitrag BNB in Kurzform 3
1.3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit 4
2 Ausführlicher Sachbericht 5
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 5
2.1.1 Verwendung der Zuwendungen 5
2.1.2 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 5
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 19
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 19
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 20
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritte auf den Gebiet bei anderen Stellen 20
2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 21
3 Referenzen 22

1 Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung / Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

Im Projekt „Robocrete“ arbeitet BNB Potsdam in einem internationalen Konsortium zusammen mit dem Institut für Tragwerksentwurf (ITE) der Technischen Universität Braunschweig und dem Bauroboterunternehmen Odico A/S aus Odense, Dänemark an der Entwicklung des HyperCrete-Robotersystems. Dieses System ermöglicht die automatisierte Herstellung von Schalungen für individualisierte Betonfertigteile und kombiniert hierzu innovative Technologien der Konsortialpartner zu einer robotischen Fertigungseinheit:

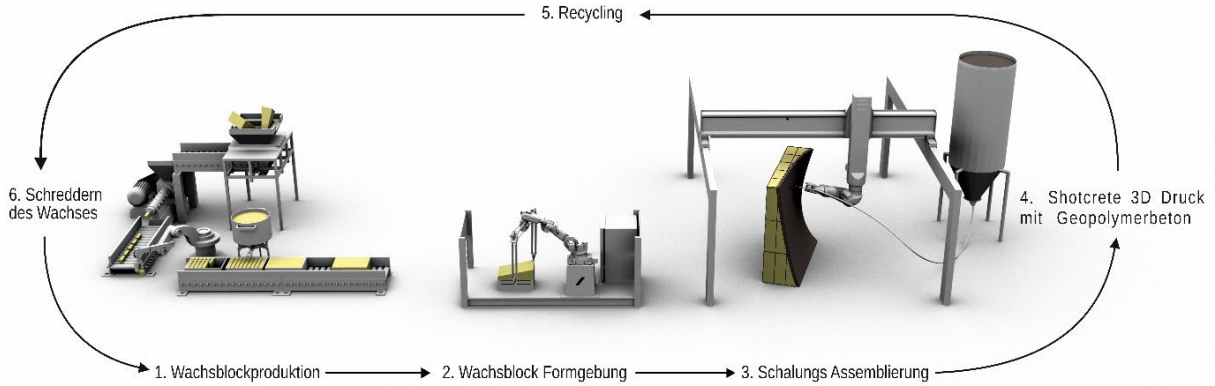

Abbildung 1 Diagramm zu Robocrete’s Hypercrete

Die vom ITE entwickelte Non-Waste-Wachsschalungstechnologie ermöglicht eine abfallfreie Fertigung von hochpräzisen Schalungen für individualisierte qualitativ hochwertige Betonbauteile, indem Wachsblockrohlinge CNC-gefräst werden und als Schalung für die Betonabformung genutzt werden, dabei entstehende Wachsspäne und ausgediente Wachsschalungen werden zu 100% dem Recyclingprozess zugeführt. Die Wachsschalungstechnologie wurde bereits in einigen Forschungsprojekten am ITE grundlegend und auf die industrielle Anwendung bezogen erforscht [1-5]. Jedoch fehlten Lösungen zu Methoden zur Herstellung von im Volumen skalierbaren riss- und spannungsfreien Wachsblockrohlingen, Untersuchungen zur Verbesserung der Wachsmischung durch Hinzugabe von Füllstoffen und Untersuchungen zur Verbesserung der Wachsschalungsoberfläche, um die höchste Sichtbetonqualität bei der Abformung mit Beton zu erreichen. Die Referenzsammlung (siehe 4 Referenzen) dient hier der Einordung des Stands der Forschung und Technik zur Wachsschalungstechnologie.

Odico, spezialisiert auf die robotische Fertigung von Schalungssystemen, entwickelte die „Factory on the Fly“, die mit einem abrasiven Schneiddraht robotergesteuert EPS-Blöcke formgebend zur Nutzung als Schalung schneidet. Im Robocrete-Forschungsprojekt wurden Untersuchungen durchgeführt, ob das abrasive Drahtschneiden auch für die formgebende Bearbeitung von Wachblockrohlingen genutzt werden kann, um den Formgebungsprozess deutlich zeiteffizienter zu gestalten. Die von Odico angestrebte Hypercrete-Fertigungseinheit zielte auf die vollautomatische Produktion von Wachsblockrohlingen und die vollautomatische formgebende Bearbeitung. Hierfür kommen das vom ITE untersuchte Wachs-Füllstoff-Komposit sowie die optimierten Methoden zur Herstellung von großformatigen Wachsblockrohlingen zum Einsatz.

Das ITE führte außerdem Untersuchungen zur Kombination der Wachsschalungstechnologie und dem am ITE entwickelten Spritzbeton-3D-Druck-Verfahren (SC3DP) durch. BNB entwickelt hierfür eine CO2-reduzierte, basaltfaserverstärkte Betonmischung. Die Herstellung dünnwandiger, glasfaserverstärkter Fassadenelemente mit manuell aufgetragenem Spritzbeton ist eine etablierte Fertigungsmethode auf konventionellen Schalungstechnologien. Die Kompatibilität des robotisch aufgetragenen Spritzbetons auf Wachsschalung wurde bisher nicht untersucht. Diese Untersuchungen zielten auf die vollautomatische digitale Fertigung hochpräziser, dünnwandiger Fassadenelemente unter Vermeidung jeglicher Schalungsabfälle. Es war vorgesehen, zum Ende des Forschungsprojektes die hier entwickelte Hypercrete-Fertigungseinheit bei BNB als erstem industriellen Anwender in die Produktionslinien für freigeformte Betonbauteile zu integrieren.

1.2 Ablauf der Arbeitspakete und Beitrag BNB in Kurzform

Die Arbeitspakete des Projekts sind:

AP 1: Projektmanagement: BNB unterstützte das Konsortium in der Risikoeinschätzung und Projektsteuerung.

AP 2: Wachs-Füllstoff-Komposit und Optimierung der Wachsblockrohling-Herstellung: Das ITE untersuchte Füllstoffe zur Verbesserung der Schneidfähigkeit mittels Schneiddraht (AP3), Nutzung als Schalung für die Betonage und zur Kostensenkung des Wachses. Drei neue Methoden zur Herstellung großer, rissfreier Wachsblöcke wurden erfolgreich erforscht. BNB unterstütze die Arbeiten.

AP 3: Abrasives Schneiden von Wachs: Mit dem entwickelten Wachs-Füllstoff-Komposit sollte das Schneiden mit diamantbesetztem Draht erprobt werden. Da das abrasive Drahtschneiden von Wachs keinen Erfolg versprach, verlagerte sich der Fokus auf CNC-Fräsbearbeitung, um die Effizienz des bisher ineffizienten Schlichtfrässchrittes durch parametrisierte Fräsbahnplanung zu erhöhen. Dieses Arbeitspaket wurde von Odico geleitet und vom ITE mit dem langjährigen Forschungswissen der Wachsschalungstechnologie und Versuchsdurchführungen an der TU BS maßgeblich unterstützt.

AP 4: Gießen und Sprühen von Geopolymerbeton: BNB entwickelte Geopolymerbetonmischungen, die für den Betonguss auf Wachsschalung kompatibel sind. Schwierigkeiten mit der Pumpbarkeit des Geopolymerbetons führten zur Entwicklung eines alternativen, CO2-reduzierten Feinkornbetons auf Basis von Celitement für das SC3DP-Verfahren. Das Arbeitspaket wurde vom ITE mit klein- und großmaßstäblichen Versuchen begleitet und das SC3DP- Verfahren auf Wachsschalung mit der Entwicklung eines parametrisierten 3D-Druck-Skript für den Spritzbetondruck auf Wachsschalung an der TU BS erfolgreich untersucht.

AP 5, 6 und 7: Diese Arbeitspakete wurden begonnen und von BNB wie vorgesehen unterstützt. Auf Grund der Insolvenz des verantwortlichen Forschungspartners Odico konnten diese Arbeitspakete jedoch nicht abgeschlossen werden. Teilergebnisse sind aufgrund des laufenden Insolvenzverfahrens unter Verschluss.

AP 5: Integration und Systemdesign: Ziel dieses Arbeitspaketes unter der Leitung von Odico war die Entwicklung eines HyperCrete-Prototyps, die die Herstellung und formgebende Bearbeitung der Wachsblockrohlinge zur anschließenden Nutzung als Schalung für die Betonage vollständig automatisieren sollte.

