

WIEDERVERWENDBARE FORMSTOFFE FÜR DOPPELT GEKRÜMMTE SCHALUNGEN IM BETONBAU

Masterarbeit
an der
Fakultät für
Bauingenieurwissenschaften,
Technische Universität Graz

Jänner 2015

Johannes Mitteregger, BSc

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Juhart

Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag

Ao. Univ.-Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Enrico Eustacchio

Dipl.-Ing. Gernot Parmann

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/ Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am.....

.....
(Unterschrift)

STATUARY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/ resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Juhart, Herrn Ao.Univ.-Prof. Dr.-Ing. Enrico Eustacchio, Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag, und Herrn Dipl.-Ing. Gernot Parmann.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützte.

Kurzfassung

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass Freiformflächen ihren Siegeszug in der Architektur immer stärker fortsetzen, zunehmend auch im Stahlbetonbau. Die Fertigung komplexer Flächentragwerke geht jedoch mit hohen Baukosten besonders im Schalungsbau einher. Um diese Kosten zu verringern wird nach wirtschaftlicheren Lösungen zur Fertigung von Freiformflächen bzw. Schalenträgwerken gesucht.

Diese Masterarbeit ist in das Forschungsprojekt "UHPC-Schalen" (FFG Nr.836524) integriert und befasst sich mit der Findung eines geeigneten Schalungsmaterials bzw. Formstoffs. In diesem Forschungsprojekt wird an einem durchgehenden Konzept für die Fertigung von Schalenträgwerken aus UHPC-Fertigteilen gearbeitet. Ein Schalenträgwerk wird in der Planung in mehrere gleich große Teile unterteilt, diese werden anschließend in einem Beton-Fertigteilwerk produziert. Durch Zusammenfügen der einzelnen Schalenelemente auf der Baustelle wird ein fertiges Schalenträgwerk erzeugt. Für die Fertigung der benötigten Schalungen wird ein adaptiver Schaltisch (Pixeltisch) vorgeschlagen, mit dem man in der Lage ist, beliebige geometrische Freiformflächen zu erzeugen. Ein Pixeltisch besteht aus sehr vielen aneinandergereihten Prismen mit quadratischer Grundfläche, die in z-Richtung beliebig verschiebbar sind und in gewünschter Position fixiert werden können. Mit diesem Tisch werden durch einen geeigneten Formstoff bzw. Schalungsmaterial die rechte und linke Schalung des gewünschten UHPC-Schalenelements abgegossen. Das Material der auf diesem Weg hergestellten Schalungen soll nach der Betonage für neue Schalenelemente wiederverwendet werden.

In dieser Masterarbeit wurden Versuche mit Gussasphalt, Wachsen und „Wachsbeton“ durchgeführt, um die Eignung dieser Materialien als Formstoff zu prüfen. Gussasphalt liefert gute Ergebnisse, ist aber wegen der hohen Verarbeitungstemperaturen für den Pixeltisch nicht gut geeignet. Wachse haben eine niedrigere Verarbeitungstemperatur, sind aber wegen ihres Schwindverhaltens ungenau in der Geometriewiedergabe.

In der Arbeit wird gezeigt, dass das Schwindverhalten durch Verwendung von Wachs als Bindemittel in einem Korngefüge (Wachsbeton) beim Abkühlen reduziert werden kann. Messungen zeigen auch, dass Verbesserungen der Abgusstechnik den größten Einfluss auf das Schwinden des Wachsbetons wie auch von Wachs haben. Die besten Ergebnisse hinsichtlich Betonoberflächenqualität werden ohne zusätzliches Auftragen eines Trennmittels auf den Wachsbeton erreicht. Oberflächen, die vollständig frei von Lufteinschlüssen sind, konnten allerdings nicht erzeugt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich Wachs und auch Wachsbeton für die Herstellung von Freiformschalungen mittels eines adaptiven Schaltisches (Pixeltisch) sehr gut eignen.

Abstract

In recent years, it has been shown that free-form surfaces continue to conquer more and more in architecture, especially in reinforced concrete constructions. The production of complex surfaces, however, goes hand in hand with high construction costs particularly in concrete formwork. In order to reduce those costs, economic solutions for the production of free-form surfaces or shell structures are currently of high interest.

This work is integrated in the FFG research project Nr.836524 “Ultra High Performance Concrete Shell structures“, which has its focus on developing a consistent and comprehensive concept for the production of shell structures made of prefabricated UHPC parts. This work explores suitable shuttering material (molding) for the prefabrication.

In the planning phase shell structures are divided into several parts of approximately the same size, which are then fabricated in a precast concrete factory. The individual prefabricated shell elements are assembled on-site into the final shell structure.

For the shuttering of such parts a table constructed of pixels, where each pixel can be individually positioned, is proposed. This setup will allow generating almost any geometric freeform surface. With this mechanically adjustable table a positive and a negative mold of the desired shell element are casted with a suitable material. After the concrete casting the shuttering material should be reused for new molds with a new shape.

This work explored mastic asphalt, wax, and wax concrete in order to determine the suitability of these materials as molding material. Mastic asphalt yielded good results, but was not suitable because of its high processing temperature, which could not be handled by the proposed pixel table. Waxes have lower processing temperature, but cause inaccuracy in geometry reproduction due to contraction of the wax while cooling down. By using wax as a binder in a grain structure, the shrinkage, due to cooling, could be significantly reduced.

Own experiments and associated measurements showed, that improvements in casting techniques have the greatest positive influence on the shrinkage of the wax concrete.

The best results with regard to the concrete surface quality have been achieved without applying a mold release agent. A complete avoidance of air inclusions could not be achieved.

From a technical point of view the conclusion can be drawn that wax as well as wax concrete are suitable for the production of doubly curved concrete molds.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Wissenschaft	6
2.1	Konventionelle Schalungsmaterialien	6
2.1.1	Holz-Holzwerkstoffe	6
2.1.2	Kunststoff	6
2.1.3	Stahl	7
2.1.4	Papier	7
2.2	Gebundene Formsande	7
2.3	Wachse	9
2.3.1	Übersicht und Allgemeines	9
2.3.2	Modifikation von Wachsen durch Harze	11
2.3.3	Dentalwachse	12
2.3.4	Thermisches Dimensionsverhalten	13
2.3.5	Plasto-elastisches Verhalten	16
2.4	Bitumen	17
2.4.1	Eigenschaften von Bitumen	17
2.4.2	Straßenbaubitumen	19
2.4.3	Polymermodifiziertes Bitumen	20
2.4.4	Sonstige modifizierte Bitumen	20
2.5	Asphalt	21
2.5.1	Wichtige Asphaltkenngößen	21
2.5.2	Aufbau, Zusammensetzung	22
2.5.3	Asphaltnischguttypen	23
2.5.4	Bindemittelbemessung bei hohlraumarmen Mischgutarten	24
2.5.5	Bindemittelbemessung bei Gussasphalt	26
2.6	Thermoformen mit thermoplastischen Halbzeugen	28
2.6.1	Thermoplastische Halbzeuge	28
2.7	Verfahren für gekrümmte Schalungen	31
2.7.1	Einfach gekrümmte Flächen	31
2.7.2	Zweifach gekrümmte Flächen	32
2.7.3	Freiformflächen	34
2.8	Bewertungskriterien Betonoberfläche	37
3	Experimenteller Teil	38
3.1	Pixeltischmodell	39
3.2	Vorversuche Polymermodifizierte Mörtel	41
3.3	Versuchsdurchführung Gussasphalt	42
3.3.1	Gießen	43
3.3.2	Ergebnisse	44
3.4	Versuchsdurchführung Wachs	46
3.4.1	Vorversuch	46
3.4.2	Pixelglättung	46
3.4.2.1	O.B.B-Sand	46
3.4.2.2	Elastomerplatte	47

3.4.3	Einschmelzen und Abgießen des Waxes	48
3.4.4	Ergebnisse	49
3.4.5	Formgenauigkeit	51
3.5	Vorversuche Wachs als Bindemittel (Wachsbeton)	53
3.5.1	Grundlagen der Rezepturenentwicklung	53
3.5.2	Versuchskonzept, Versuchsablauf	55
3.5.3	Versuche und Ergebnisse	57
3.5.3.1	Rezeptur I	57
3.5.3.2	Rezeptur II	59
3.5.3.3	Rezeptur III	61
3.5.3.4	Rezeptur IV	63
3.5.4	Vergleichende Versuchsauswertung der vier Wachsbetonrezepturen	66
3.5.5	Biegezug und Druckprüfung nach ÖNORM EN 196-1 [30]	69
3.5.6	Abschließende Anmerkungen	74
3.6	Pixeltschversuche mit Wachs als Bindemittel	75
3.6.1	Versuchskonzept und Durchführung	75
3.6.2	Ergebnisse	76
3.6.2.1	Handling	76
3.6.2.2	Oberflächenqualität	77
3.6.2.3	Geometrieabweichungen Pixeltschform zu Wachsbetonschalung	78
3.7	Betoniersuch mit UHPC	80
4	Erkenntnisse und Schlussfolgerung	84
5	Zusammenfassung und Ausblick	86
6	Anhang	90
7	Tabellenverzeichnis	106
8	Abbildungsverzeichnis	107
9	Literaturverzeichnis	110

Abkürzungsverzeichnis

PmB	Polymermodifiziertes Bitumen
UHPC	Ultra High Performance Concrete (Ultra-Hochfestbeton)
VMA	Voids in Mineral Aggregate (Hohlraum des Korngerüsts)
Vm	Hohlraum im Asphalt
AC	Asphaltbeton
SMA	Splittmastixasphalt
GA	Gussasphalt
PP	Polypropylen
PE	Polyethylen
O.B.B	Ölgebundener Formsand
ρ_w	Rohdichte Wachs bei 22°C
MDF	Mitteldichte Holzfaserverplatte
SVB	Selbstverdichtender Beton
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
PC	Polycarbonat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PA	Polyamid
ρ_{Sch}	Schüttdichte
m_w	Masse Wachs
1/4F	Kornklasse RK ¼ Quarz + Kalkstein (aus Bad Fischau)
H32	Quarzsand (Quarzwirke Österreich)
2/4B	Kornklasse KK 2/4 Basalt (aus Klöch)
0/2B	Kornklasse KK 0/2 Basalt (aus Klöch)
Fül.B	Füller Basal <0,063mm (aus Klöch)

1 Einleitung

In der alltäglichen Baupraxis findet die Freiformarchitektur immer mehr an Bedeutung. Besonders im Betonbau versucht man, so komplexe Flächen wie es der aktuelle Stand der Technik zulässt, zu erzeugen. Die Erzeugung komplexer Freiformflächen im Betonbau ist jedoch immer mit einem sehr hohen Schalungsaufwand und somit mit hohen Kosten verbunden.

Eine typische Art der Freiformbauweise stellt der Schalenbau dar. Durch die besondere Schalengeometrie und entsprechend ausgebildete Auflager entstehen hauptsächlich Membrankräfte anstelle von Biegekräften. Dies führt zu einem extrem leistungsfähigen Konstruktionsprinzip. Durch die Verwendung von UHPC (Ultrahochfester Beton) im Schalenbau können enorme Spannweiten mit relativ geringer Wandstärke erreicht werden. Der Grund für die Seltenheit dieser Schalenbauwerke liegt auch hier bei den hohen Kosten für die Herstellung der Schalung.

Einen wachsenden Markt repräsentieren Betonfertigteile in allen Gebäudekategorien. Sie überzeugen durch ihren hohen Gütegrad bei hoher Festigkeit und Steifigkeit sowie ausgezeichnete Wärmespeicherungseigenschaften. Folglich wäre es wünschenswert, Freiformflächen bzw. -teile in Betonfertigteilverken herzustellen und auf der Baustelle zu montieren. Somit wäre es leichter möglich, den hohen Qualitätsanforderungen des Betonbaues (Sichtbeton) Herr zu werden und die Schalungskosten auf der Baustelle maßgeblich zu reduzieren. Voraussetzung ist eine wirtschaftliche Herstellung von Freiformflächen im industriellen Maßstab.

Im Rahmen des Forschungsprojektes "UHPC-Schalen" (FFG Bridge Nr.836524) soll ein durchgängiger Fertigungsprozess für UHPC Schalenkonstruktionen aus Fertigteilen erarbeitet werden. Als Teilergebnis dieses Forschungsprojektes wird für die wirtschaftliche Fertigung der Schalenelemente ein flexibles und wiederverwendbares Schalungssystem auf Basis eines roboterverstellbaren Pixeltisches vorgeschlagen, siehe Abbildung 1 Pixeltisch. Ein Pixel ist ein Prisma mit einer quadratischen Grundfläche und einer bestimmten Länge. Die Abmessungen des Tisches sind 90cm*90cm und er ist mit 900 Pixeln bestückt. Die Pixelabmessungen sind 3cm*3cm. Mit diesem Pixeltisch ist man in der Lage, beliebige Freiformflächen mit einer gewissen Auflösung (Pixelauflösung) zu erzeugen. [2]

Die nachfolgende Beschreibung skizziert die wesentlichen Schritte des vorgeschlagenen Prozesses für die Fertigung eines Schalenelementes.

1. Positionierung

Die Elementgrundfläche wird auf ein virtuelles Pixelmodell orientiert, die Punktabstände entsprechen dem Pixelrastermaß. Im nächsten Schritt wird mit Hilfe eines Skripts die Position der einzelnen Pixel berechnet.

Mit diesen Daten ist man in der Lage, mithilfe eines Roboterarmes die einzelnen Pixel in ihre gewünschte Position zu verschieben und somit eine Freiformfläche zu erzeugen. [2]

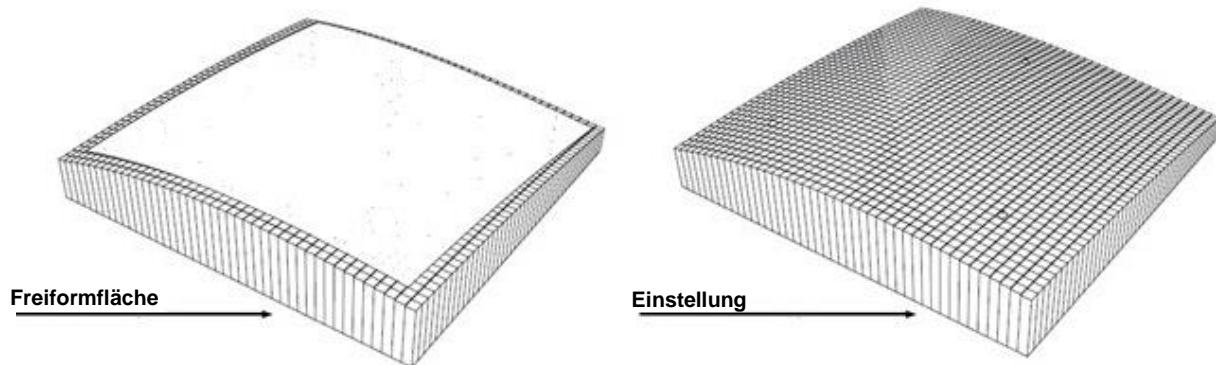


Abbildung 1 Pixeltisch [1]

2. Abformen

Der nächste Schritt ist das Ausgießen (Abformen) der eingestellten Form mit einem geeigneten Schalungsmaterial (Formstoff). Nach Erhärten des Formstoffes kann der Pixeltisch zurückgefahren werden und das erste Schalelement entnommen werden. Die Konterschalung soll mithilfe des ersten Schalelements erzeugt werden, um die Einsatzzahl des Pixeltisches zu erhöhen. [2]

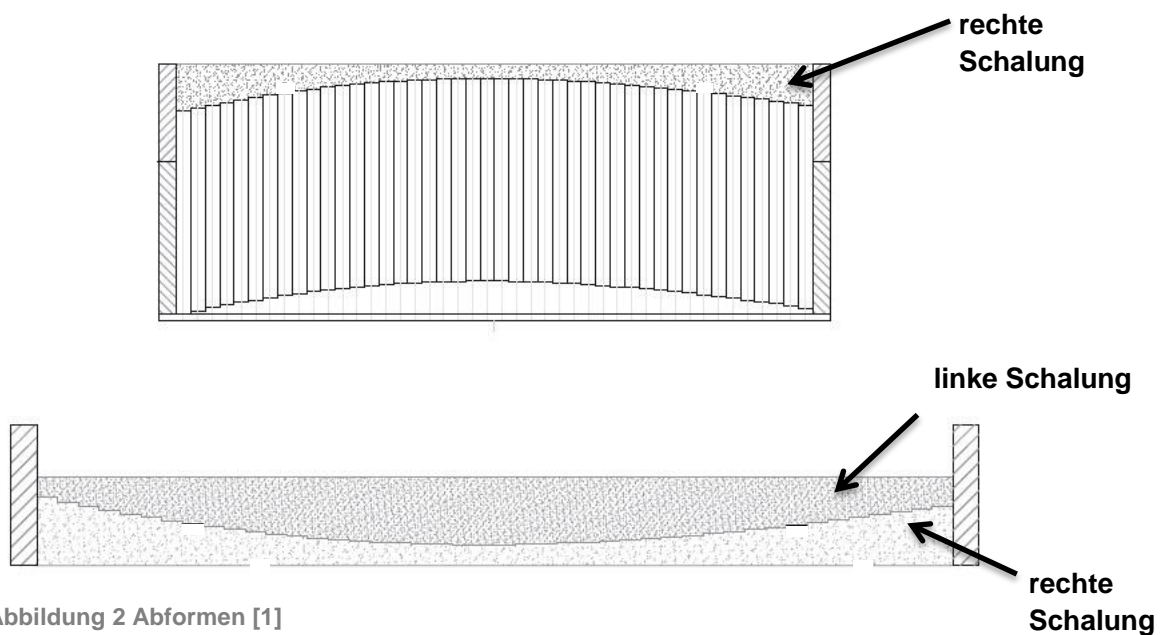


Abbildung 2 Abformen [1]