AP 6: Pilotproduktion des Geopolymerbetons: Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung und Herstellung eines Demonstrators im 1:1 Maßstab in enger Zusammenarbeit des gesamten Konsortiums.

AP 7: Zertifizierung und IP-Management: Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die CE-Zertifizierung für den Hypcrete-Prototypen und das Vergabemanagement von Lizenzen.

AP 8: Beschichtung der Wachsschalung: Im Rahmen einer Projektverlängerung untersuchte das ITE Möglichkeiten zur Beschichtung der Wachsschalung, um die Oberflächenqualität für Sichtbeton zu optimieren. Das ITE konnte Beschichtungssysteme identifizieren, die auf die Wachsschalungsoberfläche zur Oberflächenqualitätsverbesserung untersucht werden, die zu einer erheblichen Verbesserung der ausgeschalten Betonoberfläche führten.

1.3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit

Im Projekt „Robocrete“ hat BNB mehrere CO2-reduzierte Feinkornbetonmischungen entwickelt. Die Mischungen auf Basis eines Geopolymerbetons waren für das Laminieren und Gießen geeignet. Schwierigkeiten bei der Pumpbarkeit der Geopolymerbetonmischung für das SC3DP-Spritzbetonverfahren erforderten ein alternatives Bindemittel. Hierfür wurde Celitement gewählt, welches abermals in Laborversuchen bei BNB getestet und im SC3DP-Spritzbetonverfahren am ITE der TU BS erfolgreich angewandt wurde.

Hierfür steht ein digitaler, vollautomatischer Fertigungsprozess zur Verfügung: Die Kombination der vollautomatischen Wachsschalungsproduktion mit dem vollautomatischen SC3DP-Spritzbetonverfahren ermöglichten eine vollautomatisierte Fertigung komplexer, dünnwandiger Fassadenelemente in einem innovativen digitalen Arbeitsablauf. Hierzu wurden von Odico hocheffiziente parametrisierte Frässtrategien entwickelt die am ITE integriert und umgesetzt wurden. Die entwickelten Frässtrategien konnten die Fräszeit um bis zu 95 % gegenüber konventionellen CAM-Fräsmethoden reduzieren und wurden am Digital Building Fabrication Labority (DBFL) des ITE zur Herstellung dünnwandiger, ornamentierter Fassadenelemente aus basaltfaserverstärktem Beton angewandt. Hierbei ermöglichten als geeignet identifizierte und erprobte Beschichtungen der Wachsschalungsoberfläche eine Annäherung an die höchste Sichtbetonqualität der ausgeschalten Fassadenelemente.

2 Ausführlicher Sachbericht

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 Verwendung der Zuwendungen

Die Zuwendungen wurden planmäßig abgerufen und entsprechend der Vorgaben verwendet. Abweichungen zu den zweckmäßigen Bestimmungen der Zuwendungen wurden innerhalb des Konsortiums und mit dem Projektträger DLR abgestimmt.

Das Forschungsprojekt begann am 01.10.2020 und wurde kostenneutral vom ursprünglichen Abschlussdatum 01.11.2023 bis zum 30.06.2024 verlängert. Mit Bekanntmachung der Insolvenz des Forschungspartners Odico endete das Forschungsvorhaben am 19.03.2024 vorzeitig.

2.1.2 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Abschnitte AP 2, 3 und 8 wurden aus dem Bericht der TU Braunschweig, nach Rücksprache mit Prof. Hack und Sven Jonischkies, übernommen.

AP 1: Projektmanagement

Ursprüngliche Zielsetzung: Ziel des Arbeitspakets Projektmanagement war es, sicherzustellen, dass alle Aktivitäten während der aktiven Projektphase zwischen den drei Konsortialpartnern koordiniert werden, um zu gewährleisten, dass Informationen und Entscheidungen reibungslos zwischen den Partnern und anderen relevanten Interessengruppen ausgetauscht werden. Das Projektmanagement überwachte auch die Einhaltung von Zeitplänen und Budgets.

Ergebnis: BNB hat bei der Überwachung von Projektrisiken, der Bewertung von kritischen und unkritischen Entscheidungspunkten, und bei der Einleitung von Abhilfemaßnahmen bei Problemen unterstützt.

AP 2: Wachs-Füllstoff-Komposit und Optimierung von Wachsblockrohling-Herstellung

Basierend auf den Grundlagen der am ITE entwickelten Non-Waste-Wax-Formwork-Technologie war es das Ziel dieses Arbeitspaketes, die Wachsschalungstechnologie in einen geeigneten industriellen Prozess zu überführen und damit die anwenderspezifischen Anforderungen der Industriepartner Odico und BNB im Hinblick auf hohe Oberflächenqualität, einfache Handhabung, Skalierbarkeit, Kosteneffizienz und Recyclingfähigkeit zu erfüllen. Im Mittelpunkt stand die Weiterentwicklung des Wachses selbst und des Verfahrens zur Herstellung von großformatigen Wachsblockrohlingen.

Um dies zu erreichen, wurde das AP in drei Teilarbeitspakete unterteilt:

Teilarbeitspaket AP2.1: Verbesserung des Wachs-Material-Systems

Ursprüngliche Zielsetzung: Vorbereitend auf AP 3 – Formgebung des Wachses durch abrasives Schneiden – und AP 4 – Verwendung von Geopolymerbeton auf Wachsschalung – war das Ziel, die bisher verwendete ConFormWax (CFW)-Rezeptur weiterzuentwickeln und mit verschiedenen Füllstoffen zu einem Wax-Füllstoff-Komposit zu ergänzen. Um den harten Bedingungen in Fertigteilwerken und auf der Baustelle sowie der hohen kinetischen Energie des Spritzbetonprozesses standzuhalten, sollte das Wachs robuster sein und eine höhere spezifische Oberflächenhärte aufweisen. Außerdem sollte die Klebeneigung des Wachses reduziert werden, um sicherzustellen, dass

der diamantbesetzte Schneidedraht beim Schneiden nicht verklebt und die Sägespäne entfernt werden.

Ergebnisse:

Ziel der Entwicklung des Wachs-Füllstoff-Komposits (WFK) ist, ein Material zu konzipieren, das sich sowohl mit einem rotierenden abrasiven Schneiddraht (AP 3) als auch mit der präzisen CNC-Fräsformgebung hochpräzise ohne weitere Nachbearbeitungsschritte wiederholt bearbeiten lässt. Dies machte es erforderlich, Füllstoffe zu verwenden, die wiederholten Bearbeitungsprozessen standhalten, ohne strukturelle Veränderungen oder Beschädigungen zu zeigen. Die Auswahlkriterien führten dazu, dass insbesondere pulverförmige und feinkörnige Füllstoffe in den Untersuchungen verwendet wurden. Insgesamt wurden 23 potenzielle Füllstoffe hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Diese Auswahl orientierte sich überwiegend an Füllstoffen, die in der Kunststoffverarbeitung etabliert sind, wurde jedoch auch um alternative Materialtypen erweitert. Die geprüften Füllstoffe umfassten mineralische sowie organische Verbindungen. Sieben der Füllstoffe erwiesen sich als grundsätzlich geeignet; von diesen wurden vier für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt, da sie die erforderlichen Eigenschaften in den Bereichen Gießprozess, Fräsverhalten, Recyclingfähigkeit und Betonierbarkeit erfüllten: Circosil, Calciumcarbonat, Kalksteinmehl und Talkum.

Zunächst wurde der maximale Anteil des Füllstoffes im Wachs-Füllstoff-Komposit ermittelt. Auf Basis von Fräsversuchen, die eine gewisse Tendenz zur Agglomeration der Füllstoffe im Wachs aufzeigten, wurden mit diesen vier Materialien weitere Versuche zur Optimierung der Mischhomogenität durchgeführt. Dabei wurden Proben mit einem verringerten Füllstoffanteil untersucht und erneut mit Fräsversuchen auf die Homogenität des Wachs-Füllstoff-Komposits überprüft. Diese Proben zeigten eine spürbare Reduktion der Agglomerationstendenzen. Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurde anhand der besten Mischungsverhältnisse ein Mischungsverhältnis empfohlen, indem weniger als das maximale Mischungsverhältnis und damit geringere Füllstoffanteile eingesetzt wurden, um eine gleichmäßige Durchmischung zu fördern, anstatt den maximal möglichen Anteil auszuschöpfen.

Diese angepassten Wachs-Füllstoff-Komposite dienten anschließend als Grundlage der formgebenden Bearbeitung mit dem abrasiven Schneiddraht (AP 3). Die Proben wurden schließlich einer detaillierten Prüfung unterzogen, um die Eignung für eine präzise und formgebende Bearbeitung zu bewerten.

Teilarbeitspaket AP2.2: Extrusion und Verguss von Wachsbarren

Ursprüngliche Zielsetzung: Große Wachsblöcke konnten bisher nicht direkt in einem Arbeitsgang gegossen werden, da durch die inhomogene Abkühlung eine hohe thermische Schrumpfung auftritt, die starke innere Spannungen verursacht. Die vom ITE entwickelte Lösung für diese Herausforderung besteht darin, den Wachskörper in kleinere, bereits abgekühlte Wachstafeln (ungefähre Abmessungen von 1200 x 400 x 100 mm) zu unterteilen, die dann mit heißem, flüssigem Wachs zu einem Wachsblockrohling vergossen werden. Die verbleibenden technischen Herausforderungen bei diesem Ansatz bestanden jedoch darin, die Vermeidung von Lufthohlräumen sowie die vollständige Haftung während des Vergusses der Wachstafeln sicherzustellen.

Teilarbeitspaket AP2.3: Herstellung großer Wachsblöcke

Ursprüngliche Zielsetzung: In diesem Teilarbeitspaket sollte eine Methode zur Herstellung großformatiger riss- und spannungsfreier Wachsblockrohlinge untersucht werden, indem Wachsblöcke hochpräzise in einem Kerzenextruder stranggepresst werden und nach Platzierung in einer Gussform miteinander vergossen werden. Diese Methode zur Produktion von Wachsblockrohlingen versprach einen hohen Grad an Automatisierbarkeit.

Ergebnisse: Zur Herstellung von spannungsfreien, großformatigen Wachsblöcken wurden drei unterschiedliche Methoden entwickelt. Für die großmaßstäbliche Untersuchung dieser Methoden wurde ein Schmelzkessel mit einem Fassungsvermögen von etwa 200 Litern Wachs beschafft.

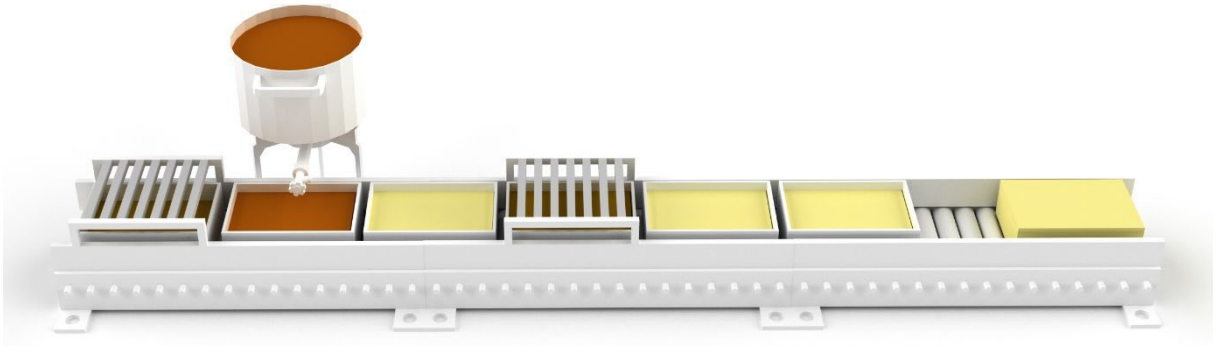

Abbildung 2 Diagramm zu Methode A zur Produktion von Wachsblockrohlingen

Methode A basiert auf dem schichtweisen Vergießen von Wachs, wobei jede Schicht zu einem homogenen Verbund erstarrt. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die Volumenkontraktion während des Abkühlens in zeitlich versetzte Phasen zu unterteilen, wodurch die Kontraktion insgesamt besser ausgeglichen werden kann. Hierbei wird untersucht, wie durch die Aufrauhung der Oberfläche der abgekühlten Wachsschichten eine bessere Verbindung zwischen den Schichten erzielt werden kann. Auf diese aufgerauten Oberflächen wird dann eine weitere Schicht flüssigen Wachses aufgebracht, die zusammen mit der darunterliegenden Schicht erkaltet. Durch diese Technik werden Schichttrennungen, sogenannte „cold joints“, verhindert, die sonst während des Fräsprozesses durch die Rotation des Werkzeugs Scherkräfte erzeugen und zu Abplatzungen im Zwischenbereich der Schichten führen könnten.

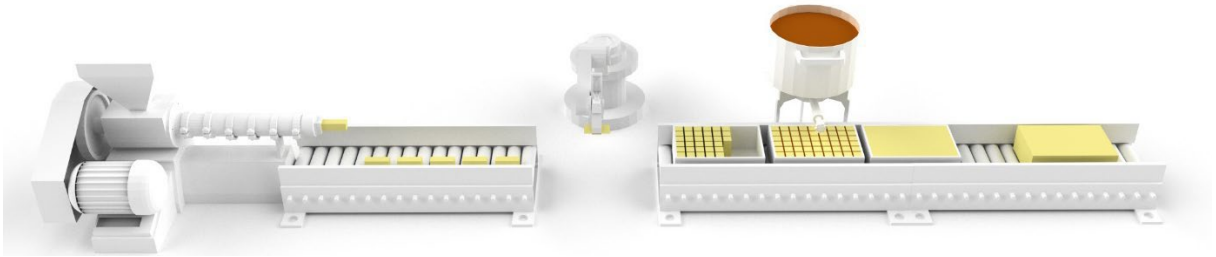

Abbildung 3 Diagramm zu Methode B zur Produktion von Wachsblockrohlingen

Methode B befasst sich mit dem Vergießen von stranggepressten Wachsbarren und entspricht der eigentlichen Zielsetzung des Teilarbeitspaket 2, die in einem definierten Abstand zueinander vertikal in eine Schalung eingelegt werden. Diese Barren werden anschließend mit flüssigem Wachs zu einem Verbund vergossen. In Zusammenarbeit mit dem Kerzenhersteller Erich Kopschitz GmbH (Kopschitz-Kerzen) konnte die Extrusion getestet und die Extrusionsfähigkeit des CFW-Wachses bestätigt werden. Diese Methode baut auf den Erkenntnissen zur Vergusstechnik von Wachstafeln auf, die in der Dissertation „Non-Waste-Wachsschalungstechnologie“ beschrieben wurden [1]. Statt der arbeitsintensiven Herstellung von Wachstafeln wird hier die schnelle serielle Produktion von extrudierten Wachssträngen genutzt. Dadurch wird der Produktionsprozess von Wachsblockrohlingen beschleunigt, da der hohe Anteil bereits erkalteten Wachses zu einer Verkürzung des Abkühlprozesses führt.

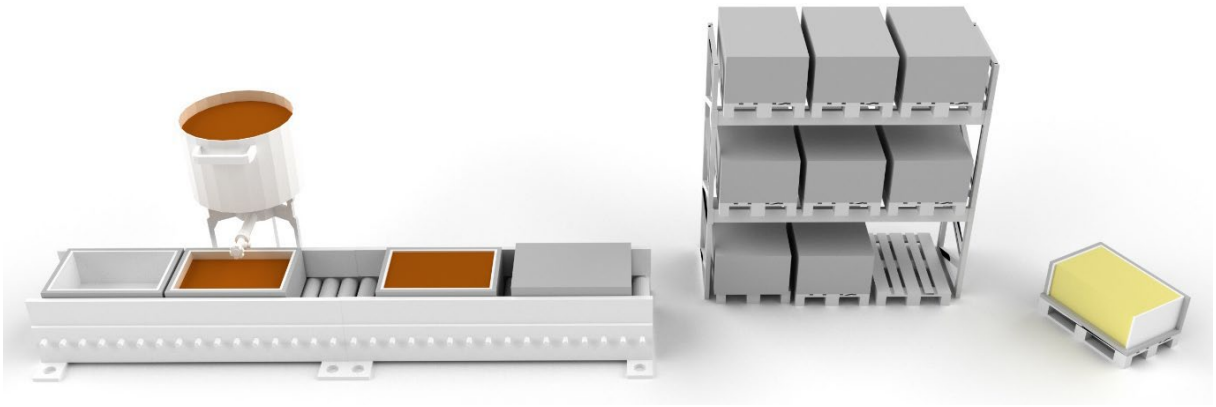

Abbildung 4 Diagramm zu Methode C zur Produktion von Wachsblockrohlingen

Methode C untersucht ein Verfahren, bei dem Wachsblockrohlinge in einem einzigen Gussprozess unter speziell angepassten Randbedingungen hergestellt werden. Bei dieser Methode wird der Abkühlprozess gezielt verlangsamt, sodass das Wachs frei schrumpfen kann. Wachsblöcke, die mit dieser Technik produziert werden, benötigen eine Abkühlzeit von etwa 3 ½ Wochen. Abweichend von der ursprünglichen Zielsetzung wurden drei anstatt einer Methode zur Herstellung großformatiger riss und- spannungsfreier Wachsblockrohlinge untersucht.