3. Betonieren

Die zwei abgeformten Schalungselemente (rechte und linke) werden zu einer geschlossenen Schalung zusammengesetzt und mit UHPC ausgegossen. Nach dem vollständigen Abbinden des UHPCs kann das Schalenelement ausgeschalt werden. Die zwei verwendeten Schalungsteile werden für das nächste Abformen am Pixeltisch aufbereitet und wiederverwendet. [2]

4. Schleifen

Das fertig betonierte Schalenelement wird nach dem Ausschalen an allen vier Stirnseiten auf Zehntelmillimeter genau geschliffen. Dies ist sehr wichtig, da durch das Schleifen der Kraftübertragungsmechanismus für die trockene Kontaktfuge optimiert wird. [2]

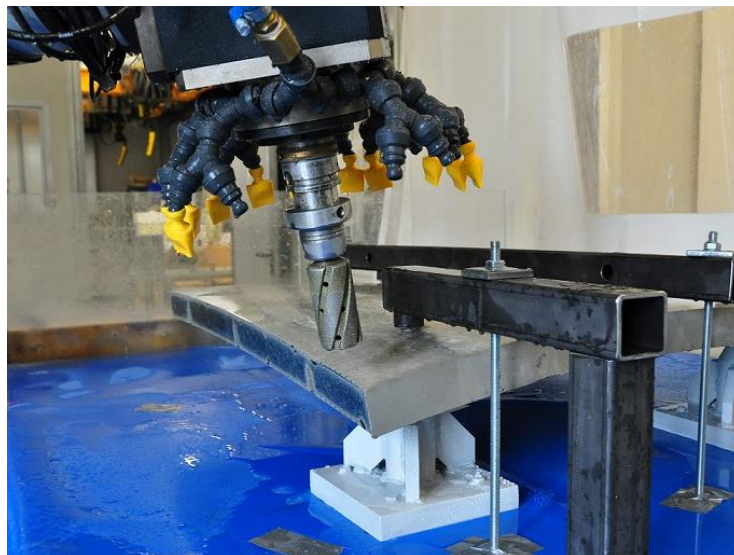


Abbildung 3 Schleifen der UHPC-Schale [2]

5. Montage

Die Fertigteilschalenelemente sollen bei der Montage durch trockene Kontaktfugen kraftschlüssig verbunden werden. Durch die Verbindung der einzelnen Schalenelemente mittels Trockenfugen ist das Schalentragwerk nach Beendigung der Montage sofort tragfähig. [2]

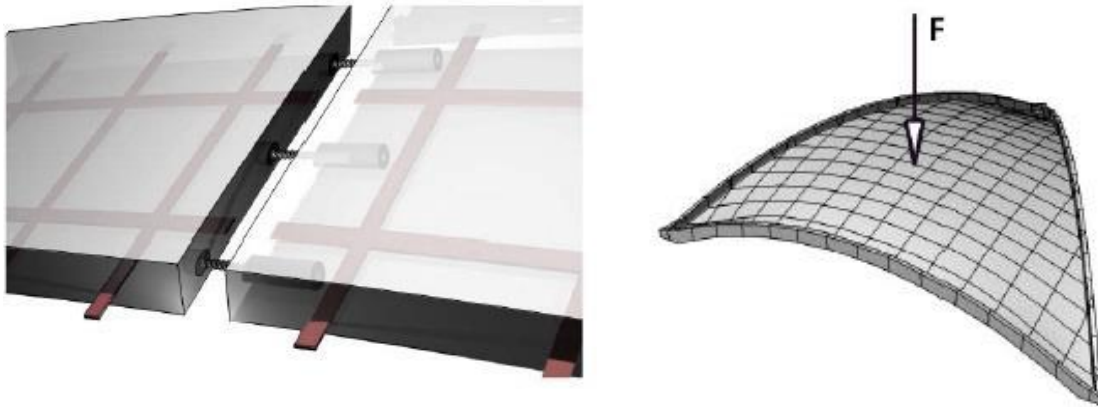


Abbildung 4 Trockenfugenverbindung [2]

Zielsetzung:

Die Zielsetzung dieser Diplomarbeit ist es, einen geeigneten Formstoff für die Herstellung der Schalungen zu finden, sowie nach Möglichkeiten bezogen auf die Glättung der pixeligen Oberflächenstruktur zu suchen.

Um die Qualität der UHPC-Schalen zu gewährleisten, hat das Schalungsmaterial (Formstoff) bestimmte Kriterien zu erfüllen.

- Der Formstoff sollte eine gute Verarbeitbarkeit aufweisen, um so ein wirtschaftliches und effizientes Arbeiten sicherzustellen. Auch die Wechselwirkung zwischen Pixeltisch und Formstoff ist hier zu berücksichtigen.
- Ein Hauptkriterium ist die Wiederverwendbarkeit des Formstoffes zur Erzeugung neuer Schalungen. Ein ressourcenschonender Prozessablauf ist anhand eines geeigneten Formstoffes sicherzustellen.
- Um gegebenenfalls auch den hohen Anforderungen des Sichtbetons (ÖNORM B 2211) nachzukommen, ist die Verträglichkeit des Formstoffes mit UHPC-Frischbeton zu prüfen. Hier sollte jegliche chemische Wechselwirkung zwischen Formstoff und Frischbeton vermieden werden.
- Des Weiteren sind auch Eigenschaften des Formstoffes wie das Temperatur-Schwinden oder das Kriechen zu berücksichtigen. Diese Effekte haben großen Einfluss auf die Formgenauigkeit der fertigen UHPC-Schalen.
- Ein weiterer, sehr wichtiger Punkt ist das Glätten der Pixelstruktur, da eine ebene, glatte Fläche ohne Pixelauflösung erwünscht ist.
- Um in naher Zukunft ein wirtschaftliches Fertigungsprinzip entwickeln zu können, müssen auch die Anschaffungskosten des Formstoffes berücksichtigt werden.
- Natürlich müssen auch mögliche gesundheits- und umweltschädigende Aspekte des Formstoffes untersucht werden.

Vorgehensweise:

Heute steht eine Vielzahl von Materialien als Formstoff für die Herstellung der Schalung zu Verfügung. Die Entwicklung in diesem Bereich kann noch lange nicht als abgeschlossen betrachtet werden, und es werden auch fortlaufend neue Entwicklungen in diesem Bereich getätigt. Auf Grund dieser Rahmenbedingungen wurde im ersten Schritt eine Recherche über mögliche Materialien, welche als Formstoff mit den für das gegenständliche Projekt gewünschten Eigenschaften zum Einsatz kommen könnten, durchgeführt. Die Recherche betrachtet unterschiedliche Materialien in Bezug auf deren Grundeigenschaften und Verarbeitungsmöglichkeiten.

Ziel der Recherche ist es, aufbauend auf den geforderten Kriterien an den Formstoff, eine Vorselektion von möglichen Materialien zu treffen. Die nachfolgenden Untersuchungen im Labor an den ausgewählten Materialien soll die Einsatzbarkeit der Materialien als Formstoff verifizieren.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

Da die Schalungstechnik im Betonbau sich von Jahr zu Jahr weiterentwickelt, wird hier eine Übersicht über die zurzeit verwendeten Schalungsmaterialien und deren Eigenschaften sowie ihre Wechselwirkung mit dem Beton gegeben. Auch werden die gängigsten Schalungsverfahren bezogen auf die zu schalenden Geometrien beschrieben. Des Weiteren werden Verfahren mit neuen Ansätzen speziell für die Schalung von Freiformflächen dargestellt.

2.1 Konventionelle Schalungsmaterialien

2.1.1 Holz-Holzwerkstoffe

Der Werkstoff Holz ist in der Schalungstechnik universell einsetzbar. Mit Holzbrettern können ebene bis hin zu doppelt gekrümmte Bauteile geformt werden. Jedoch steht dem hohen Grad der Flexibilität auch ein hoher Bearbeitungsaufwand gegenüber. Für einfachere Schalungsgeometrien werden Platten verwendet. Diese können aus Massivholz, Sperrholz, Faser oder Spanplatten bestehen. Es werden beschichtete und unbeschichtete Platten als Holzwerkstoff eingesetzt, was wiederum das Saugverhalten beeinflusst. Sehr häufig kommen Melaminharzbeschichtungen bei Holzschalungen zum Einsatz. [3]

2.1.2 Kunststoff

Kunststoff wird in der Schalungstechnik als Beschichtungsmaterial oder als Hauptbestandteil der Schalungsplatte verwendet. Hier unterscheidet man zwischen Kunststoffverbund und kunststoffbeschichteten Platten. [3]

Die Kunststoffverbundplatten bestehen aus Polypropylen und einem Kern. Der Kern besteht meist aus Aluminium oder Sperrholz, wodurch bessere Materialeigenschaften als bei reinen Holzschalungen erzielt werden. Die Kunststoffverbundplatten haben ihr Hauptanwendungsgebiet in Rahmenschalungen, können aber auch als einzelne Platten für Deckenbauten eingesetzt werden. Die Kunststoffverbundplatten gehören zu den nicht saugenden Schalungsmaterialien, wodurch kein Quellen möglich ist. Sie sind auch chemisch resistent und gut einsetzbar bei heißen Umgebungstemperaturen. Mit Kunststoffverbundplatten können hohe Einsatzzahlen erreicht werden. [3]

Für verlorene Schalungen kommt Polystyrol zum Einsatz. Mittels spanender Bearbeitung wird die gewünschte Schalungsgeometrie erzeugt. Des Weiteren kommen Polyurethane, -Silikone, oder -Epoxide bei Strukturschalungen als Schalungsmaterial zum Einsatz. [4]

2.1.3 Stahl

Durch die hohe Verschleißfestigkeit und Formbeständigkeit von Stahl können sehr hohe Einsatzzahlen mit gleichbleibender Qualität erreicht werden. Stahlschalungen werden in Fertigteilwerken eingesetzt, wo sie aufgrund der hohen Einsatzzahl einen Kostenvorteil gegenüber anderen Schalungsmaterialien ergeben. Schalungen aus Stahl gehören auch zu den nichtsaugenden Schalungen, jedoch kann durch das Sandstrahlen der Stahloberfläche ein ähnlicher Effekt wie bei schwach saugenden Sperrholzplatten erreicht werden. Bei geringen Einsatzzahlen kann eine Oxidation der Stahloberfläche stattfinden. [3]

2.1.4 Papier

Papierschalungen bestehen aus wasserfestem Papier und werden hauptsächlich für die Herstellung von Säulen verwendet. Es können Säulen mit einem Durchmesser bis zu 120cm und 8m Säulenhöhe hergestellt werden. Ausgeschalt wird mithilfe einer Reißleine. Papierschalungen zeichnen sich durch ihr geringes Gewicht und ihre einfache Handhabung aus. Papierschalungen werden mit oder ohne Beschichtung angeboten [3]

2.2 Gebundene Formsande

Der Formstoff Sand ist in der Gießereitechnik seit Jahrzehnten im Einsatz. Das Haupteinsatzgebiet von Sand als Formstoff ist bei Gießverfahren mit verlorenen Formen.

Der Formstoff besteht im Allgemeinen aus einer körnigen Grundmasse, welche meist Sand ist, und einem Bindemittel. Das wichtigste Bindemittel für Modellsand ist der Bindeton. Quarzsand, der Hauptbestandteil von Formsand, besteht zu mehr als 99% aus Siliciumdioxid (SiO_2). Die Korngröße, Kornform und Kornverteilung beeinflussen wichtige Eigenschaften des Formstoffsystems wie:

- Verbrauch an Bindemitteln
- Verdichtbarkeit
- Rauheit der Gussoberfläche
- Gasdurchlässigkeit

Das Quarzkorn sollte annähernd kugelförmig sein, da die Kugel die kleinste Oberfläche je Körpervolumen aufweist. Die mittlere Korngröße sollte bei ungefähr 0,27mm liegen. Abbildung 5 zeigt die Sieblinie eines typischen Formsandes. [12]

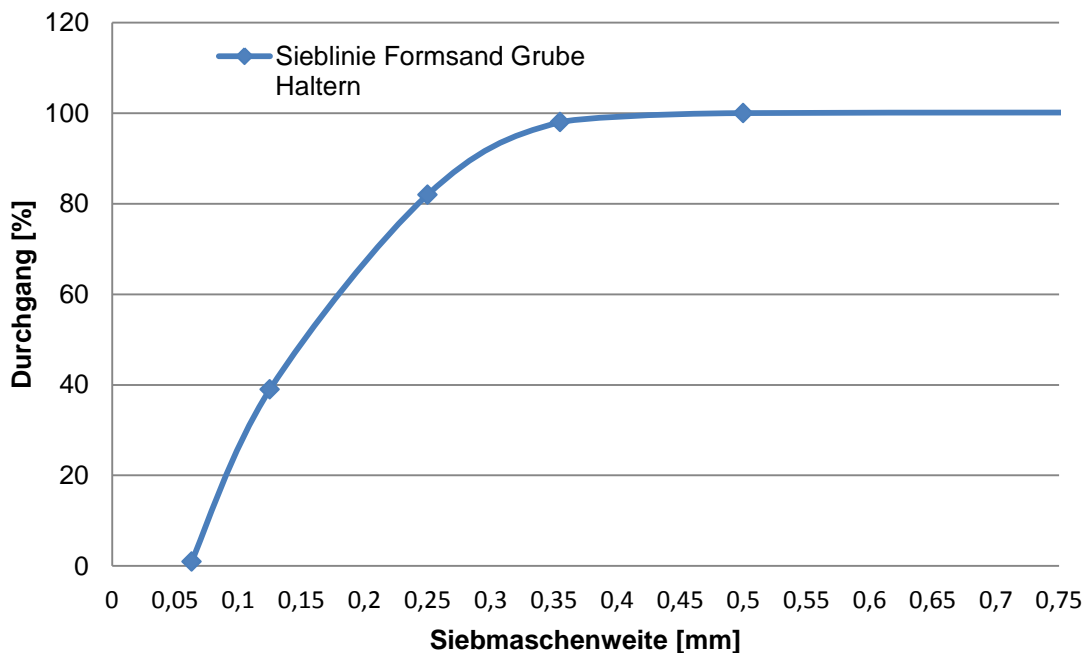


Abbildung 5 Sieblinie Quarzsand der Grube Haltern

Gröberer Sand lässt sich bei gleicher Verdichtungsarbeit besser verdichten als feinerer, da sich bei zunehmender Feinheit die spezifische Oberfläche vergrößert und somit der Reibungswiderstand größer ist. Mit feineren Sanden verbessert man jedoch das konturenscharfe Abformen des Modells und damit die Wiedergabe feinsten Oberflächen und Kanten.

Bentonite sind hochbindfähige Tone aus wasserhaltigem Aluminiumsilicat, die als kolloidale, geschichtete Teilchen unter $2\mu\text{m}$ Schichtdicke vorliegen. Eine der wichtigsten Eigenschaften von Bentonit ist die Fähigkeit, Wasser unter sechs- bis achtfacher Volumenvergrößerung einzulagern. Dies erklärt auch die plastische Formbarkeit von Tonen. Die Anzahl der eingelagerten Metallionen ist ein Maß für die Quellfähigkeit des Tones. Somit ist ein Natriumbentonit hochquellfähig, ein Calciumbentonit dagegen nur sehr wenig. Das in der Natur vorkommende Calciumbentonit kann mittels Soda (Na_2CO_3) in Natriumbentonit umgewandelt werden. Dies wird auch als Aktivierung bezeichnet. Mit zunehmender Quellfähigkeit nimmt auch die Bindefähigkeit des Bentonits zu. Die Feuerbeständigkeit nimmt jedoch ab.