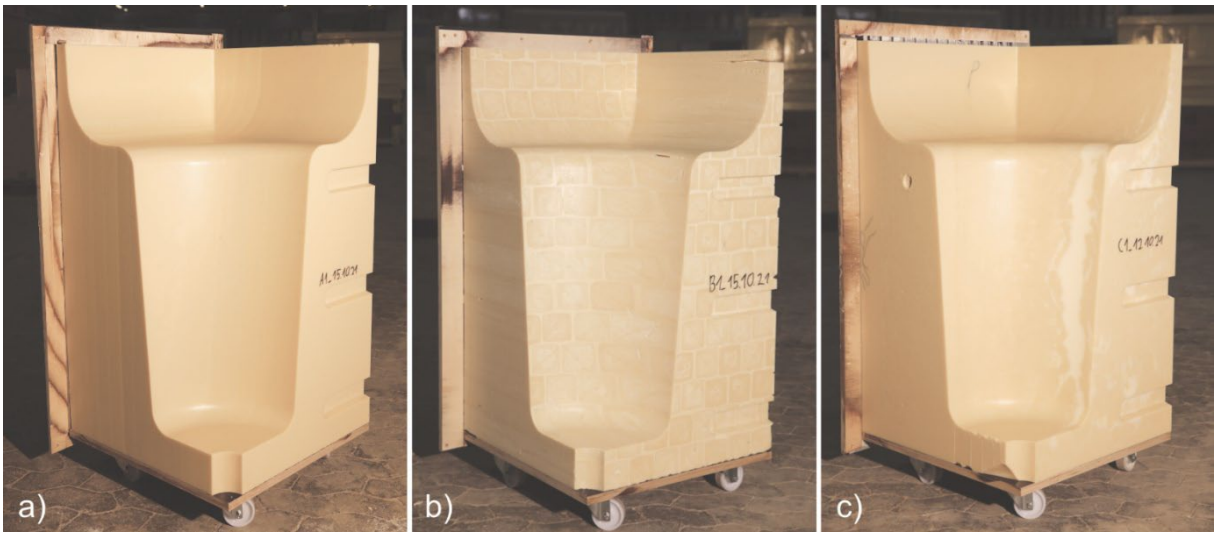

Abbildung 5 Drei von vier Wachsschalungsmodulen hergestellt mit Methode A (Abb. a)), Methode B (Abb. b)) und Methode C (Abb. c))

Um die Methoden zur Wachsblockherstellung zu evaluieren, wurde eine Fallstudie zur Herstellung eines Pollers durchgeführt. Die Herstellung der Wachsschalung erfolgte in zwei digitalen Herstellungsprozessen mit der anschließenden Assemblierung. Im ersten Schritt wurde ein 3D-Modell der Negativschalung im 3D-Modellierungsprogramm Rhinoceros erstellt. Im Hinblick auf eine Vereinfachung des späteren Fräsvorgangs und um das Ausschalen nach dem Betonieren zu vereinfachen, wurde die Negativschalung bereits digital in vier gleiche Teile geteilt. Die zuvor hergestellten Wachsblockrohlinge (0,75 x 1,15 x 0,75 m; 610kg) wurden im nächsten digitalen Fertigungsschritt mit der fünfachsigen Fräse des DBFL des ITE in zwei Bearbeitungsvorgängen formgebend zerspant. Anschließend wurden die vier Schalungsteile aufgerichtet, assembliert und im

Bereich der Fugen mit einem Dichtband abgedichtet, um einen Wasserverlust, das Ausbluten des Betons durch die Fugen zu vermeiden. Für die Vergleichbarkeit der Wachsschalung und der konventionellen Schalung aus Elastomer wurden beide Schalungen unter gleichen räumlichen Bedingungen in den Produktionshallen der Firma Rinn zeitgleich für den Betonabguss vorbereitet und mit ca. 1,2 t selbstverdichtenden SVB Rinnit-Basalt-Betonmischung abgegossen. Ein Trennmittel auf

Abbildung 6 Fertiger gestrahlter Poller

Wachsbasis, das sich in vorherigen Forschungsarbeiten für den Betonguss auf Wachs als geeignet erwiesen hat, verhinderte die Haftung des Betons an der Wachsschalung. Nach ca. 20 Stunden konnten beide Poller ausgeschalt werden. Auf Kundenwunsch wurde der Poller mit Stahlkugelstrahlbehandlung bearbeitet.

Arbeitspaket 3: Abrasives Wachsschneiden

Ursprüngliche Zielsetzung: Dieses Arbeitspaket konzentriert sich auf die Forschung, Entwicklung und Erprobung eines Abrasivdrahtschneidverfahrens für Wachs. Odico untersuchte die mechanischen Prinzipien für ein optimiertes Abrasivdrahtschneiden von großen Wachskörpern, einschließlich der Drahtzusammensetzung, des Werkzeugdesigns und der Prozessparameter. Die Arbeiten konzentrierten sich zunächst auf das Schneiden mit Abrasivdraht durch schwungradgelagerten vulkanisierten Diamantdraht mit zusätzlicher Wärme- und Kühlungsinduktion des Drahtes, was zur Entwicklung eines neuartigen HyperCrete-Wachsschneideffektors führen sollte. In diesem Arbeitspaket wurde sichergestellt, dass die Konstruktion des Wachsschneide-Effektors die Anforderungen an die Oberflächenqualität der Schalung sowie an die mechanische Funktion der Produktionszelle erfüllt. Die Hardware und das mechanische Design müssen entsprechend den Anforderungen an Produktionsgeschwindigkeit, Amortisationszeit, Flexibilität und Robustheit skalierbar sein.

Ergebnisse: Das ITE hat das Arbeitspaket unterstützt, indem das ITE Wachsproben aus massivem CFW-Wachs als auch aus dem Wachs-Füllstoff-Kompositen für Schneidversuche herstellte und Odico für die Versuche zur Verfügung stellte. Sowohl die massiven CFW-Wachs Proben als auch die Wachs-Füllstoff-Komposit Proben führten zu Verklebungen des Schneiddrahtes und zu Verklumpungen auf der geschnittenen Wachsschalungsoberfläche. Diese Probleme schienen nicht ohne weiteres lösbar, so dass daraufhin das Arbeitsprogramm in Absprache im Konsortium und den Projektträgern geändert wurde.

Während die Optimierung des Schruppfrässchritts in den bisherigen Forschungsarbeiten weitgehend abgeschlossen wurde, sind weitere Verbesserungen erforderlich, um den Schlichtfrässchritt zu optimieren. Dies war derzeit ein zeitaufwändiger Prozess, der einen erheblichen Einfluss auf die Arbeits- und Energiekosten während des Maschinenbetriebs hat. Um den Fräswegabstand im Hinblick auf eine Maximierung des Zeitspanvolumens zu optimieren, sind Fräsabstände von >1 mm notwendig. Dies verkürzt zwar die Fräszeit, führt aber zur Bildung von Fräsrillen auf der Wachsschalungsoberfläche, die sich anschließend auf die Betonoberfläche übertragen. Eine Reduzierung des Fräsabstandes um die Hälfte führt jedoch zu einem exponentiellen Anstieg der Schlichtfräszeit, in diesem Falle der Verdopplung der Fräszeit.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wurden in dieser Arbeit vier parametrisch programmierte Fräs- und Oberflächengestaltungsmethoden untersucht, die das ineffiziente Schlichtfräsen des konventionellen CAM-programmierten Schlichtfrässchrittes durch die Implementierung von parametrisch gestalteten, akzentuierten Fräsmustern ersetzen und gleichzeitig ornamentale, hochpräzise Oberflächenstrukturen unter Ausnutzung des gesamten Durchmessers des Schlichtfräswerkzeuges erzeugen. Entsprechend wurde der Fokus des Arbeitspaketes auf die Untersuchung eines effektiven Schlichtfräsprozesses nachjustiert.

Es wurden vier verschiedene Frässtrategien programmiert und in der Praxis angewendet. Der Kugelkopffräser taucht versetzt zur Referenzgeometrie in den zuvor grob gefrästen endkonturnahen Wachsblock ein und folgt den programmierten Wegpunkten gemäß den vier folgenden Frässtrategien:

Lineare Rasterakzentuierung: Bei der linearen Rasterakzentuierung taucht der Kugelfräser mit dem vollen Kugelnasenradius in einem 45°-Winkel zu den kurzen Seitenkanten des Wachsblocks ein, passt die Z-Werte an die Referenzgeometriefläche an und fräst den Wachsblock linear entlang der Referenzgeometrie. Ausgehend von der Mitte des Kugelfräsers beträgt der Fräsbahnabstand 2 cm, wodurch 1 cm tiefe und 2 cm breite lineare Fräsrillen entstehen.

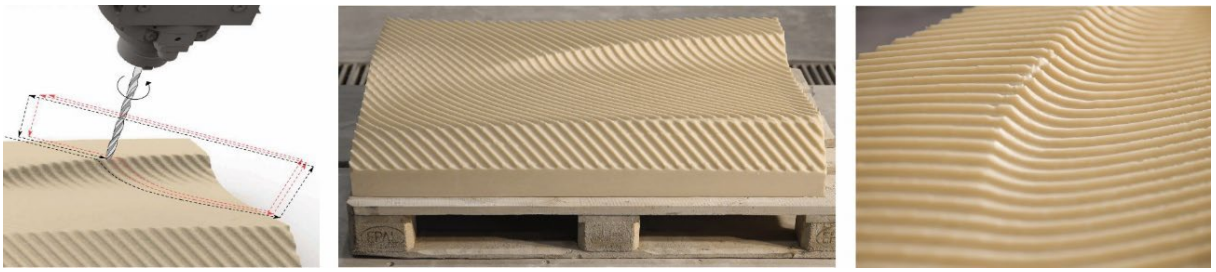

Abbildung 7 links: Frässtrategie lineare Rasterakzentuierung, Mitte: gefräster Wachsblock, rechts: Detailaufnahme Wachsschalungsoberfläche

Gekreuzte Rasterakzentuierung: Die gekreuzte Gitterakzentuierung basiert auf der linearen Gitterakzentuierung, wird aber durch einen zweiten Fräsgang im Winkel von 90° zu den bereits gefrästen Fräsrillen ergänzt. Dadurch entsteht ein Kreuzmuster mit gekreuzten Fräsrillen, die ebenfalls 1 cm tief und 2 cm breit sind.

Abbildung 8 links: Frässtrategie gekreuzte Rasterakzentuierung, Mitte: gefräster Wachsblock, rechts: Detailaufnahme Wachsschalungsoberfläche

Topologieangepasste Kurvenfluss-Akzentuierung: Die topologieangepasste Kurvenfluss-Akzentuierung passt sich an den Kurvenfluss der Referenzgeometrie an. Durch die Anpassung an die Kontur der Referenzgeometrie überlagern sich Fräsbahnen, bei denen der Fräsbahnabstand des Fräsermittelpunktes kleiner ist als der Durchmesser des Kugelfräsers - die Dichte der Fräsrillen wird

Abbildung 9 links: Frässtrategie Topologie angepasste Rasterakzentuierung, Mitte: gefräster Wachsblock, rechts: Detailaufnahme Wachsschalungsoberfläche

erhöht. Gleichzeitig entstehen Flächen, bei denen der Abstand der Fräsbahnen der Fräsermitte größer ist als der Durchmesser des Fräsers und die Flächen des zweiten Schruppfräsvorgangs stehen bleiben - die Dichte der Fräsrillen wird verringert. Die Abstandsdichte der Fräsbahnen stärkt die Topologie der Referenzgeometrie und fokussiert die Linienführung der Referenzgeometrie.

Akzentuierung vergleichbar der Oberflächenbearbeitung mit einem Bohrmeißel: Die Akzentuierung nach Vorbild eines Bohrmeißels ist der Holzbearbeitung mit einem Meißel nachempfunden. Beim Wachsfräsen taucht das rotierende Fräswerkzeug in einer bogenförmigen Bewegung in die Wachsoberfläche ein und tritt in einer bogenförmigen Bewegung tangential wieder aus. Dabei entstehen Fräskuhlen, die entlang der Referenzgeometriefläche verteilt sind. Die Dichte der Fräsbahnen bzw. das kurzzeitige Eintauchen des Fräswerkzeugs in das Wachsmaterial ist ähnlich der topologieangepassten Kurvenflussakzentuierung durch eine unterschiedliche Fräsbahnabstandsdichte gekennzeichnet, so dass lokale Überlappungen und unberührte Bereiche entstehen, die den Linien und der Topologie der Referenzgeometrie entsprechen.

Der zeitaufwändige Schlichtprozess zum Glätten mehrfach gekrümmter Oberflächen entfällt bei den für die präzise Bearbeitung komplexer gekrümmter Oberflächen üblicherweise erforderlichen engen Fräsbahnabständen von <1 mm durch den Einsatz eines parametrisch programmierten Fräswerkzeugs, das in die aufgeraute Wachsoberfläche eintaucht und den gesamten Durchmesser des Werkzeugs nutzt. Dies führte zu einer deutlichen Steigerung der Effizienz des Schlichtprozesses und zu einer erheblichen Verkürzung der Betriebszeit der Fräsmaschine. Der Schlichtfräsprozess konnte um mindestens 80 % (im Vergleich zu 1 mm Fräsbahnabstand bei konventionellem Fräsen und Bohrerakzentuierung) und um maximal 95 % (im Vergleich zu 0,5 mm Fräsbahnabstand bei konventionellem Fräsen und Linienrasterakzentuierung) reduziert werden.

Abbildung 10 links: Frässtrategie Akzentuierung vergleichbar der Oberflächenbearbeitung mit einem Bohrmeißel, Mitte: gefräster Wachsblock, rechts: Detailaufnahme Wachsschalungsoberfläche

Arbeitspaket 4: Gießen und Sprühen von Geopolymerbeton

Ursprüngliche Zielsetzung: Die Techniken des Gießens und Laminierens von Geopolymerbeton wurden von BNB erfolgreich bei der Herstellung komplexer Betonfassadenpaneele eingesetzt. Es gab jedoch zwei Herausforderungen, die eine kommerzielle Anwendung von Geopolymerbeton bei BNB behinderten: (1) die Herstellung von Gepolymerbeton-Elementen wurde noch nie auf die Verträglichkeit mit Wachsschalungen untersucht und (2) die Herstellung von Geopolymerbeton-Elementen wurde bisher manuell aufgetragen bzw. materialineffizient gegossen, was in mangelhafter Kosteneffizienz resultiert.

In diesem Arbeitspaket wurden diese Nachteile durch die Kombination von Geopolymerbeton mit Wachsschalungen und robotergestütztem Spritzbeton, SC3DP, behoben. Die Entwicklungs- und Forschungsaktivitäten wurden parallel und in einem iterativen Prozess, in enger Zusammenarbeit zwischen BNB und ITE, durchgeführt.

BNB überarbeitete die Rezeptur des Geopolymerbeton, um die Kompatibilität mit Wachsschalungen zu gewährleisten. Diese Rezepturen wurden anhand von Standardbetoniertechniken für die Betonvorfertigung validiert: Gießen und Laminieren. Die Die Weiterentwicklung der Geopolymerbetonmischung sowie die Entwicklungsarbeiten zum Gießen und Laminieren wurden am Standort von BNB in Potsdam durchgeführt.

Der Forschungspartner ITE nutzte sein umfangreiches Fachwissen über das Spritzen von Standardbeton, um einen vollautomatischen Arbeitsablauf zum Betonieren im robotischen Betonspritzverfahren für Geopolymerbeton auf Wachsschalung zu untersuchen.