Neben dem wassergebundenen Formsand gibt es noch ölgebundene Formsande (O.B.B-Sand). Hier kommen oft synthetische Bindemittel zum Einsatz, die auf Öl statt auf Wasser reagieren. Wassergebundener Formsand trocknet schnell aus, was bei ölgebundenen nicht der Fall ist. Weiters sind auch glatte Flächen, klare Kanten und scharfe Ränder mit ölgebundenen Formsanden erreichbar. [12]

Neben den Formstoffen mit einem quellfähigen Binder (Bentonit) gibt es die nicht verdichtbaren Formstoffe. Hierzu zählen Erstarrungsformstoffe, Fließsande,

kunsthartzgebundene Formstoffe oder CO₂-Formstoffe. Bei dem CO₂-Verfahren können als Binder Natriumsilicat (Wasserglas) oder auch flüssige alkalische Phenol-Resol-Harze verwendet werden. Diese Binder härten durch Begasung mit CO₂ aus. [13]

2.3 Wachse

2.3.1 Übersicht und Allgemeines

Da Wachse im Betonbau schon seit langem als Trennmittel zwischen Schalung und Beton im Einsatz sind und damit gute Oberflächenergebnisse erzielt wurden, sollte das Material Wachs genauer untersucht werden. Schon seit Jahrzehnten wird Wachs als Formstoff verwendet, z.B. in der Kerzenindustrie oder im Maschinenbau beim Feinguss bzw. beim Wachs ausschmelzverfahren. Die Definition von Wachs lautet:

„Ein Stoff wird als Wachs bezeichnet, wenn er bei 20°C knetbar, fest bis brüchig hart ist, eine grobe bis feinkristalline Struktur aufweist, farblich durchscheinend bis opak, aber nicht glasartig ist, über 40°C ohne Zersetzung schmilzt, wenig oberhalb des Schmelzpunktes leicht flüssig (wenig viskos) ist, eine stark temperaturabhängige Konsistenz und Löslichkeit aufweist, sowie unter leichtem Druck polierbar ist.“ [14]

Wachse sind organische Verbindungen, die aus Kohlenstoffen, Wasserstoff, Sauerstoff und z.T. Stickstoff bestehen. Sie bestehen aus kristallinen Stoffgemischen, die zur Mischkristallisation befähigt sind und deren Komponenten in der Schmelze homogen miteinander löslich sind. Beim Erwärmen werden Wachse zunehmend plastisch verformbar, bis hin zu einer niedrig viskosen Schmelze.

Der Schmelzpunkt kann bei Wachsen nicht genau definiert werden, sondern befindet sich innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs. [15]

In der wachsverarbeitenden Industrie werden anstelle des Schmelzpunktes der Tropfpunkt und der Erstarrungspunkt bestimmt. Bei Raumtemperatur beträgt die Dichte der Wachse 0,90-1,00 g/cm³. [15]

Zusammensetzung:

„Nach einer Neuformulierung eines Sonderausschusses der Deutschen Gesellschaft für Fettwissenschaft (DGF) ist der Begriff Wachse im engeren Sinne eine Sammelbezeichnung für Ester langkettiger Fettsäuren (C₂₄–C₃₆), (Wachssäuren) mit langkettigen Alkoholen (Fettalkohole) [C₁₅–C₃₆; z.B. Cetylalkohol (Hexadecan-1-ol, C₁₆H₃₃OH) und Stearylalkohol (Octadecan-1-ol, C₁₈H₃₇OH)], Triterpen- oder Steroidalkoholen (zum Beispiel Ambrein, Betulin), die verbreitet in Pflanzen und Tieren vorkommen.“ [16]

Paraffin ist eine Begriffsbezeichnung für bestimmte Wachse, bezeichnet z.B. als Paraffinwachs oder auch Mineralwachs. Sie können unterteilt werden in dünnflüssige Paraffine, dickflüssige Paraffine und Hartparaffine. Der Unterschied von Paraffinen zu weiteren Wachsen liegt hauptsächlich in der chemischen Zusammensetzung. In Hartparaffinen dominieren die n-Alkane und in Mikrowachsen die Iso-Alkane. Beide Stoffe weisen ähnliche physikalische Eigenschaften auf und fallen unter die Definition von Wachs. Paraffine werden im Gegensatz zu Wachsen ausschließlich aus Schmierölschnitten der Vakuumdestillation, Braunkohle und bituminösen Schiefern gewonnen. [17]

Wachse lassen sich in vier Hauptgruppen unterteilen:

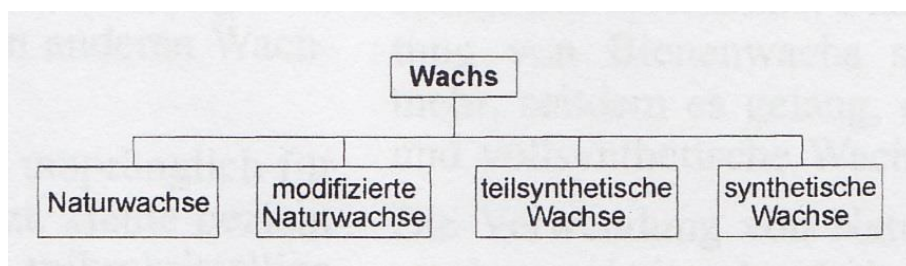


Abbildung 6 Klassifizierung der Wachse [15]

Naturwachs lassen sich wiederum in fossile (Mineralwachs) und nicht fossile Wachs (rezente Wachs) gliedern.

Mineralische Wachs sind z.B. Ozokerite oder Montanwachs¹. Ozokerite sind reine, neutrale und feste Kohlenwasserstoffwachs, welche durch mehrfache Raffination aus Wachsen mineralischen Ursprungs gewonnen werden.

Ein rezentes Wachs ist z.B. das Carnaubawachs, welches das wichtigste in der Natur vorkommende Hartwachs ist. Carnaubawachs ist eines der höchstschmelzenden und härtesten Naturwachs und wird aus der Fächerpalme gewonnen. Weitere rezente Wachs sind das Candellilawachs und das Bienenwachs.

Modifizierte Naturwachs werden vorwiegend aus den Vakuumdestillationsrückständen der Schmierölverarbeitung oder der Destillation von Naturwachsen gewonnen. Die entstehenden Mikrowachs unterscheiden sich durch ihre Kristallstruktur von anderen Wachsen.

¹ Wird aus bitumenhaltiger Braunkohle gewonnen und kann als fossiles Pflanzenwachs betrachtet werden.

Eigenschaften:

- Gute Klebrigkeit
- Mikrokristalline Struktur
- Gute Elastizität
- Geringe thermische Expansion

Durch Zusatz von mikrokristallinem Wachs zu Paraffinen kann die sekundäre Kristallumwandlung² reduziert werden, was mit einer Verringerung der Volumenkontraktion einhergeht. [15]

Teilsynthetische Wachse gewinnt man aus Naturwachsen. Hierzu werden die Vorgänge Oxidation, Veresterung oder Hydrierung angewandt.

Vollsynthetische Wachse werden durch die Verfahren Polymerisation, Kondensation oder Addition gewonnen. Die Bezeichnung vollsynthetisch ist an die Bedingung geknüpft, dass die Ausgangsstoffe synthetischer Herkunft sind.

Durch das Zusammenschmelzen mehrere Wachsarten lassen sich zahlreiche Wachssorten herstellen, die Kombinationswachse genannt werden.

2.3.2 Modifikation von Wachsen durch Harze

Natürliche Harze sind Materialien, die von balsamischen Harzen wie Weihrauch und Myrrhe über härtere rezente Harze wie Dammar bis hin zu fossilen Lackharzen reichen. Künstliche Harze werden entweder aus niedermolekularen Verbindungen durch Polymerisation aufgebaut oder durch Abwandlung von natürlichen hochmolekularen Stoffen erhalten. Mit der Beigabe von Harzen in Wachsmischungen werden eine Reduktion der Volumenkontraktion sowie eine Verbesserung der Klebrigkeit erreicht. [15]

² Als **Kristallisation** bezeichnet man den physikalischen Vorgang der Verhärtung, der aus der Bildung von Kristallen herrührt.

Rohstoff(e)	Tropfpunkte DIN 51801 [°C]	Penetration DIN 51579 [1/10 mm]	Eigenschaften	Einflüsse in Wachskompositionen
Carnaubawachs	80–82	< 2	glänzend, aromatischer Geruch	Aufhärtung weicher Wachse
Bienenwachs	60–62	10–14	leicht knetbar, honigartiger Geruch	Geschmeidigkeit und Modellierfähigkeit werden verbessert
Ozokerite weich mittelhart	50–70 74–78	> 20 < 20	geschmeidig, knetbar, z. T. schabbar, geschmack- u. geruchlos	In Abhängigkeit vom Penetrationswert wirken sie plastifizierend oder härtend
Mikrowachs (plastisch)	76–80	20–28	zähplastisch, bildet mit allen Wachsen eine homogene Schmelz	Verbesserung der Knet- und Modellierfähigkeit, plastizitätserhöhend
Fischer-Tropsch-Hartparaffine	96–115	< 3	glanzverstärkende Wirkung	Verbesserung der Elastizität
Vinylacetat-Copolymer	-	< 5	gute Polierbarkeit, schabfähig, Gleitmittel	erhöht die Standfestigkeit, aufhärtend
Polyethylenwachse	-	-	zähflüssig, hart, glänzend	aufhärtend und gleichzeitig viskositätserhöhend
Dammarharz	100–120	-	spröde-hart, aromatischer Geruch	Klebefähigkeit wird verbessert, aufhärtend

Abbildung 7 Eigenschaften einiger Rohstoffe für Modifikation von Wachsen [15]

In Abbildung 7 sind mehrere Rohstoffe für die Herstellung von Wachskompositionen aufgelistet. Weiteres sind auch die Einflüsse der einzelnen Rohstoffe auf die Wachskomposition ersichtlich.

2.3.3 Dentalwachse

Dentalwachse sind Kompositionen verschiedener Wachsarten, Harzen und Zusatzstoffen. Je nach Zusammensetzung können Eigenschaften wie Härte, Elastizität, Fräsbarkeit, Schmelzpunkt, Klebrigkeit und Ausdehnungskoeffizient eingestellt werden. Durch die Entwicklung neuartiger Wachsprodukte auf Erdölbasis (synthetische Produkte) wurden wesentliche Qualitätsverbesserungen erreicht. So werden vorwiegend makro- und mikrokristalline Paraffine und Harze eingesetzt, um die Eigenschaften zu variieren. [15]

Dentalwachse können entsprechend ihrer Eigenschaften und Anwendungsgebiete in vier Hauptgruppen eingeteilt werden. [15]

- Gusswachs/ Fräswachse
- Modellierwachse
- Klebewachse
- Bisswachse

Gusswachse sollten biegsam sein, ohne zu brechen, und erweichen, ohne zu bröckeln, und gut fließfähig sein. Grundsätzlich ist ein niedriger Erstarrungspunkt von Vorteil, da somit die Volumenänderung beim Abkühlen niedrig gehalten werden kann. [15]

Bei **Fräswachsen** bewähren sich relativ harte Wachse am besten, da hier eine gute Spannbildung erreicht wird. Jedoch muss beachtet werden, dass die Härte und somit auch das Fräsverhalten bei zunehmender Raumtemperatur abnehmen. [15]

2.3.4 Thermisches Dimensionsverhalten

Da Wachse einen relativ großen Wärmedehnkoeffizienten aufweisen (ca. 100-mal so groß wie Stahl), hat das Expansions-Kontraktionsverhalten eine große Bedeutung. Ausgedrückt wird die Längenänderung durch den Ausdehnungskoeffizienten α , der durch Längenzuwachs je Längeneinheit bei einer bestimmten Temperaturdifferenz definiert ist. Die Einheit von α ist K^{-1} . [15]

$$\alpha = \frac{1}{L} * \frac{dL}{dT} \quad [1]$$

dT Temperaturänderung

$\frac{dL}{L}$ relative Längenänderung

Der volumenspezifische Ausdehnungskoeffizient γ gibt das Verhältnis zwischen der relativen Volumenzunahme und der Temperaturänderung eines bestimmten Körpers an.

$$\gamma = \frac{1}{V} * \left(\frac{dV}{dT} \right) \quad [2]$$

dT Temperaturänderung

$\frac{dV}{V}$ relative Volumenzunahme

Die thermische Expansion ist bei Wachsen keine feste Größe, sondern von der Vorgeschichte der Herstellung und des jeweiligen Temperaturbereiches abhängig. Eine Besonderheit bei Wachsen ist, dass die Kontraktion bzw. Expansion beim Übergang von der flüssigen in die feste Phase und umgekehrt, bedingt durch die Phasenumwandlung in einem definierten Temperaturbereich, wesentlich größer ist. Ein Trocknungsschwinden wie bei Beton kann bei Wachsen ausgeschlossen werden. [15]

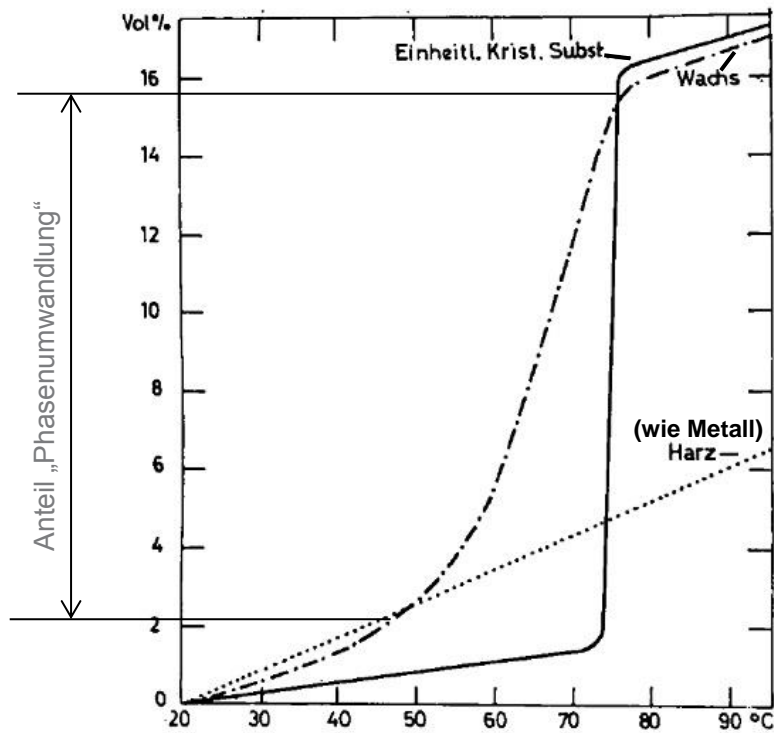


Abbildung 8 Ausdehnungskurven [18]

Wie jeder feste Stoff dehnt sich Wachs bei Zufuhr von Wärme kontinuierlich nur gering aus. Bei weiterer Wärmezufuhr (bei ungefähr 75°C) fällt das Kristallgitter plötzlich zusammen, hier findet ein Übergang von kristallinem in den flüssigen Zustand statt. Durch diese Zustandsänderung erfolgt ein sprunghafter Anstieg der Ausdehnung (siehe Abbildung 8). Das amorphe Harz hat eine kontinuierliche Ausdehnung, ähnlich wie Metalle. Der feste Zustand geht ohne Anzeichen eines Schmelzpunktes in den schmelzflüssigen über. Wachs liegt ungefähr in der Mitte zwischen amorphen und kristallinen Stoffen. [18]

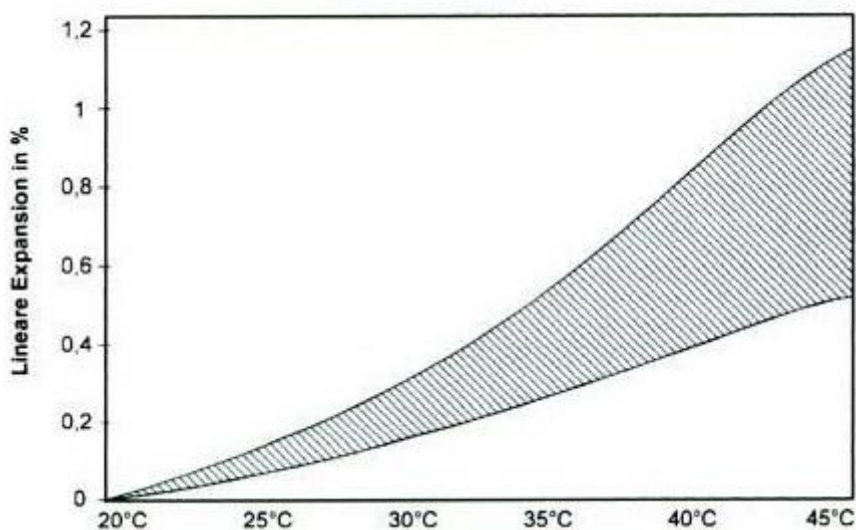


Abbildung 9 Linearer Expansionsbereich von Gusswachsen [15]

Wie bei Abbildung 9 ersichtlich, beträgt die lineare Expansion zwischen 20°C und 45°C 0,51% bis 1,16%. In Abbildung 10 ist die Volumenkontraktion von 10°C über dem jeweiligen Tropfpunkt bis 20°C ersichtlich. Hier beträgt die Kontraktion 9% bis fast 16%. Diese hohen Werte entstehen durch das Überschreiten des Tropfpunktes, was mit dem Zusammenfall des Kristallgitters einhergeht. [15]

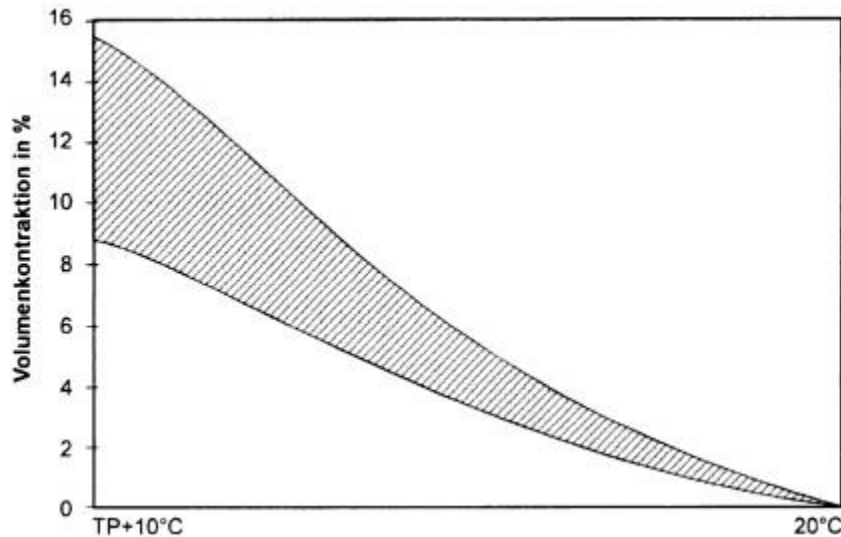


Abbildung 10 Volumenkontraktion [15]

Es ist zu erkennen, dass sich bei der Herstellung die Kontraktion und Expansion durch bestimmte Kombinationen von Wachsen mit besonderen Harzen und Füllstoffen beeinflussen lassen. Es gilt die Forderung in der Praxis, Wachse bei Temperaturen so niedrig wie nur möglich zu verarbeiten. Wachs hat eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit. In einem Wachskörper verläuft die Abkühlungskontraktion nicht gleichmäßig, was zu hohen Spannungen und Deformationen in den Wachsteilen führt. Der Grund dieses Verhaltens ist, dass das erstarrende Wachs schwindet und die noch weichen Anteile abzieht. [18]

Ein großer Teil des Schwindens kann durch Nachdrücken von Wachs beim Abkühlprozess verhindert werden (siehe Abbildung 11). Diese Methode wird beim Modellwachsen für den Metallpräzisionsguss angewandt. Hier wird zuerst auf mechanischem Wege ein Urmodell aus Stahl hergestellt. Nach diesem Urmodell wird eine mehrteilige Stahlform (Kokille) gefertigt. Mittels einer speziellen Pressapparatur wird Wachs in die Kokille gepresst. [18]

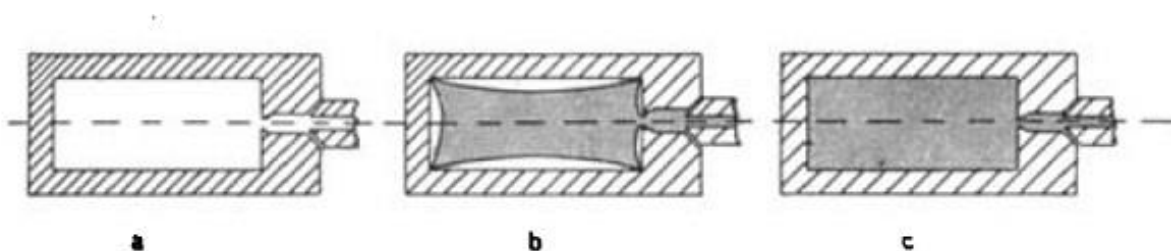


Abbildung 11 Kokillenguss [18]

Beim Einpressen mit einer Wachs­temperatur von ungefähr 60°C-75°C kühlt das anliegende Wachs an der kalten Kokillenwand von außen nach innen ab. Wie in b (Abbildung 11) ersichtlich, beginnt das Wachsmo­dell sich zu verformen. Durch Nachpressen wird das Einfallen des Modells verhindert. Je nach Größe wird bei ungefähr 35°C das Modell aus der Form genommen.

Der Nachschwund findet beim Abkühlen auf Raumtemperatur statt. Dieser ist wiederum von der Wachsmischung abhängig. Der lineare Nachschwund von 35°C auf 20°C, liegt ungefähr zwischen 0,7-1,2%. [18]

2.3.5 Plasto-elastisches Verhalten

Man spricht von einem **elastischen Verhalten**, wenn der unter Einwirkung einer Kraft deformierte Körper nach Beendigung der Krafteinwirkung wieder seine ursprüngliche Form einnimmt. Plastisches Verhalten tritt meist nicht in reiner Form auf, sondern besteht meist aus einem elastischen Anteil und einem plastischen Anteil. [15]

Die folgenden Abbildungen zeigen das Plasto-elastische Verhalten verschiedener Wachse:

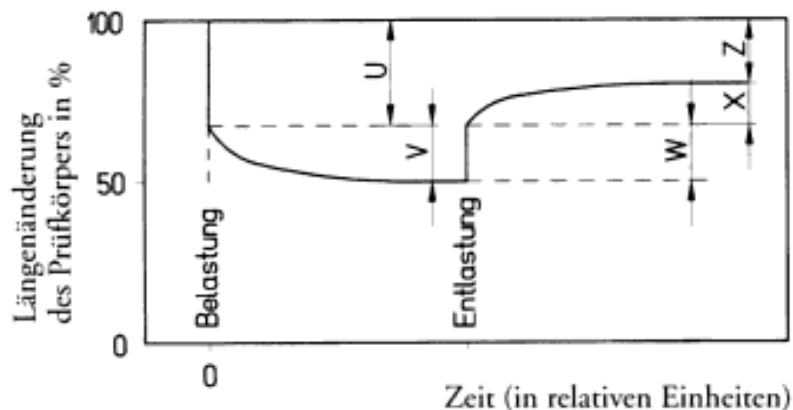


Abbildung 12 Plasto-elastische Verformung von Wachsen (nach Höppler) [15]

Der Wachs­prüfkörper wird spontan verformt (U), was zu einer Verringerung der Ausgangslänge führt. Bei anhaltender Belastung folgt eine nachwirkende Kompression (V). Durch Entlasten der Wachsprobe kommt es zu einer plötzlichen Rückfederung (W) und nachfolgend zu einer Nachverformung (X). Die Probe nimmt nicht mehr die Ursprungsform an und es bleibt ein plastischer Anteil (Z) (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13). [15]

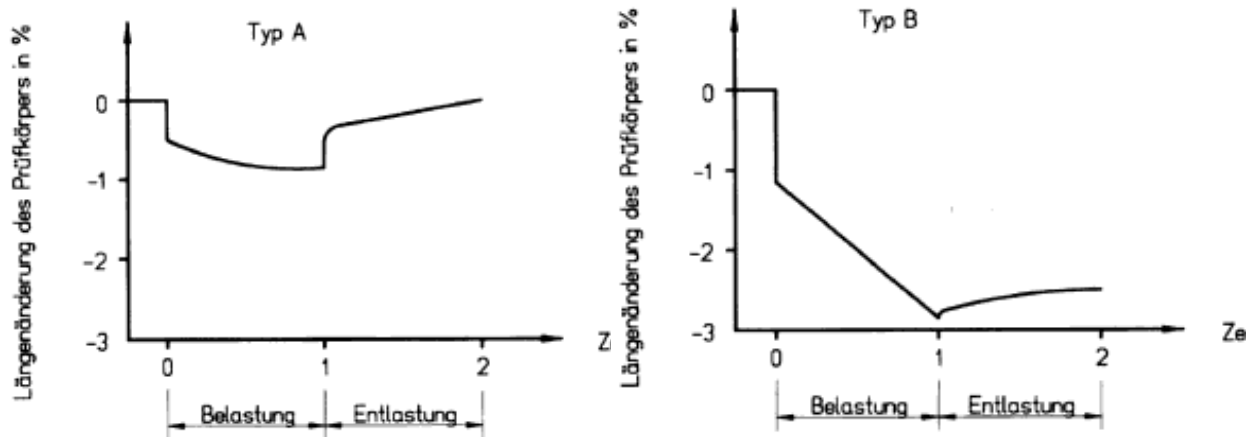


Abbildung 13 Plasto-elastisches Verhalten von 2 zahnärztlichen Wachsen bei 30°C und einer Prüflast von 30N (nach Rehberg) [15]

2.4 Bitumen

Eines der ersten in Betracht kommenden Formstoffmaterialien war der Asphalt bzw. das verwendete Bindemittel Bitumen. Im diesem Kapitel werden als Erstes die grundlegenden Eigenschaften und Arten von Bitumen aufgelistet und beschrieben.

Bitumen ist ein nahezu nicht flüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstämmiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und in Toluol vollständig oder nahezu vollständig löslich ist. Es besteht aus komplexen, hochmolekularen Gemischen von Kohlenwasserstoffen mit unterschiedlicher chemischer Struktur.

Da es bei Raumtemperatur hochviskos bzw. fest ist und bei Erwärmung auf 100-200°C je nach Bitumenart gut formbar ist, würde es sich für die Herstellung von Formen grundsätzlich gut eignen. Da reines Bitumen als Formstoff zu geringe Festigkeitseigenschaften aufweist, vermischt man Bitumen mit Mineralstoffen und Zuschlägen und erhält somit den bekannten technischen Asphalt. [19]

2.4.1 Eigenschaften von Bitumen

Es ergeben sich für die Praxis folgende wichtige Eigenschaften:

- Konsistenz
- Fließverhalten
- Haftverhalten
- Alterung

Mit bestimmten Prüfverfahren, die im Folgenden angeführt sind, lassen sich diese Eigenschaften überprüfen.

Penetration:

Sie ist ein Maß für die Härte des Bitumens. Definiert ist sie als die Eindringtiefe einer genormten Nadel, die bei 25°C für 5 Sekunden mit 100g belastet wird. Umso geringer die Eindringtiefe der Nadel, desto härter ist das Bitumen. Die am meist verwendeten Sorten in Österreich sind: 35/50 50/70, 70/100 und 160/220³ [21], wobei z.B. 160 für 160*0,1mm Eindringtiefe steht. [19],[ÖNORM EN 1426] [20]

Erweichungspunkt:

Bitumen haben keinen definierten Schmelzpunkt, da es Vielstoffgemische sind. Sie haben einen großen Übergangsbereich, der von weich bis hin zu fast flüssig reicht. Deshalb wird bei Bitumen der Erweichungspunkt mittels Ring-Kugelverfahren bestimmt. Hierbei wird jene Temperatur bestimmt, bei der eine bestimmte Verformung durch eine aufgelegte Stahlkugel verursacht wird.

Plastizitätsspanne-Gebrauchsspanne:

Brechpunkte und Erweichungspunkte sind Temperaturpunkte, bei denen Bitumen eine bestimmte Zähigkeit aufweisen. Unterhalb der Brechpunkttemperatur ist Bitumen spröde, oberhalb der Erweichungstemperatur zunehmend flüssig. Zwischen den beiden Übergängen liegt ein Zustandsbereich zähplastischen Verhaltens, der als Plastizitätsspanne oder Gebrauchsspanne bezeichnet wird. Die Plastizitätsspanne und die Spanne der Dauergebrauchstemperatur des fertigen Produktes, z.B. Asphalt, sollen möglichst aufeinander abgestimmt sein. Herkömmliche Straßenbaubitumen nach ÖNORM EN 1427 verfügen über Plastizitätsspannen von 50°C-60°C. [19]

Fließverhalten-Rheologie:

Bitumen gehorchen zwei physikalischen Gesetzen: dem der Elastizität und dem der Viskosität. Bei hohen Temperaturen zeigen Bitumen ein viskoses Verhalten (Newton'sches Fließen). Bei niedrigen Temperaturen und kurzer Belastungsdauer verhält sich Bitumen rein elastisch und Verformungen sind reversibel (Hooke'sches Federelement). Der gebrauchrelevante Temperaturbereich für Bitumen liegt zwischen dem spröde-elastischen und dem rein viskosen Verhalten. Dieser Bereich nennt sich viskoelastisch und kann nur durch komplexe Modelle dargestellt werden. [19]

³ Die Zahlenwerte der Bitumen-Bezeichnung geben an, in welchem Bereich die Eindringtiefe der Nadel liegen darf.

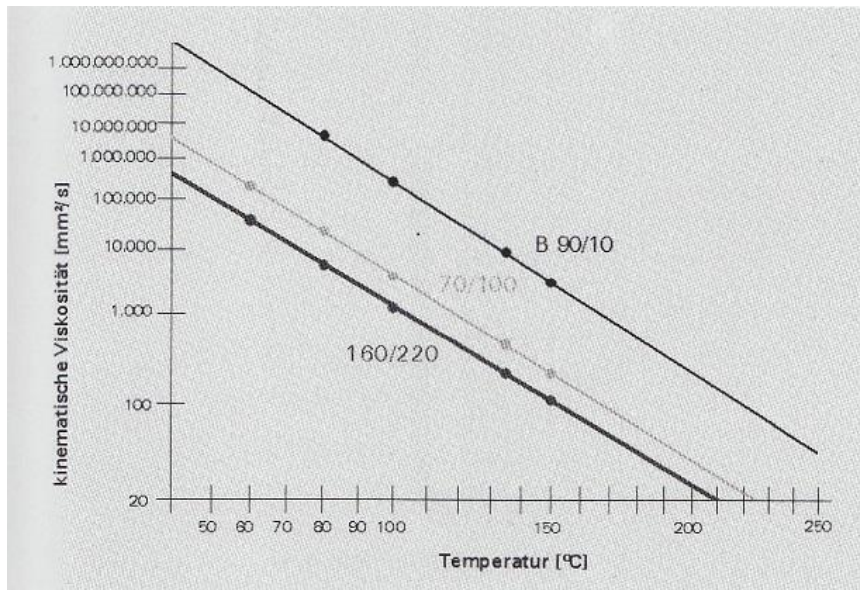


Abbildung 14 Viskositäts-Temperaturverhalten von Straßenbaubitumen [19]

Haftverhalten:

Eine der wichtigsten Eigenschaften des Bitumens ist das Haftverhalten. Das Haftverhalten bezieht sich auf die Wechselwirkung von Bitumen mit anderen Stoffen. Diese anderen Stoffe sind bei Asphalten z.B. Gesteinsanteile. Die Grenzflächenspannung zwischen Bitumen und dem umhüllenden Medium kann als charakteristische Kenngröße angesehen werden. Voraussetzung für eine optimale Haftung ist eine einwandfreie Benetzung. Generell gilt, dass Bitumen gegenüber saurem (silikatischem) Gestein sowie verwittertem Basalt ungünstige Hafteigenschaften aufweist. [19]

Alterung:

Die Alterung des Bitumens kann im Wesentlichen auf zwei Vorgänge reduziert werden.

- Reaktion mit Luftsauerstoff (Oxidation)
- Verdunstung noch verbliebener niedrigsiedender Komponenten aufgrund hoher Temperaturen

Die Kurzzeitalterung ist im Wesentlichen eine thermische Alterung, die auf einer chemisch-physikalisch bedingten Gleichgewichtsveränderung im Kolloidsystem beruht. Einflussfaktoren sind vor allem hohe Temperaturen und Einwirkung von Luftsauerstoff. [19]

Grundsätzlich kann man zwischen mehreren Bitumenarten unterscheiden:

2.4.2 Straßenbaubitumen

Straßenbaubitumen werden in erster Linie im Verkehrsflächenbau eingesetzt.

Grundsätzlich werden sie zur Herstellung klassischer Walzasphalte verwendet, wobei die Sorte 70/100 das Standardbitumen in Österreich ist. Eingeteilt werden sie gemäß ihrer Härte, gemessen mittels Nadelpenetration. Die wesentlichen Anforderungen an harte Straßenbaubitumen werden in EN 13924 bzw. normale Straßenbaubitumen nach ÖNORM B 3610 beschrieben.