Ergebnisse Teilarbeitspaket 1 – Guss von Geopolymerbeton auf Wachsschalung: Zur Evaluierung der Geopolymerbetonmischung sollte nach Vorgabe des ITE der Ausschnitt einer Rippendecke nach dem Vorbild von Pier Luigi Nervi [6] produziert werden. BNB erhielt dafür zwei vorgefertigte Wachsblöcke mit den der Maßen 1,2m x 0,8mx 0,3m. Auf Basis des vom ITE vorgegebenen CAD-Modells wurden mit der bei BNB vorhandenen CNC-Technik die Wachsblöcke bearbeitet und zu einer Form zusammengesetzt.

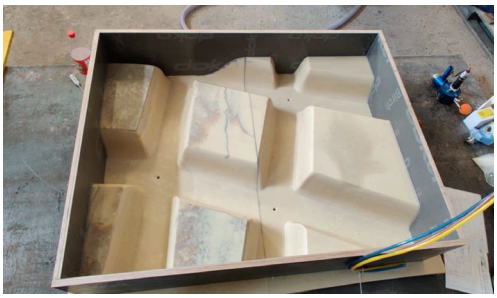

Abbildung 11 links: Fräsvorgang Wachsblöcke, rechts: fertige Hybridschalung

Anhand des Versuchs soll der digitale Workflow der Betonspritztechnologie erprobt werden. Des Weiteren galt es zu evaluieren, ob die hohe kinetische Energie des Spritzverfahrens Einfluss auf die Wachsoberflächen hat. Im ersten Versuchsschritt wurde der Geopolymerbeton handgeführt auf die Wachsschalung appliziert. Dieser Schritt diente dazu das Material auf die Spritztechnologie hinzu einzustellen. Die innovative Idee Nervi's dünnwandige glasfaserbewehrte Betonelemente als verlorene Schalung vorzuproduzieren wurde bei diesem Versuch umgesetzt. Die leichten und damit gut handhabbaren Betonbauteile, mit qualitativ hochwertiger Sichtbetonoberfläche werden vorproduziert auf die Baustelle verbracht und mit Ortbeton zu einem massiven Betonbauteil verbunden. Die ersten Versuche mit Geopolymerbeton zeigten auf, dass sich dieser beim Druckvorgang im Pumpschlauch verfestigt und nach wenigen Minuten eine Pumpbarkeit nicht mehr

Abbildung 12 links: Gegossener Geopolymerbeton, rechts: ausgeschaltes Rippendeckenelement

gewährleistet ist. Um den Versuch dennoch abzuschließen wurde der Geopolymerbeton auf die Wachsschalung gegossen. Der Versuch wurde mit der Produktion eines massives Bauteil vorerst abgeschlossen.

Nach ca. 24h konnte das massive Bauteil ausgeschalt werden. Der Ausschalprozess verlief analog dem normalen Produktionsalltag. Die Praktikabilität der Geopolymermischung im Zusammenspiel mit Trennmittel und Wachsschalung konnte somit erfolgreich getestet werden. Um den digital-robotischen Workflow der Spritzbetonapplikation wie im Arbeitspaket vorgesehen zu testen, und zum anderen die Kompatibilität der Spritzbetontechnik in Kombination mit der Wachsschalung zu untersuchen, wurde die Wachsschalung an das DBFL des ITE versendet, um dort den Versuch mit der dort gebräuchlichen Referenzmischung von MC-Bauchemie abzuschließen.

Die Applikation wurde am DBFL mit Nafufill KM 250 von MC-Bauchemie ergänzt um Glasfasern durch das SC3DP-Verfahren auf die Wachsschalung aufgetragen. Nach dem ersten Arbeitsvorgang wurden zur Verbesserung der Stabilität weitere Glasfasern in das noch frische Material eingelegt. Danach erfolgten zwei weitere Arbeitsschritte nach demselben Schema.

Der vom ITE entwickelte digitale Workflow der robotischen Spritzbetonapplikation auf Wachsschalung konnte mit der Referenzmischung von MC-Bauchemie erfolgreich getestet werden. An der Wachschalung konnte nach dem Ausschalen keine Abnutzung der Oberfläche durch die Spritzapplikation festgestellt werden. Der Nachweis, dass die Spritzbetontechnik im Zusammenspiel mit der Wachschalung durchführbar ist, konnte mit dem Versuch erbracht werden. Folglich eignet sich dieses Verfahren auch gut zu Herstellung von dünnwandigen Bauteilen. Eine, wie im AP geforderte CO_2-reduzierte Spritzbetonmischung stand bis dato noch nicht zur Verfügung.

Ergebnisse Teilarbeitspaket 2 – Spritzbetonapplikation mit CO2-reduziertem Feinkornbeton

Da die Probleme bei der Pumpbarkeit der Geopolymerbetonmischung, auch nach weiteren Laborversuchen nicht behoben werden konnten, musste das Bindemittel geändert werden. Daraufhin wurde im Konsortium die Wahl eines alternativen Bindemittels diskutiert. Die Nutzung von Geopolymerbeton für die Spritzbetonapplikation wird nicht weiterverfolgt. Stattdessen wird von BNB die Nutzung von Celitement als alternatives, CO_2-reduziertes Bindemittel vorgeschlagen, da mit diesem schon hinreichende Versuche durchgeführt wurden. Der Projektträger wurde über die Änderung des AP informiert. Alle folgenden Versuche werden auf der Basis der Celitement-Mischung durchgeführt.

Abbildung 13 von links: robotisches SC3DP [6], rechts: zusätzliche Glasfaserbewehrungsschicht, unten: fertiges dünnwandiges Rippendeckenelement

Die, für die Spritzbetonapplikation nutzbare, von BNB entwickelte Feinkornbetonmischung besteht aus einer Gesteinskörnung mit einer maximalen Korngröße von 2 mm, dem CO_2-optimierten Bindemittel Celitement und Wasser. Des Weiteren beinhaltet die Mischung feine dispergierende Basaltfasern zur Verbesserung der Grünstandfestigkeit, sowie zur Minimierung der klassischen Schwindungseffekte. Ebenso kann zur weiteren CO_2-Reduzierung das Bindemittel mit Kalksteinmehl ergänzt werden und zur verbesserten Verarbeitbarkeit ein Polyol der Mischung hinzugefügt werden. Die letzteren Bestandteile sind lediglich optional und dienen der Verbesserung von Detailanforderung an die. Celitement besitzt vergleichbare Verarbeitungseigenschaften, vergleichbare betontechnologische Eigenschaften sowie analoge Festigkeiten herkömmlicher Zemente. Die für die Spritzbetonapplikation eingesetzte Feinkornfaserbetonmischung entspricht den Mischungen, die für den 3D-Druck von Feinkornfaserbeton mit Portlandzement eingesetzt werden. Sie weist jedoch im Vergleich zu konventionellen Zementen bessere Frischbetoneigenschaften für Spritzbeton auf, die Klebrigkeit und die Grünstands festigkeit werden bei vergleichbarem Ausbreitmaß von ca. 460 mm verbessert.

Abbildung 14. robotisches SC3DP mit CO2-reduziertem Feinkornbeton auf Basis von Celitement

Für die weiterführenden Untersuchungen zur Herstellung dünnwandiger Fassadenelemente wurden die parametrisch gefrästen ornamentalen Wachsschalungen aus AP2 verwendet, um die Spritzbetonapplikation auf Wachsschalung mit der neu entwickelten CO_2-reduzierten Feinkornbetonmischung weiter zu untersuchen und den digitalen Arbeitsablauf zu verbessern.

Für die Kombination von Wachsschalungstechnologie und Spritzbetonapplikation eignen sich dünnwandige Fassadenelemente besonders gut. Während eine Seite eine sehr hohe Oberflächenqualität und Oberflächenpräzession aufweist, ist die andere Seite durch die Spritzbetonapplikation rau. Diese raue Seite ist der Wand zugewandt und benötigt keine hohe Oberflächenqualität. Mit der robotischen Spritzbetonapplikation wurde Beton nur dort aufgetragen, wo es aus statischer Sicht erforderlich ist, was zu sehr leichten dünnen Betonfassadenelementen führte.