2.4.3 Polymermodifiziertes Bitumen

Die Eigenschaften dieses Bitumens werden durch die Zugabe von einem oder mehreren organischen Polymeren modifiziert. Polymermodifizierte Bitumen unterscheiden sich von herkömmlichen Bitumen in folgenden wesentlichen Punkten:

- Höherer Erweichungspunkt bei gleicher Penetration
- Höhere Plastizitätsspanne
- Hochelastisches Bitumen
- Bessere Verformungsbeständigkeit

Unterschieden werden polymermodifizierte Bitumen hinsichtlich der Art des zugegebenen Polymeren:

- Thermoplaste
- Elastomere
- Thermoplastische Kunststoffe

Polymermodifiziertes Bitumen wird vorwiegend im hochrangigen Straßenbau eingesetzt. Sie sind in erster Linie nach ihrer Penetration (erster Teil der Bezeichnung, z.B. 10/40) und zusätzlich nach dem Erweichungspunkt eingeteilt, der am Ende angegeben wird, z.B. PmB10/40-60. [19]

2.4.4 Sonstige modifizierte Bitumen

Durch Zugabe von **Kohlenwasserstoffharzen** wird der Erweichungspunkt angehoben und die Wärmestandfestigkeit verbessert. Gleichzeitig bewirkt die Harzzugabe eine Verbesserung der Haftung am Gesteinsmaterial. [19]

Durch Zugabe von **hochmolekularen Industriegewachsen** wird das Viskositäts-Temperaturverhalten verändert. Bei hohen Temperaturen wird die Viskosität herabgesetzt, wodurch der Einbau und Mischvorgang vereinfacht wird. Jedoch im Gebrauchstemperaturbereich wird die Viskosität hinaufgesetzt, wodurch die Standfestigkeit

erhöht wird. Je feiner verteilt die Wachse im Bitumen vorliegen, umso deutlicher ist die Wirkung.

2.5 Asphalt

Da Asphalt in höheren Temperaturbereichen gut formbar ist und bei niedrigen Temperaturen einen festen Zustand aufweist, schien es möglich, Asphalt als Formstoff für das Projekt UHPC-Schale zu verwenden. Sämtliche fachliche Literatur zum Thema Asphalt kommt aus dem technischen Straßenbau.

Asphalt ist ein Gemisch aus Gesteinsmaterial und Erdölbitumen als Bindemittel, die eine grenzflächenaktive Verbindung miteinander eingehen. Um die richtige Zusammensetzung des Asphaltes zu finden, ist das gewünschte spätere Verhalten des eingebauten Mischguts maßgebend. Typischer technischer Asphalt im Straßenbau besteht in der Regel aus 93-96 M% Gestein und 4-7 M% Bindemittel. Dies gilt für den idealisierten Fall kugelförmiger Körner⁴. [19]

2.5.1 Wichtige Asphaltkenngößen

Hohlraum des Korngerüsts VMA (Voids in Mineral Aggregate) [Vol.-%]

Darunter versteht man den Hohlraum zwischen den verschiedenen großen Gesteinskörnern eines Asphalts ohne Bindemittel. Er ist abhängig von der eingebrachten Verdichtungsenergie. Der Hohlraum ist umso größer, je gleichkörniger ein Korngemisch ist. Sehr niedrige Hohlraumanteile lassen sich durch Korngerüste mit verschiedenen großen Körnern erreichen. Optimal wäre es, wenn die größten Körner (Stützkörner) ein zusammenhängendes System bildeten und die kleineren Körner (Füller) die Hohlräume füllten.

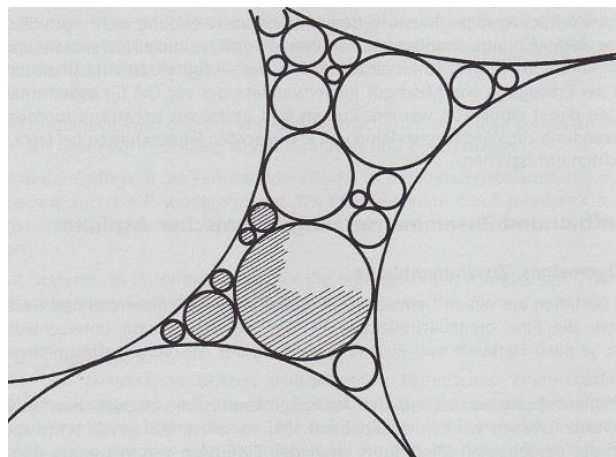


Abbildung 15 Korngerüst [19]

⁴Im Betonbau wird ein Exponent $q=0,2-0,4$, i.d. Regel 0,37 verwendet, um die dichteste Packung für natürlich geformte Körner zu erreichen.

Die im Straßenbau verwendeten Kornsysteme sind nach einer solchen stetigen Korngrößenabstufung aufgebaut. Dies bedeutet, dass sie vom größten bis zum kleinsten Korn ohne Ausfallkörnung alle Zwischengrößen enthalten (siehe Abbildung 15). [19]

$$y = \left(\frac{k}{k_{max}} \right)^q \quad [3]$$

y Anteil der zu betrachtenden Teilkörnung

k Größtkorn der zu betrachtenden Teilkörnung

k_{max} Größtkorn der gesamten Körnung

q Exponente

Nach Fuller erreicht man die dichteste Lagerung, wenn man die Exponente q gleich 0,5 setzt. [19]

Hohlraum im Asphalt V_m [Vol.-%]

Durch das Umhüllen der Körner mit Bitumen verkleinert sich der VMA im Gesteinsgerüst um das Volumen des Bitumens. Dieser nun verbleibende Hohlraum im Asphalt, auch V_m genannt, ist eine der wichtigsten Kenngrößen des Asphalts.

Bindemittelgehalt [M.-%, Vol.-%]

Das ist die auf das Gesamtvolumen bzw. die Gesamtmasse des Asphalts bezogene Menge des eingebrachten Bitumens. [19]

2.5.2 Aufbau, Zusammensetzung

Um eine optimale Asphaltmischung zu erreichen, ist es das Ziel, ein möglichst dichtes Korngerüst (kleiner VMA) mit einer hinreichenden Bindemittelmenge zu verkleben.

Das Bindemittel sollte

- dauerhafte Umhüllung und Verklebung der Gesteinskörner sicherstellen
- die im Gesteinsgerüst vorhandenen Hohlräume je nach Verwendungszweck füllen
- durch Schmierwirkung als Verdichtungshilfe wirken

Ziel ist es, die Bitumenmenge so zu wählen, dass alle Körner im Gesteinsgerüst vollständig mit einem Bitumenfilm umhüllt sind und der durch die Verdichtung minimierte VMA durch das zugeführte Bitumen auf ein V_m von 2-5 Vol.-%, je nach Mischgutsorte, verkleinert wird.

Ein Hauptkriterium ist, dass ein Hohlraum von 2 Vol.-% nicht unterschritten wird. Das bedeutet, dass der VMA nicht zur Gänze mit Bitumen aufgefüllt wird. Dies ist sehr wichtig, da Bitumen unter Wärmeeinwirkung eine ca. 20-fach größere Volumenzunahme erfährt als das

Gestein. Um Verringerungen der Festigkeit des Asphalts zu vermeiden, benötigt das Bitumen diesen Hohlraum als Expansionsraum.

Bei zu geringem Hohlraum würde das Bitumen das Gesteinsgerüst auseinander drücken und dadurch die gegenseitige Abstützung und Verzahnung des Korngerüsts aufheben.

In der Regel erfüllt eine Bitumenmenge von 4-7 M.-% diese Eigenschaften des Asphaltmischguts. [19]

2.5.3 Asphaltmischguttypen

Asphalte werden nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt. Sie werden nach ihrer Funktion, aber auch nach ihren kompositionellen Merkmalen eingeteilt.

Asphaltbeton (AC) hat eine stetige Kornzusammensetzung, nach dem Betonprinzip. Diese Asphalte können sowohl mit Straßenbaubitumen als auch mit Polymermodifizierten Bitumen hergestellt werden.

Splittmastixasphalt (SMA) ist für sehr hohe Belastungen konzipiert. Dies wird durch eine Erhöhung des Grobsplittanteils und weitgehende Verringerung des Feinsplittanteils bei gleichzeitig hohem Füllergehalt erreicht. Als Gesteinsmaterial sollte ausschließlich Hartsplitt verwendet werden. Die Oberfläche ist sehr grob (großkörnig), kann aber durch Einwalzen von Abstreusplitt verbessert werden.

Drainasphalt weist einen Hohlraumgehalt von bis zu 17 Vol.-% auf. Durch weitere Erhöhung des Grobsplittanteils wird ein Hohlraummaximum erreicht. Durch diesen Monokornaufbau werden die Kontaktpunkte von Korn zu Korn verringert. Seine besonderen Eigenschaften sind Lärminderung und die Drainagewirkung. [19]

Bei **Gussasphalt (MA)** ist der Bindemittelanteil so gewählt, dass alle Hohlräume des Gesteinsgerüsts mit Bitumen verfüllt sind. Gussasphalt ist durch diesen hohen Bitumenanteil und sein speziell aufgebautes Gesteinsgerüst selbstverdichtend und muss somit nicht verdichtet werden. Unterteilt wird er durch sein Größtkorn (MA 4, MA 8 und MA 11). [19]

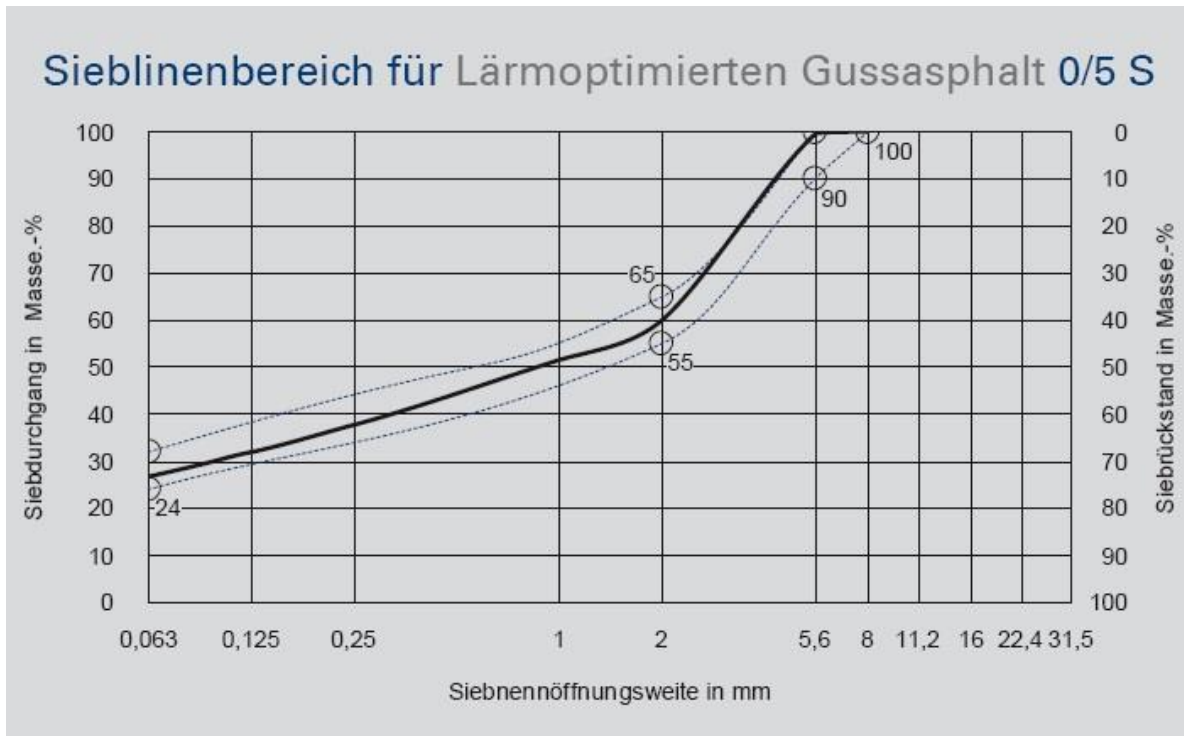


Abbildung 16 Sieblinie Gussasphalt 0/5 S [22]

In Abbildung 16 ist ersichtlich, dass Gussasphaltsieblinien nicht nach dem Betonprinzip (Fuller) arbeiten, sondern mit un stetigen Sieblinien. Des Weiteren charakterisiert sich ein Gussasphalt durch einen relativ hohen Feinanteil ($< 0,063\text{mm}$) von 25-30 M%. [22]

2.5.4 Bindemittelbemessung bei hohlraumarmen Mischgutarten

Oberflächentheorie

Diese Theorie setzt voraus, dass jedes Korn vollständig mit Bindemittel mit einer bestimmten Schichtdicke umhüllt sein muss. Folglich kann durch die Kornoberfläche und die Schichtdicke der Bindemittelanspruch des Mischgutes berechnet werden. Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass kleinere Körner mit einem dünneren Bindemittelfilm umgeben sind als größere Körner (siehe Abbildung 17 bzw. [23]). Für hohlraumarme Mischungen ist diese Variante der Bindemittelberechnung nicht geeignet.

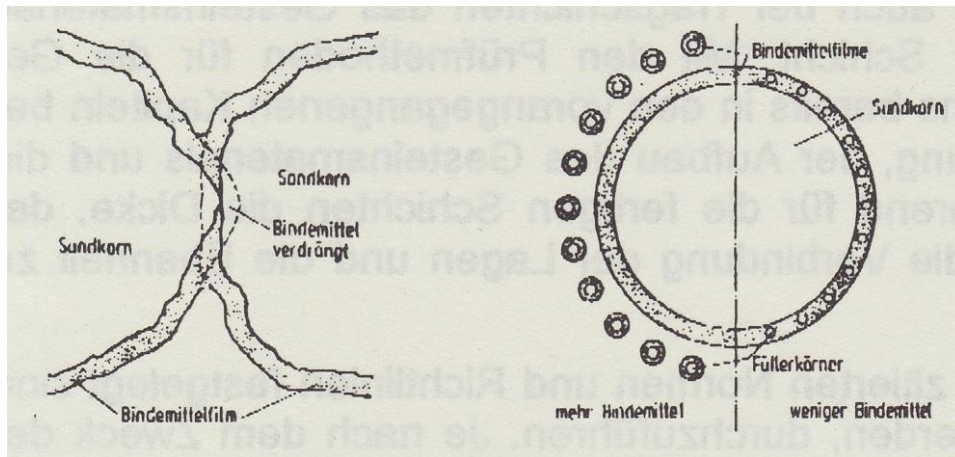


Abbildung 17 Oberflächentheorie [23]

Mörteltheorie

Die Mörteltheorie geht von der Füllung der Hohlräume mit dem Mörtel aus. Der Mörtel besteht aus Bindemittel und Füller des Mischgutes. Eine weitere Aufgabe des Mörtels ist eine Verfestigung des Mischgutes durch die aussteifende Wirkung der Feinteile. Diese Theorie kann nur als ungefährender Anhalt gewertet werden, da die Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der dichtesten Kornpackung des füllergefreien Mineralstoffgemisches zu groß sind. [23]

Hohlraumgehalttheorie

Sie besagt, dass der Bindemittelgehalt in einem ganz bestimmten Verhältnis zum Hohlraumgehalt der Mineralstoffe im eingebauten Zustand stehen muss. Hier geht man nicht mehr von einer gleichmäßig dicken Bindemittelhülle aus, sondern sieht das Bindemittel lediglich in den Hohlräumen zwischen den Körnern.

Die Problematik der Hohlraumtheorie ist in der experimentellen Bestimmung des Hohlraumgehalts der dichtesten Kornpackung zu sehen, weswegen die dichteste Kornpackung für hohlraumarmes Mischgut am fertigen Gemisch einschließlich Bindemittel ermittelt wird. Empirisch wurde festgestellt, dass die Kornpackung, die sich in einem Asphaltbeton Fahrbahn Belag nach sachgemäßem Einbau und nach mehrjähriger Verkehrsbelastung einstellt, in den meisten Fällen mit der Kornpackung vergleichbar ist, die sich nach normgerechter Verdichtung an Probekörpern nach Marshall ergibt. Die Bindemittelbemessung über die Hohlraumgehalte bei unterschiedlichen Bindemittelmengen im Zusammenhang mit den Trag-Fließwerten nach DIN 1996-11 bringen im Allgemeinen befriedigende Ergebnisse. [23]

Stabilitätsmaximum

Eine weitere Möglichkeit den Bindemittelgehalt festzustellen besteht darin, denjenigen Bindemittelgehalt als Optimum anzusehen, der dem verdichtenden Mischgut einen besonders hohen Verformungswiderstand verleiht (siehe Abbildung 18). Für die Messung des Widerstandes gegen eine aufgezwungene Verformung bis Korngrößen von 22mm eignet sich das Marshall Verfahren [ÖNORM EN 12697-34] [24]. Es werden Proben mit gleichem Mineralstoffgemisch mit unterschiedlichem Bindemittelgehalt hergestellt und geprüft. Abbildung 24 zeigt, dass sich bei einem bestimmten Bindemittelgehalt ein Maximum der Stabilität ergibt. Diese Bemessungsart eignet sich nicht für alle Mischungen. Bei manchen Rezepturen ist das Stabilitätsmaximum sehr gering ausgeprägt, und feinkörnige Mischungen erreichen ihr Stabilitätsmaximum schon bei sehr geringem Bindemittelgehalt. [23]

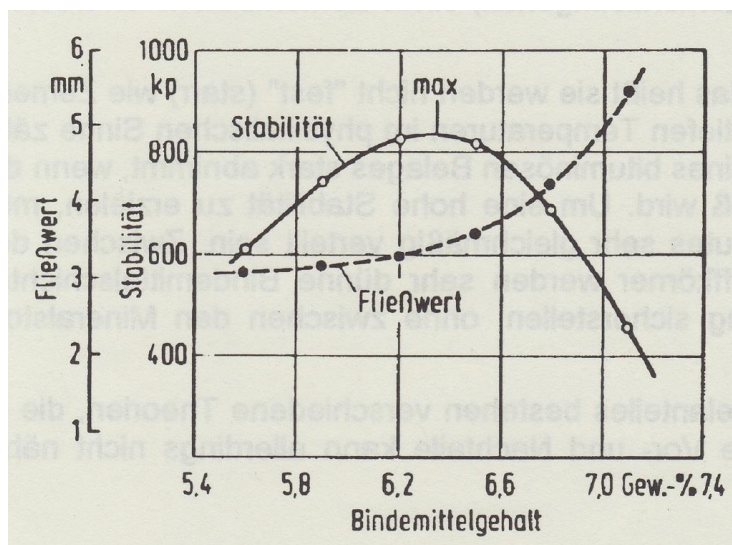


Abbildung 18 Marshall-Kennwerte vom Bindemittelgehalt [23]

2.5.5 Bindemittelbemessung bei Gussasphalt

Der hohe Gehalt an versteifendem Füllerkorn führt dazu, dass der charakteristische Bindemittelüberschuss beim Gussasphalt zu keinen Verformungsnachteilen führt. Grundsätzlich muss angestrebt werden, den Bindemittelüberschuss so gering wie praktisch möglich zu halten, da die Standfestigkeit mit steigendem Bindemittelüberschuss stark abnimmt. Der Bindemittelgehalt darf aber auch nicht zu gering sein, da er sonst seine selbstverdichtenden Eigenschaften verliert. [23]

Die Erhärtung des Gussasphalts beim Abkühlen hat ihre Ursache nur zum Teil in der Zunahme der Bindemittelviskosität. Der wesentliche Teil der Standfestigkeit des Gussasphaltes rührt von folgenden Zusammenhängen: Der Wärmedehnungskoeffizient von Bitumen zu Gestein steht im Verhältnis 20:1. Beim Abkühlen nimmt das Volumen des Bitumens somit um einiges rasanter ab als das des Gesteins. [23]

Durch diesen Effekt werden die einzelnen Körner bei richtiger Bindemitteldosierung fest aneinander gezogen und es entsteht ein gut verspanntes Mineralstoffgerüst mit ausreichender Standfestigkeit. Bei zu hohem Bindemittelüberschuss reicht die Volumenabnahme infolge der Abkühlung nicht aus, um die Mineralstoffkörner fest aneinander zu ziehen. Dadurch erreicht der Gussasphalt nur eine geringe Standfestigkeit. [23]

Mischgut	MA D M1			
	MA 4 M1	MA 8 M1	MA 11 M1	max. Bandbreite
Eigenschaft				
Bindemittelsorte	gemäß Anhang C, Tabelle 10			-
Gesteinsmaterial	gemäß Anhang B, Tabelle 8 und 9			-
Größtkorn D [mm]	4	8	11	-
Bindemittelgehalt [M%]	B _{min} 6,0			0,6 M%
Zusätze	anzugeben			-
Eindringtiefe [mm]	I _{max} 3,5 I _{nc} 0,5			-
Brandverhalten	ÖN B 3585, Tabelle 8 - bei Verwendung in geschlossenen Räumen			-
Siebgröße in mm	Anforderungen an die Sieblinien für die Erstprüfung und die Konformitätserklärung [M%]			
	MA 4 M1	MA 8 M1	MA 11 M1	max. Bandbreite
22,4	-	-	-	12 M%
16	-	-	100	12 M%
11,2	-	100	90 bis 100	12 M%
8	-	90 bis 100	70 bis 90	12 M%
5,6	100	-	-	12 M%
4	90 bis 100	65 bis 90	-	12 M%
2	66 bis 80	53 bis 68	45 bis 60	12 M%
1	anzugeben	anzugeben	anzugeben	-
0,5	35 bis 50	30 bis 45	30 bis 45	12 M%
0,25	anzugeben	anzugeben	anzugeben	-
0,063	24,0 bis 32,0	22,0 bis 30,0	20,0 bis 28	4,0 M%

Abbildung 19 Gussasphaltrezepturen [19]

In Abbildung 19 sind Gussasphaltnmischungen mit sehr hoher Verformungsbeständigkeit und den zugehörigen Siebgrößen von Größtkorn 4 bis 11 ersichtlich.

2.6 Thermoformen mit thermoplastischen Halbzeugen

Im Gegensatz zu den anderen Verfahren wird hier kein Material (Füllstoff) vergossen, sondern im plastischen Zustand verformt.

Unter Thermoformen versteht man das Umformen von thermoplastischen Kunststoffen bei erhöhter Temperatur. Abbildung 20 zeigt den prinzipiellen Ablauf des Thermoformen mittels Vakuumformung.

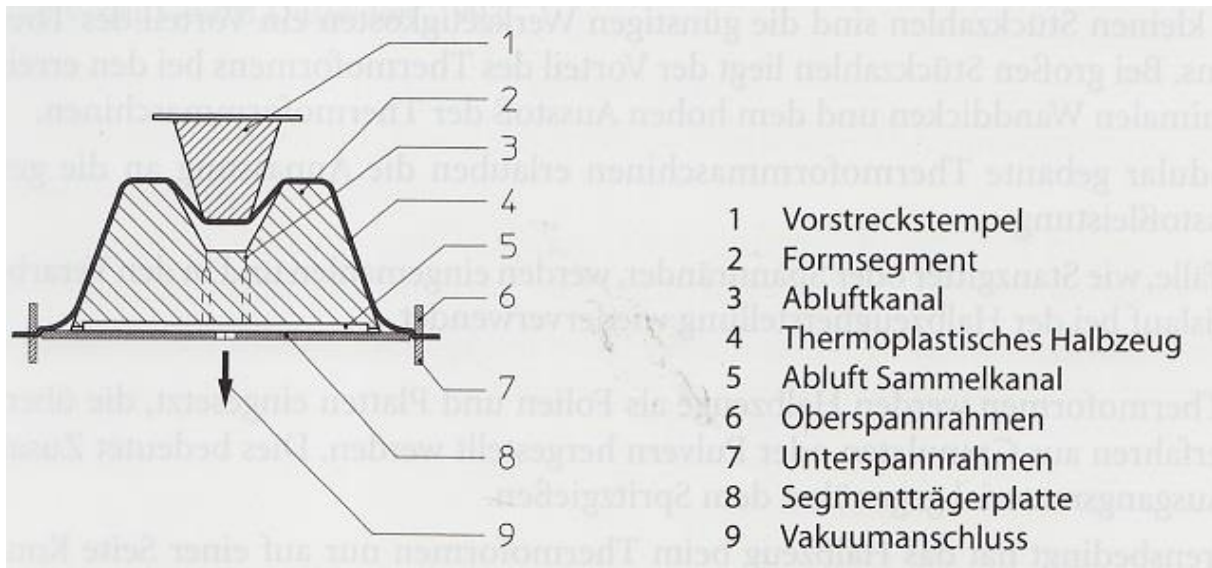


Abbildung 20 Thermoformen [26]

Das Verfahren kann in folgende Verfahrensschritte unterteilt werden:

1. Erwärmen des Halbzeuges auf seine Umformtemperatur im elastoplastischen Bereich
2. Formgebung mit Hilfe eines Thermoformwerkzeuges
3. Abkühlen unter Formzwang auf eine formteilstabile Temperatur
4. Ausformen des abgekühlten Formteils

Die Erwärmung der Halbzeuge kann mittels Strahlungsheizung, Kontaktheizung oder Konvektionsheizung sichergestellt werden. Nach dem Erwärmen wird das Halbzeug mittels Vakuum, Druckluft oder Vakuum-Druckluft ausgeformt. [26]

2.6.1 Thermoplastische Halbzeuge

Thermoplaste sind Kunststoffe, die aus langen Polymeren aufgebaut sind, die entweder verzweigt oder linear (fadenähnlich) auftreten. Wenn die Moleküle in völliger Unordnung vorliegen, handelt es sich um amorphe Thermoplaste. Makromoleküle, die gleichmäßig aufgebaut sind, können eine kristalline Struktur bilden. Polymere kristallisieren aber grundsätzlich nur teilweise (siehe Abbildung 21). [26]

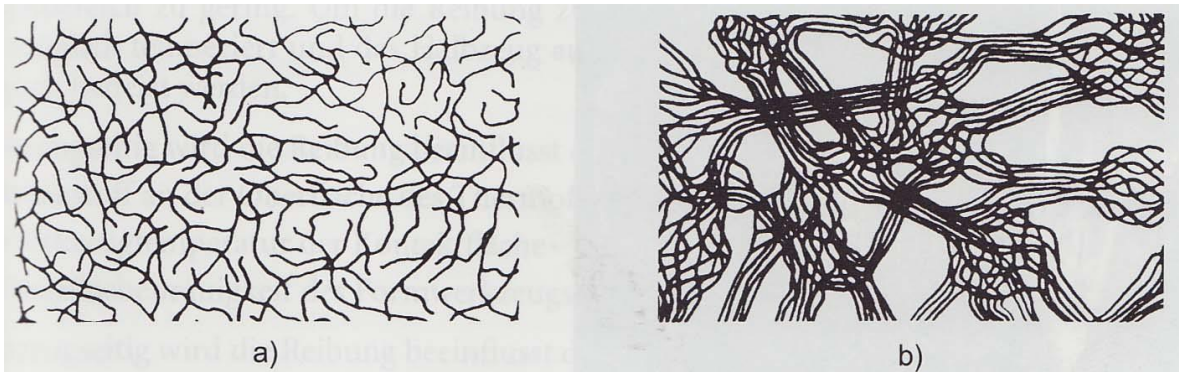


Abbildung 21 Strukturen von Thermoplasten a) Amorph, b) Teilkristallin [26]

Amorphe Thermoplaste wie z.B. PS (Polystyrol), PVC (Polyvinylchlorid), PC (Polycarbonat) und PMMA (Polymethylmethacrylat) sind ohne Einfärbung wegen ihrer Struktur glasklar. Teilkristalline Thermoplaste wie z.B. PA (Polyamid), PE (Polyethylen) und PP (Polypropylen) sind abhängig von ihrem Kristallisationsgrad opak bzw. transluzent. [26]

Grundsätzlich gilt für alle Thermoplaste [26]:

- Der Gebrauchstemperaturbereich ist für alle Thermoplaste begrenzt. Bei niedrigen Temperaturen sind sie spröde wie Glas, bei hohen Temperaturen (Überschreitung der Erweichungstemperatur) verlieren sie ihre Festigkeit.
- Durch Erwärmung auf eine bestimmte Temperatur können Thermoplaste unter Krafteinwirkung geformt werden. Mit steigender Temperatur verringert sich die Umformkraft.
- Thermoplaste zeigen während des Verformens ein viskoelastisches Verhalten. Dies bedeutet, dass mit steigender Streckgeschwindigkeit die Streckkraft zunimmt. Ausnahmen bilden Thermoplaste wie z.B. C-PET (Polyethylenterephthalat), das beim Aufheizen kristallisiert.

Abbildung 22 zeigt eine Tabelle mit wichtigen Daten für die Handhabung, bezogen auf die gebräuchlichsten Halbzeuge. Weitere Materialangaben wie E-Modul, Dichte und Zugfestigkeit sind im Anhang zu finden. Für das Anwendungsgebiet dieser Diplomarbeit würde sich ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) eignen, da dieser Thermoplast am universellsten einsetzbar ist und eine geringe Wärmeausdehnung aufweist (10^{-6}°C^{-1}). [26]

Tabelle 3.2 Tabelle für den Thermoformer (unverbindliche Angaben – Stand: 22.04.2007)

Kurzzeichen				Umformtemperatur				Entlüftung			
	Erweichungs- temperatur	Kristallitschmelz- bereich	Vortrocknen von Platten 1,5–2 h/mm			Materialfaktor für Heizzeit	Materialfaktor für Kühlzeit	Vakuumbildung		Druckluft- formung	
				Druckluft- formung	Vakuumbildung			Boh- rung	Schlitz	Boh- rung	Schlitz
–	°C	°C	°C	°C	°C	–	–	mm	mm	mm	mm
PS-GP	80	–	–	120–150	165–190	1,3	0,97	0,8	0,5	0,6	0,3
PS-HI	80	–	–	120–160	150–200	1	1	0,8	0,5	0,6	0,3
SBS	90	–	–	115–125	140–140	1	1	0,8	0,4	0,6	0,3
OPS	99	–	–	115	115	1	0,7	0,8	0,6	0,6	0,4
ABS	100	–	75	130–160	160–220	1,3	1,3	0,8	0,5	0,6	0,3
ASA	90	–	85	120–160	160–190	1,3	1,3	0,8	0,5	0,6	0,3
SAN	95	–	–	135–170	165–190	1,6	1,12	0,8	0,5	0,6	0,3
PVC-U	90	–	–	120–140	155–200	1,7	2,55	0,8	0,5	0,6	0,3
COC	2)	–	–					0,6	0,3	0,3	0,2
PE-HD	105	125+15	–	140–170	170–200	2,5	2,5	0,6	0,3	0,4	0,2
PP	140	158+10	–	150–165	160–200	2,1	2,1	0,6	0,3	0,3	0,2
PMMA, ext	95	–	70	140–160	160–190	1,5	1,5	0,8	0,6	0,8	0,5
PMMA, geg	100	–	–	140–170	170–200	1,6	1,6	1,0	0,8	0,6	0,3
POM	120	165+10	–	145–170	170–180	3,7	1,85	0,6	0,4	0,4	0,2
PC	150	–	100	150–180	180–220	1,5	0,9	0,6	0,5	0,6	0,3
PAR	170	–	110	180–210	210–235	2,6	2,21	0,8	0,5	0,6	0,3
PPE (PPO)	120	–	–	180–230	200–250	1,8	1,44	0,8	0,5	0,6	0,3
PA 6 GF15Z		222	110	230–240	240–250			0,8	0,5	0,6	0,3
PA 12	150	175+10	80	160–180	170–180	2,5	2	0,8	0,5	0,6	0,3
PET-G	82	–	–	100–120	110–190	1,25	0,88	0,8	0,4	0,6	0,3
A-PET	86	–	65	100–120	110–120	1,25	0,88	0,8	0,4	0,6	0,3
C-PET	86?	225+3	–	130–145	/	/	/	/	/	0,6	0,4
PSU	178	–	120	210–230	220–250	2,9	2,32	0,8	0,5	0,6	0,3
PES	220	–	180	230–270	265–290	–	–	0,8	0,6	0,6	0,3
PPS	260	280+8	–	260–270	260–275	3,5	0,87	0,6	0,3	0,4	0,2
A/MA/B	88	–	–	135–150	160–220	1,3	1,69	0,8	0,4	0,6	0,3
CA	98	–	65	145–170	165–180	1,5	1,5	0,8	0,5	0,6	0,3
CdA	70	–	60	115–130	120–140	–	–	0,8	0,4	0,6	0,3
CAB	120	–	90	140–200	170–200	1,5	1,5	0,8	0,5	0,4	0,2
PVDF	150	170+8	–	170–200	170–240	3	3	0,8	0,5	0,6	0,3
PEI	215	–	150 ¹⁾	230–290	240–330	2,7	0,62	0,8	0,5	0,6	0,3
TPE-E	108	–	–	–	135–143	1,5	1,5	0,6	0,5	/	/
PLA	58	–	–	80–100	90–110			0,8	0,4	0,6	0,3

1) Trocknungszeit 4 h/mm

2) je nach Type, 70 bis 160 °C

Abbildung 22 Thermoplastische Halbzeuge [26]

2.7 Verfahren für gekrümmte Schalungen

Von ebenen bis hin zu komplexen dreidimensionalen Bauteilen lassen sich alle geometrischen Formen schalen. Natürlich steigt mit der Komplexität der Geometrie auch der technische und kostenmäßige Aufwand für die Schalungsherstellung.