Die Betonspritzapplikation begann mit dem Auftragen mehrerer Betonschichten auf die akzentuiert gefräste Wachsschalungen in einer linearen Bewegung des Roboterarms. Anschließend wurde ein Aussteifungskreuz auf die Betondeckung 3D-gedruckt, in das Dübel als Ausschalhilfe und zur Befestigung der Fassadenelemente an einer Wand eingesetzt werden. Der Beton wurde an der Düse mit Druckluft beschleunigt und robotisch gezielt auf die Wachsform aufgetragen mit dem Ziel, eine gleichmäßige Verteilung des Betons auf der Oberfläche der Form zu erreichen. Nach einem Zeitraum von 24 Stunden wurden die Fassadenelemente auf dem Untergrund fixiert und mit Hilfe eines Portalkrans und Druckluft ausgeschalt.

BNB hat mit der Entwicklung einer CO2 reduzierten Feinkornbetonmischung die zuvor festgesetzten Ziele in diesem AP in vollem Umfang erfüllt

Abbildung 15 links Fassadenelement gekreuzte Rasterakzentuierung, Mitte: lineare Rasterakzentuierung, rechts: topologienagepasste Rasterakzentuierung

Zusammengefasste Eigenschaften der Spritzbetonmischung:

Bestandteile:

- GK 0/2, Celitement, Wasser, Fasern (evtl. KM und Polyol)

Mechanische Eigenschaften:

- $f_{c,7d} = 34\ MPa$
- $f_{c,28d} = 39\ MPa$

Frischbetonkonsistenz:

- $\approx 460\ mm$

Ausschalbarkeit nach ca. 24h.

Arbeitspakete 5, 6 und 7

Am 19.03.2024 wurde bekannt, dass der Forschungspartner ODICO Insolvenz anmelden musste. Zu diesem Zeitpunkt wurde auch die Zusammenarbeit im Konsortium beendet; der Zugriff auf Zwischenergebnisse der Arbeitspakete 5, 6 und 7 wurde gesperrt.

Somit liegen zu den Arbeitspaketen 5, 6 und 7 keine Ergebnisse vor. Die ursprünglichen Zielsetzungen zu den genannten Arbeitspaketen betreffen weitestgehend ODICO und BNB werden aber dennoch zur vollständigen Übersicht der vorgegebenen Ziele des Forschungsprojekts „Robocrete“ aufgezählt. Die Aufgaben des ITE beschränkten sich bei diesen Arbeitspaketen auf die Unterstützung durch das Fachwissen zur Wachsschalungstechnologie sowie praktische Hilfestellungen zur Umsetzung der HyperCrete-Fertigungseinheit und der Integration bei BNB.

Arbeitspaket 5: Integration und System Design

Ursprüngliche Zielsetzung: In diesem Arbeitspaket sollten die entwickelten HyperCrete-Technologien in einen funktionalen Prototyp für ein Robotersystem mit einem entsprechenden digitalen Arbeitsablauf integriert werden: Die Produktion von Wachsblockrohlingen sowie die formgebende Bearbeitung der Wachsblockrohlinge zur Nutzung als Schalungen. Durch Zusammenführung beider Prozesse sollte sich die Integrationsarbeit auf die Schaffung eines Dual-Use-Workflows konzentrieren, bei dem der Manipulator durch einen Werkzeugwechsel sowohl die robotische Platzierung von Wachsbarren (entwickelt in AP2) als auch das Abrasivdrahtschneiden großer Blöcke (entwickelt in AP3) ausführen sollte. Hierdurch sollte der Nutzwert des HyperCrete-Systems verdoppelt werden, indem die automatische Herstellung großer Blöcke ermöglicht wird, wenn das System nicht zum Schneiden von Schalungen verwendet wird. Das Ergebnis dieser Arbeit sollte ein produktionsreifes Pilotsystem sein, das in AP6 getestet werden sollte.

Arbeitspaket 6: Geopolymerbeton Pilot Bauteil Produktion

Ursprüngliche Zielsetzung: Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Validierung des gesamten HyperCrete-Konzepts in einer großtechnischen Produktionsumgebung. Dies beinhaltete die Validierung und Optimierung des Geopolymerbeton-Mischungsdesigns (bzw. des alternativen CO2-emissions-reduzierten Feinkornbeton) und der Parameter des Gießprozesses in Hypercrete-Wachsschalungen (WP4) sowie des integrierten Arbeitsablaufs der Wachsschalungsproduktion (AP5) anhand eines realen Anwendungsfalls, der von BNB bereitgestellt werden sollte. Nach der Systemintegration in AP5 sollte ODICO den HyperCrete-Prototyp zu BNBs Einrichtungen in Potsdam transportieren. BNB sollte eine vollautomatische Schalungsproduktion durchführen, um eine Reihe von dünnwandigen Fassaden-Betonelementen unter Verwendung dieses Prototyps herzustellen. Die Arbeit sollte zu einem Demonstrator in 1:1-Ausführung führen, der als Anschauungsobjekt für die Erschließung des Marktes dienen sollte, um potenzielle Kunden zu gewinnen. Schließlich sollte BNB auf der Grundlage der Ergebnisse dieses Arbeitspakets HyperCrete im Hinblick auf die wirtschaftliche Effizienz bewerten.

Arbeitsprogramm 7: Zertifizierung und IP Management

Ursprüngliche Zielsetzung: Ziel dieses Arbeitspaketes war es, sicherzustellen, dass die HyperCrete-Lösung innerhalb der EU legal verkauft werden kann, und die Sicherheitszulassung für zukünftige HyperCrete-Implementierungen durchzuführen. Folgende Zertifizierungen und Genehmigungen sollten vorbereitet und erteilt werden: 1) CE-Zertifizierung 2) Prüfung der GDPR-Konformität.

Arbeitspaket 8: Beschichtungen der Wachsschalung

Ursprüngliche Zielsetzung: Dieses Arbeitspaket wurde im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung des Forschungsprojektes den Arbeitspaketen hinzugefügt.

Für das Ausschalen eines Betonbauteils wird ein Trennmittel benötigt, das verhindert, dass das Betonbauteil am Wachs haften bleibt. Bei herkömmlichen Schalungen wird dieses Problem durch den Einsatz von Trennmitteln auf Mineralölbasis gelöst. Diese lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf die Wachsschalung auftragen, da Trennmittel auf Mineralölbasis in das lipophile Wachs absorbiert werden. Bislang wurde ein Trennmittel auf Wachsbasis zum Ausschalen von Betonbauteilen verwendet, das jedoch aufgrund seiner Konsistenz nur begrenzt praktikabel ist und eine Wachsschicht auf dem Betonbauteil hinterlässt, was den Einsatz von Wachsschalungen für den Sichtbetonstandard einschränkt. In AP 8 sollten Beschichtungen als "Membran" untersucht werden, um herkömmliche Trennmittel auf Mineralölbasis einsetzen zu können.

Ergebnisse: In der Betonfertigteilindustrie ist die Behandlung von Schalungen mit betonverträglichen Beschichtungen bereits eine etablierte Methode, um Oberflächen für die Herstellung von Sichtbeton zu optimieren und eine einheitliche Oberfläche bei hybriden Schalungssystemen, wie der Kombination verschiedener Schalungsmaterialien, zu gewährleisten. In ersten Kleinversuchen wurden 30 verschiedene Beschichtungen auf ihre Eignung für den Einsatz auf Wachsschalungsoberflächen untersucht. Drei der Beschichtungen erwiesen sich als besonders vielversprechend und wurden für weitere Tests im robotergestützten SC3DP-Betonspritzverfahren ausgewählt:

a) Eine speziell für diesen Zweck entwickelte Beschichtung der Kaiserlacke GmbH, einem auf Kerzenbeschichtungen spezialisierten Unternehmen. Farbe: blau.

b) Lars Frey, Farve & Lak ApS, P.D. Top Modellak +12%; Farbe: transparent.

c) 2K-Lack von MC Bauchemie; Farbe: weiß/grau

Alle drei Beschichtungen erwiesen sich in Vorversuchen als geeignet und bildeten eine wirksame Barriere gegen das mineralölbasierte Trennmittel SOK Ultra, das als Ersatz für das Trennmittel aus Wachs vorgesehen ist, um Verfärbungen auf dem entformten Betonbauteil zu verhindern, und können gleichmäßig im Spritzverfahren aufgetragen werden. Darüber hinaus erfolgte keine Verunreinigung des Wachses, da die Beschichtungen im Recyclingprozess als eine Art „Haut“ effektiv aus dem geschmolzenen Wachs herausgefiltert werden konnten.