Grundsätzlich kann man die Schalungsgeometrien in 4 Hauptgruppen unterteilen:

- Ebene Flächen
- Einfach gekrümmte Flächen
- Doppelt gekrümmte Flächen
- Freiformflächen

2.7.1 Einfach gekrümmte Flächen

Bei diesen relativ simplen Geometrien werden meist Schalungsmaterialien wie Holz, Stahl oder Kunststoff verwendet. Hier kommen sehr oft Rahmenschalungen oder Trägerschalungen zum Einsatz.

Für den Rundbeckenbau werden Stahl- bzw. Holz-Zylinderschalungen angeboten. Dies sind Rahmenschalungen mit einem fix vorgegebenen Radius. Der Gesamtdurchmesser des Rundbeckens kann jedoch bis zu einem bestimmten Grad variiert werden. Wie der Name schon sagt, bestehen diese Schalungen aus einem Rahmen mit Querverstrebungen und einer Schalhaut.

Das verwendete Material für den Rahmen ist meist Stahl oder Aluminium. Die Schalhaut besteht meist aus Holz oder Kunststoff. Dieses Schalungssystem kann auch in der Kletter- oder Gleitbauweise eingesetzt werden (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23 Rahmenschalung Firma RSB [5]

Mit Trägerschalungen wie z.B. Rundschalungssystemen ist es möglich, die Radien der Schalungshaut stufenlos zu verändern (siehe Abbildung 24). Diese Schalungen werden meist beim Schalungshersteller oder auf der Baustelle vorgefertigt und mit Hebezeugen an die gewünschte Position gestellt. Im Gegensatz zu den Rahmenschalungen wird der Rahmen hier durch Träger und Verbindungsmittel ersetzt. Die Schalungshaut besteht hier aus Holzfaserplatten oder Kunststoffplatten.

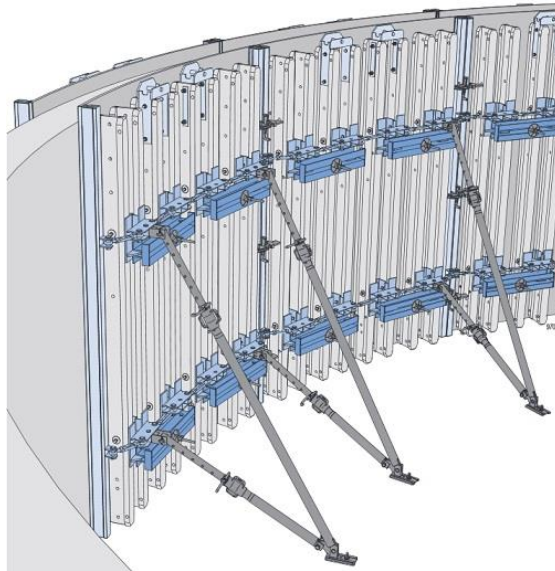


Abbildung 24 Trägerschalung [6]

2.7.2 Zweifach gekrümmte Flächen

An der Technischen **Universität Delft** zum Beispiel wurde ein Konzept für eine flexible Schalung entwickelt. Bei diesem Verfahren wird im ersten Schritt ein verformbares Schalungsmaterial auf einem Stützsystem gelagert, welches anschließend mit selbstverdichtendem Beton (SVB) befüllt wird. Als Bewehrung kommen Fasern oder Textilgewebe zum Einsatz. Nach einer Zeitdauer von ca. 30 bis 60 Minuten erhöht sich die Fließgrenze des Betons bzw. beginnt das Erstarren. In diesem Zustand wird in einem Folgeschritt die Schalung langsam in die gewünschte Form gebogen. Während dieses Prozesses muss der noch nicht ausgehärtete Beton der Dehnung plastisch folgen. Der in Form gebrachte Beton kann nun aushärten und wird im Anschluss ausgeschalt (siehe Abbildung 24). [7]

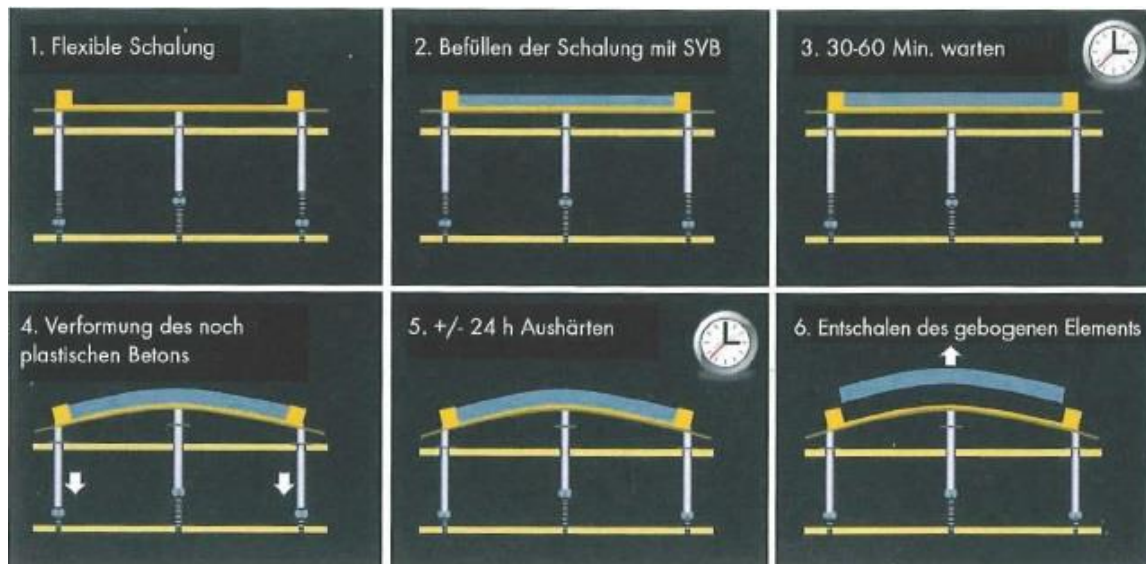


Abbildung 25 Arbeitsablauf flexible Schalung [7]

Dieses Verfahren erlaubt das Betonieren zweifach gebogener Elemente. Die Krümmungsradien liegen im Bereich von 1,5 bis 2,5 Metern.

Kritisch bei diesem Verfahren ist die Findung des idealen Verformungszeitpunktes, da bei zu früher Verformung der Beton aus der Schalung fließt. Es ist keine stärkere Rissbildung als bei plastischem Schwinden vorzufinden. Das Auflegen von Folien beim Aushärteprozess reduziert die Rissbreite noch weiter. [7]

Bei einem Verfahren, das an der **TU Wien** entwickelt wurde, wird ähnlich wie bei dem Verfahren der Universität Delft mit der plastischen Verformung des Betons gearbeitet. Dabei wird in diesem Verfahren der Beton im ausgehärteten Zustand geformt. Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung von mehrfach gekrümmten Betonschalen (siehe Abbildung 26). Der erste Schritt ist das Betonieren einer ebenen Platte auf einen Pneu. Nach dem Aushärten der Betonplatte wird der Pneu unter Druck gesetzt und die Schale beginnt sich zu heben. Die keilförmigen Aussparungen sollten nach fertigem Aufbauprozess ziemlich geschlossen sein. Die Herausforderung in diesem Verfahren liegt bei der starken Krümmung der ausgehärteten Schalenelemente. Hier muss in Vorversuchen das Verhalten von verschiedenen Beton-Bewehrungsverhältnissen ermittelt werden. Des Weiteren werden Sollbruchstellen im Frischbeton eingedrückt um eine gleichmäßige Verkrümmung der Betonschalen zu erreichen. [8]

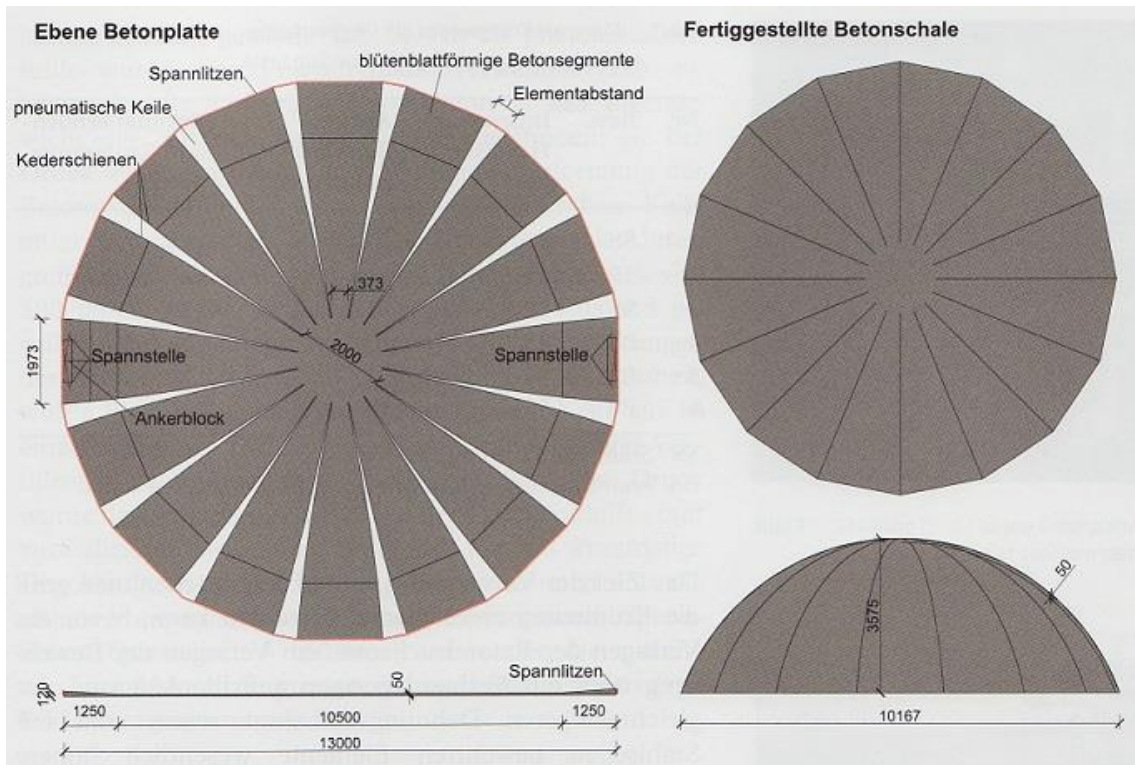


Abbildung 26 Übersichtsplan Betonschale [8]

Probleme dieser Methode bestehen nach Ansicht des Verfassers in:

- beschränkt auf einfache Schalengeometrien
- der nicht genauen Wiedergabe der gewünschten Geometrie, da sich die Krümmungen der einzelnen Schalen nicht immer gleich ausbilden.
- den Nacharbeiten, wie dem Verfüllen der Fugen und dem Glätten der gesamten Oberfläche, welche nach Beendigung des Aufstellprozesses notwendig sind.

2.7.3 Freiformflächen

Bei Freiformflächen steigen der Schalungsaufwand und somit auch die Kosten enorm. Dabei unterscheidet man zwei Umsetzungsmöglichkeiten:

Eine Möglichkeit ist die Erzeugung komplexer Geometrien durch einzelne Elemente. Wobei die einzelnen Elemente eben, einfach oder zweifach gekrümmt verbaut werden. Ein Beispiel für die Anwendung dieses Prinzips ist das Mercedes-Benz-Museum in Stuttgart. Wie Abbildung 27 zeigt, ist hier ein hoher Personaleinsatz für den Schalungsbau von Nöten.



Abbildung 27 Mercedes-Benz Museum [9]

Die zweite Variante ist die Herstellung von dreidimensionalen Schaumstoffschalungen. Mit Hilfe eines 3-D Fräsers wird der Schaumstoff (meist Polystyrol) in die gewünschte Form gebracht. Die Vorteile liegen hier in der exakten Wiedergabe der komplexen Geometrie und in dem geringeren Personalaufwand auf der Baustelle. Als Nachteil gelten die sehr hohen Materialkosten, da der gefräste Schaumstoffkern nur für diese eine Form einsetzbar ist (siehe Abbildung 28).



Abbildung 28 Doka-Shape [10]

An der **ETH Zürich** wurden Freiformbetonschalen mit Wachs als Schalungsmaterial und Formsand als Formmaterial erzeugt. In Abbildung 29 ist der Fertigungsprozess von einer Betonschale ersichtlich. Erster Schritt ist hier das Erzeugen einer gewünschten Freiformfläche mit Formsand. Ein Roboterarm mit einem speziellen Halbkugelaufsatz ist in der Lage den Formsand so zu verdichten, dass die gewünschte Freiformfläche entsteht. Durch das Abgießen dieser Sandform kann die erste Schalung für die Betonschale erzeugt

werden. Der Formsand kann nach dem Ausschalen der Wachsschale für die Erzeugung neuer Sandformen wiederverwendet werden. Nach der Fertigung von zwei Wachsschalungen (Negativ und Positiv) kann mit diesen eine Betonschale erzeugt werden. Die Wachsschalungen können erneut eingeschmolzen und in einer neugeformten Sandform abgegossen werden. Da hier besondere Anforderungen an das Wachs gestellt sind, wurden bei verschiedenen Wachsen bestimmte Eigenschaften wie das Schwind- und Festigkeitsverhalten untersucht. Besondere Vorteile bei diesem Konzept liegen hier bei der Wiederverwendbarkeit des Schalungsmaterials Wachs und des Formsandes. [11]

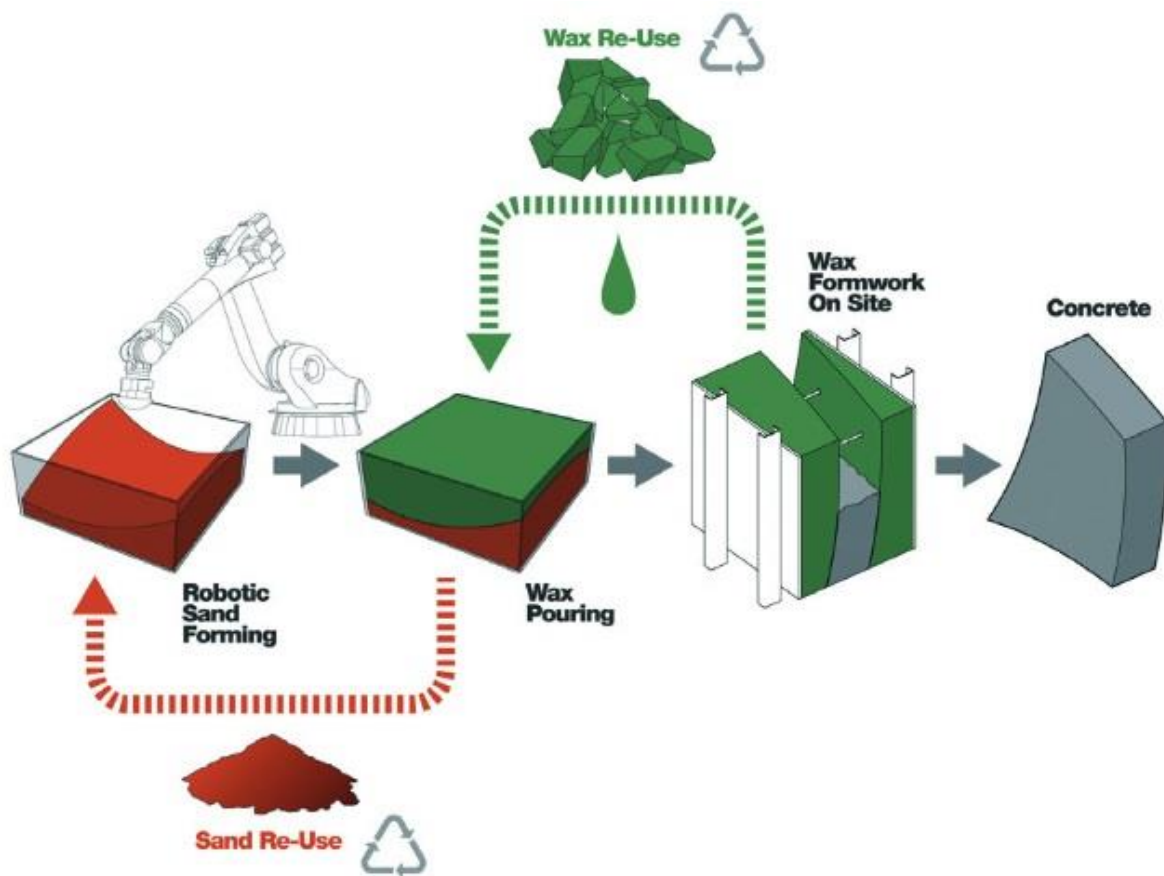


Abbildung 29 ETH Zürich Wachsschalung [11]