Alle Beschichtungen konnten die Wachsschalungsoberfläche signifikant verbessern und bildeten eine Annäherung an die höchste Sichtbetonqualität mit der Wachsschalungstechnologie hergestellten ausgeschalten Betonbauteile.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises werden in zwei Kategorien aufgeteilt: Personalkosten und Materialkosten.

Alle Personalkosten trugen zum Erfolg der bearbeiteten Arbeitspakete bei und wurden durch einen Ingenieur und einen Techniker durchgeführt. Für BNB, als KMU, stand die Entwicklung neuer Rezepturen, deren praktische Anwendung sowie die Implementierung in die laufende Produktion im Fokus. Der enge Austausch mit den Forschungspartnern war hierbei jederzeit förderlich.

Für die erfolgreiche Bearbeitung des Arbeitspaket 4 wurden diverse Gesteinskörnungen, Ausgangsstoffe für die Bindemittel und Chemikalien für die Mischungsentwicklung angeschafft. Für die Versuche bei den Forschungspartner sind Transport- und Reisekosten angefallen.

Dienstreisen waren für die Durchführung des Forschungsprojektes insbesondere des Informationsaustausches, der Durchführung von gemeinsamen Versuchen und zur Koordination des Forschungsvorhabens erforderlich.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle Arbeitspakete von BNB wurden vollumfänglich bearbeitet. Teilweise mussten ursprüngliche Zielsetzungen angepasst werden, insbesondere bei Arbeitspaketen, die bereits zur Antragsstellung kritische Meilensteine beinhalteten. In diesen Fällen wurden die Arbeitspakete zunächst im Konsortium und anschließend in Absprache mit den Projektträgern geändert und die Zielsetzungen der betroffenen Arbeitspakete angepasst.

Lediglich die Ergebnisse der Arbeitspakete 5,6 und 7 sind aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Forschungsprojektes nicht abgeschlossen. Das vorzeitige Ende des Forschungsprojektes ist hinsichtlich der geplanten Verwertung höchst bedauerlich, da diese Arbeitspakete essenziell für diese waren.

Auch wenn die Verwertungsabsichten nicht wie geplant umgesetzt werden können, lassen die Forschungsergebnisse einen signifikanten Schritt in Richtung industrieller Anwendung erkennen, sodass die durchgeführten Arbeiten notwendig und angemessen waren, um der Marktreife der Wachsschalungstechnologie näher zu kommen. Durch die praxisnahe Forschungsarbeit von BNB konnte die Wachsschalungstechnologie in entscheidenden Schritten zur Implementierung in der Betonfertigteilindustrie vorangebracht werden.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

BNB konnte im Rahmen des Forschungsprojektes „Robocrete“ mit der Entwicklung einer CO2-reduzierten Betonmischung einen essenziellen Beitrag zur Durchführbarkeit des SC3DP-Verfahren leisten.

Das ITE konnte im Rahmen des Forschungsprojektes „Robocrete“ entscheidende Forschungslücken wie die Methoden zur Herstellung großformatiger Wachsblockrohlinge, die Verbesserung der Sichtbetonqualität von Bauteilen, die mit der Wachsschalungstechnologie hergestellt wurden und die Kombination der Wachsschalungstechnologie und des SC3DP-Verfahren schließen. Zudem konnten viele anwendungsbezogene offene Fragestellung der Wachsschalungstechnologie im internationalen Konsortium mit der Erfahrung der industriellen Forschungspartner beantwortet werden.

Die Verwertungsabsichten, die zu Beginn des Forschungsprojektes in Aussicht gestellt wurden, konnten auf Grund der Insolvenz des Forschungspartners ODICO nicht wie geplant umgesetzt werden. Entscheidende Entwicklungsschritte wie die vollautomatisierte Wachsblockrohlingsproduktion, die Validierung des Prototypens sowie die CE-Zertifizierung konnten nicht abgeschlossen werden, auf Zwischenergebnisse haben die verbleibenden Konsortialpartner ITE und BNB aufgrund des Insolvenzverfahrens keinen Zugriff.

Dennoch ist eine Verwertung der Wachsschalungstechnologie im Rahmen eines Forschungsprojektes, das parallel zum Forschungsprojekt „Robocrete“ begann, geplant. Basierend auf einer Erfindung des endkonturnahen Wachs-3D-Druck mit anschließender hochpräziser CNC-Fräsbearbeitung, das zusammen mit der TU Braunschweig und Herrhammer GmbH als PCT-Patent angemeldet wurde, strebt das ITE eine Ausgründung an. Forschungsergebnisse aus dem Robocrete-Forschungsprojekt wie die Ergebnisse aus AP 8, Beschichtungsmethoden zur Erreichung der höchsten Sichtbetonqualität, werden in das Ausgründungsvorhaben einfließen.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritte auf den Gebiet bei anderen Stellen

Es ist keine weitere industriell angewandte Forschung im Gebiet der Betonbauteilvorproduktion bekannt, die Wachs als Schalung für den Betonguss nutzt.

An der University of Southern Denmark (SDU) wird am CREATE zum 3D-Druck von Wachsschalungen für den Betonguss im Bereich der Grundlagenforschung geforscht. Diese Forschung wurde ebenfalls mit dem industriepartner Odico durchgeführt und wird vermutlich ebenfalls insolvenzbedingt eingestellt. Weitere Forschungsvorhaben zur Anwendung der Wachsschalungstechnologie sind nicht bekannt.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Folgende Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen sind durch das Institut für Tragwerksentwurf erfolgt oder sind in Planung:

Veröffentlichtes Journalpaper:

Jonischkies, S.; Mainka, J.; Kloft, H.; Hack, N.: Non-Waste-Wachsschalung für den individualisierten Betonfertigteilbau – Praxisbeispiel des digitalen Fertigungsprozesses für eine Kleinserie großformatiger Poller, Juni 2022, Beton- und Stahlbetonbau 117(3), DOI:10.1002/best.202200036

Geplantes Journalpaper:

Accentuated milled Wax-Formwork for thin-shell SC3DP printed fair-faced low CO2 concrete façade elements. Akzentuiert gefräste Wachsschalungen für dünnwandige SC3DP gedruckte CO2-emissions-reudzierte Beton-Fassadenelemente mit Sichtbetonqualität (Peer-reviewed, Veröffentlichung geplant für Dezember 2024)

Geplante Dissertation:

Zum Thema “Effizienzsteigerung der Wachsschalungstechnologie“ werden Teile der Forschungsergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Robocrete“ Inhalt einer kumulativen Dissertation am ITE, die bis Mai 2025 abgeschlossen und veröffentlicht wird.

3 Referenzen

Referenzen zum wissenschaftlichen und technischen Stand der Technik zur Zeit der Antragsstellung:

[1] Mainka, J. (2019).:

Non-Waste-Wachsschalungen - Entwicklung einer Wachsschalungstechnologie für geometrisch komplexe Betonbauteile (Non-Waste-Wax-Formwork technology), (Dissertation Bauingenieurwesen) Technische Universität Braunschweig, ISBN 9783000630170 - DOI: 10.24355/dbbs.084-201906111155-0 - https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00066682

[2] Kloft, H.; Mainka, J.; Stein, E (2014).:

A novel precise formwork-technology based on CNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements. Conference: Proceedings of the IASS Symposium „Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints.“, 15.-19.9.2014, Brasil, 2014

[3] Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E (2015).:

A Novel Precise Formwork Technology Based on CNC Milled Recyclable Industrial Wax for the Casting of Geometrically Complex Concrete Elements. Conference: Future Visions – Proceedings of the IASS Symposium 2015 & ISOFF Symposium, 17.- 20.8. & 16.- 17.8.2015, Amsterdam, paper No. IASS2015-517423, S. 12 – ISBN: 9789053630426

[4] Mainka, J.; Kloft, H.; Baron, S.;

Hoffmeister (2016) H.-W.; Dröder, K.: Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriewachsen. In: Beton- und Stahlbetonbau, Nr. 12, Vol. 111, S. 784-793 – DOI: 10.1002/best.201600055

[5] Wirth, F.W. (2020):

Untersuchungen zur Eignung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen. (Dissertation Bauingenieurwesen). Technische Universität Braunschweig, 2020 https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202009110949-0

Weitere Referenzen:

[6] Adriaenssens, S. (2013).:

The ribbed floor slab systems of pier luigi nervi. Journal- International Association for Shell and Spatial Structures, 54, 127-136.