2.8 Bewertungskriterien Betonoberfläche

Grundsätzlich wird die Qualität einer Betonoberfläche nach folgenden Merkmalen beurteilt: [3]

- **Struktur**
- **Farbe**
- **Porigkeit**

Im Wesentlichen wird **die Struktur** von den verwendeten Schalungshautarten geprägt. Durch die Schalungshautart können nicht nur glatte, ebene Oberflächen erzeugt werden, sondern auch strukturierte. Als Schalhaut können Bretter aus Holz oder ganze Platten aus verschiedenen Werkstoffen wie Holz, Metall, Kunststoffen oder andere Stoffe verwendet werden. Die verschiedenen Schalungshautarten haben spezifische Einflüsse auf die verbleibende Betonstruktur. Jedoch kann auch das verwendete Trennmittel zwischen Beton und Schalungshaut die Betonstruktur beeinflussen. [3]

Die Farbe wird von Gesteinskörnungen, Zusatzmitteln, Zement, Zusatzstoffen und Schalhaut beeinflusst. Nicht nur die Farbgebung, sondern auch die Farbgleichheit ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität der Sichtbetonoberfläche. Die Schalungshaut beeinflusst die Farbgleichheit durch ihr Saugvermögen. Starkes Saugvermögen führt in der Regel zu dunkleren Flächen und geringes Saugvermögen zu helleren Flächen. [3]

Die Porigkeit ist kein gezieltes Gestaltungsmerkmal, jedoch treten Poren an allen Betonoberflächen auf und bieten Ablagerungspotenzial für Schmutz und Schadstoffe. Beeinflusst werden kann die Porigkeit durch die Betonart, die Schalungshaut wie auch durch die Einbringung und Verdichtungsart des Betons. [3]

3 Experimenteller Teil

Die Vorgehensweise bei den folgenden Versuchen kann wie folgt beschrieben werden:

1. Das Material bzw. der Formstoff wurde zuerst, wenn nötig, mit Vorversuchen wie z.B. Abgießen von Probekörpern untersucht.
2. Falls die Vorversuche die vorgeschriebenen Kriterien erfüllten, wurden weitere Versuche auf einem Pixeltisch durchgeführt.
3. Bei Versuchen mit dem Pixeltisch wurde gleichzeitig nach Möglichkeiten gesucht, um die Pixelauflösen am Tisch zu glätten. Da nicht jedes Glättungsverfahren mit allen Materialien anwendbar ist, wurde für jedes Material eine eigene Pixelglättung erarbeitet.
4. Weiteres wurden auch 3D-Vermessungen vorgenommen, um die Formtreue der Abgüsse zu untersuchen.
5. Wenn auch diese Versuche am Pixeltisch die Kriterien erfüllten, wurden zwei Schalungselemente mit dem gewählten Material gefertigt und eine UHPC-Schale abgegossen.

Materialien	Vorversuche	Pixeltischversuche	UHPC-Schale	Pixelglättung
PmB Bitumen	x			
Gussasphalt		x		Kunstharzfolie, O.B.B Sand
Wachs	x	x		Elastomermatte
Wachs als Bindemittel	x	x	x	Elastomermatte

Tabelle 1 Übersicht Versuche

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der mit den unterschiedlichen Formmaterialien durchgeführten Versuche, der Versuche am Pixeltisch und die Art der Glättung der Pixelstruktur. Ein Betonierversuch wurde nur mit dem Material Wachs als Bindemittel durchgeführt. Kapitel 3.1 zeigt den Aufbau, die verwendeten Materialien und die Abmessungen des verwendeten Pixeltischmodells mit fix eingestellter Schalengeometrie. Des Weiteren werden der Versuchsaufbau und die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung am Pixeltisch dokumentiert.

3.1 Pixeltischmodell

Da sich zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung der in Kapitel 3.1 beschriebene Pixeltisch noch in der Fertigung befand, musste eine vereinfachte Form des Pixeltisches verwendet werden, um aussagekräftige Versuche mit den verschiedenen Materialien durchführen zu können. Die Pixelabmessungen wurden mit 30*30mm gleich gewählt wie jene vom einführend erwähnten Pixeltisch.

Abbildung 30 zeigt einen schematischen Aufbau der Pixelstruktur. In den Hauptabmessungen wurde dieser auf 300*300mm verkleinert. Für die einfache und schnelle Fertigung des Tisches wurden Eichenholzstäbe mit quadratischem Querschnitt als Material für die Pixel verwendet. Als Geometrievorlage für den Pixeltisch stand eine gefräste Holzschalung aus MDF zur Verfügung, mit welcher bereits Schalenelemente aus UHPC gegossen wurden. Die Eichenholzpixelstäbe wurden auf die Freiformfläche aufgestellt, verleimt und mit Schraubzwingen fixiert. Es wurde normaler Holzleim mit einer Aushärtezeit von 15 Minuten verwendet. Alle 100 (10*10) Pixelstäbe wurden mit der gleichen Länge eingebaut. Nach Aushärtung des Leims wurde der Holzblock mit einer Bandsäge in zwei Teile geschnitten. Mit dieser gewählten Vorgehensweise konnten in einem Arbeitsgang das Negativ und das Positiv der Form hergestellt werden.

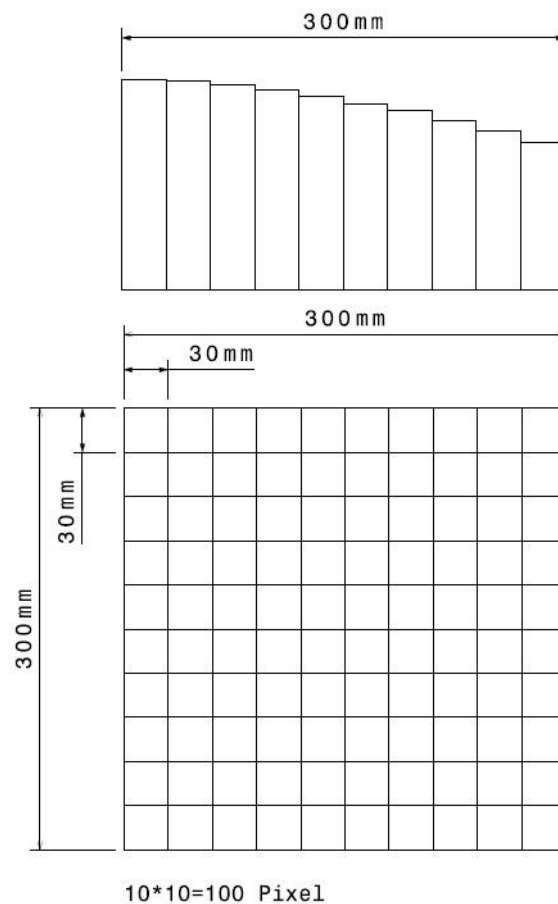


Abbildung 30 Abmessungen Pixeltisch



Abbildung 31 MDF-Schalung



Abbildung 32 Holzpixel



Abbildung 33 Rahmenschalung



Abbildung 34 Negativ und Positivform

Nach dem Verleimen wurde die Oberfläche der Stäbe mit einem Klarlack versiegelt, um eventuelles Saugverhalten des Eichenholzes zu vermeiden. Des Weiteren wurde eine Randabschalung für beide Pixeltische (Negativ und Positiv) aus Schichtholzplatten gefertigt. Beide Pixeltische wurden mit einem 3D-Laserscanner vermessen, um geometrische Vergleiche mit den Scanergebnissen an den Wachsformen durchführen zu können. In Abbildung 33 ist die Randabschalung mit eingelegtem Silikonpapier als Trennschicht ersichtlich.

Mit diesem Pixeltischmodell wurden auch Versuche hinsichtlich der Pixelglättung durchgeführt.

3.2 Vorversuche Polymermodifizierte Mörtel

Da im Bereich der Formtechnologie mit Bitumen keine Erfahrungswerte vorliegen, wurden im ersten Schritt Probekörper hergestellt, um das Material und seine Eigenschaften besser kennen zu lernen. Die Firma Colas GmbH, die auf die Herstellung von Bitumenemulsionen spezialisiert ist, war hier Projektpartner. Die ersten Probekörper mit den Abmessungen Durchmesser/Tiefe=13/2cm wurden mit einem polymermodifizierten Bitumen hergestellt (siehe Abbildung 35). In Tabelle 2 sind die vier Probekörper mit den unterschiedlichen Mischverhältnissen dargestellt.

Probekörper	Verhältnis Bitumen:Gestein	Sieblinie	Bitumenart	Gestein
01	1:1	Füller	PmB	Basalt
02	1:1	0/2	PmB	Basalt
03	2:1	0/2	PmB	Basalt
04	1:1	2/4	PmB	Basalt

Tabelle 2 Polymermodifiziertes Bitumen



Abbildung 35 Polymermodifizierte Probekörper

Es zeigt sich, dass mit steigendem Bitumenanteil die Elastizität steigt. Somit ist Probekörper 03 mit einem Verhältnis 2:1 der Elastischste bzw. Weichste. Bei Probekörper 04 war eine homogene Mischung nicht mehr möglich, da sich die größeren Gesteinsanteile am Boden absetzten. Alle Probekörper konnten bei Raumtemperatur mit geringem Kraftaufwand verformt werden und zeigten ein starkes Rückstellverhalten, dies ist auf die Polymermodifikation zurückzuführen. Die gewünschten Kriterien wurden mit keinem Probekörper erreicht, da sie ein zu geringes Widerstandsverhalten bei Raumtemperatur aufwiesen.

Um ein besseres Widerstandsverhalten zu erreichen, wurden Versuche mit härterem Straßenbaubitumen vorgeschlagen, welche im nachfolgenden Kapitel dokumentiert sind.

3.3 Versuchsdurchführung Gussasphalt

Ein Ziel dieser Arbeit war, die pixelige Oberfläche so gut wie möglich zu glätten. Bei der Versuchsdurchführung mit Gussasphalt benötigte man zusätzlich eine Trennschicht zwischen dem Asphalt und dem Beton, da hier ein starkes Abfärben des Bitumens zu erwarten war. Zum Einsatz kam hier eine Kunstharzfolie, die sich beim Gießvorgang mit dem heißen Gussasphalt verbinden sollte. Um die Steifigkeit der Folie zu erhöhen, wurde diese bei der Herstellung auf eine 1mm dicke PP(Polypropylen)-Folie gegossen. Die Kunstharzfolie verband sich dabei chemisch mit der PP-Folie zu einer Art Verbundwerkstoff.



Abbildung 36 Kunstharz Trennfolie



Abbildung 37 Ebene Gussasphaltform

Die Folie wurde auf einen der Pixeltische zugeschnitten und eingelegt (siehe Abbildung 36). Da Polypropylen eine Schmelztemperatur von ungefähr 165°C aufweist, bestand die Gefahr, dass der Gussasphalt beim Vergießen zu heiß ist und dadurch die PP-Folie zu schmelzen beginnt. Die Kunstharzfolie sollte hier auch als Isolator wirken, um das Schmelzen der PP-Folie zu vermeiden. Die PP-Folie hatte eine Dicke von 1mm und die Kunstharzfolie 2mm. Zum Schutz der Randabschalung und für leichteres Ausschalen wurde noch Silikonpapier als Trennlage eingelegt, wie in Abbildung 38 ersichtlich.

3.3.1 Gießen

Der erste Versuch wurde mit einem Gussasphalt mit der Bezeichnung MA 4 IP70-GE60,G3,KE30 durchgeführt. Dieser Gussasphalt wird für Fußbodenbeläge im Innenbereich verwendet. Standardmäßig wurden diesem Gussasphalt Paraffine zugesetzt, um die Bearbeitungstemperatur herabzusetzen. Vergossen wurde mit einer Gussasphalttemperatur von 260°C. Dies ist eine typische Verarbeitungstemperatur für Gussasphalt, jedoch müsste der Asphalt für das geplante Anwendungsgebiet nicht so fließfähig sein (siehe Abbildung 38).



Abbildung 38 Abgießen mit Gussasphalt

Beim Vergießen wurde die Temperatur des Gussasphalts in regelmäßigen Abschnitten gemessen und manuell mit dem Finger die Verformbarkeit des Materials geprüft.

Zeit [min]	Temperatur Gussasphalt [°C]	Verformbarkeit
15	162	Stark fließfähig
25	145	Gut verformbar
35	135	Leichtes Eindringen möglich
45	120	Eindringen möglich
55	109	Eindringen schwer möglich

Tabelle 3 Gussasphalt Temperaturverlauf

3.3.2 Ergebnisse

Dank des Silikonpapiers funktionierte das Ausschalen sehr schnell und einfach. Auch war ein Ankleben der PP-Folie auf dem Pixeltisch nicht zu beobachten. Die Kunstharzfolie verklebte sehr gut mit dem Gussasphalt und auch die Verbindung der PP-Folie mit der Kunstharzfolie war noch vorhanden. Die Pixelstruktur wurde jedoch nur teilweise geglättet (siehe Abbildung 39). Hierfür war eindeutig die hohe Gussasphalttemperatur verantwortlich, da die Folie sehr stark erweichte und sich so an die Pixel teilweise anpasste. In manchen Bereichen wurde auch die Schmelztemperatur der PP-Folie erreicht, wodurch sich vereinzelt Blasen bildeten. Durch die vorgegebene Geometrie des Pixeltisches entstanden verschieden hohe Auflasten auf die einzelnen Pixel. Dies führte zu unterschiedlich starken Ausprägungen der Pixelstruktur im ausgeformten Gussasphalt. Somit waren bei hoher Überdeckung die Pixel deutlicher zu erkennen als bei geringerer Überdeckung.

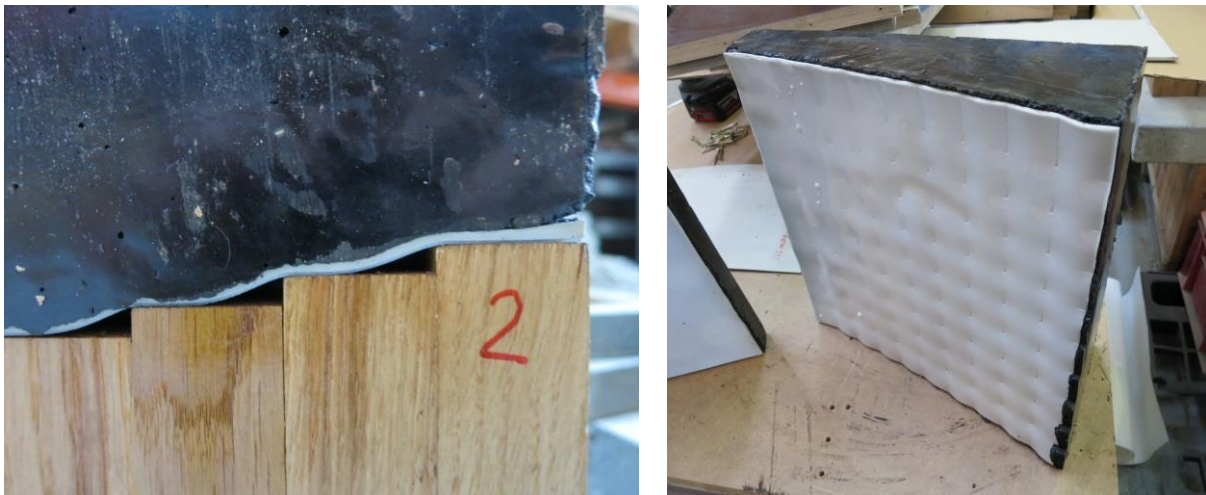


Abbildung 39 Gussasphalt Pixelglättung

Zusätzlich wurde eine dritte, ebene Form mit den Abmessungen $L/B/T=30/30/3\text{cm}$, wie in Abbildung 37 ersichtlich, erzeugt. Auch hier wurde die gleiche Folie wie in den ersten Versuchen zugeschnitten und eingelegt.

Hier war die Grundüberlegung, die Folie mit dem Gussasphalt zuerst in eine ebene Platte abzugießen, diese auf eine definierte Temperatur abkühlen zu lassen und nachfolgend die Platte an die eingestellte Pixeltischgeometrie anzupassen. Diese Vorgehensweise sollte das Erweichen der Folie vermeiden und somit die Pixelstruktur besser oder ganz zu glätten. Mit dieser Plattenkonstruktion sollte es möglich sein, den Gussasphalt immer wieder zu erwärmen und an neue Geometrien anpassen zu können.

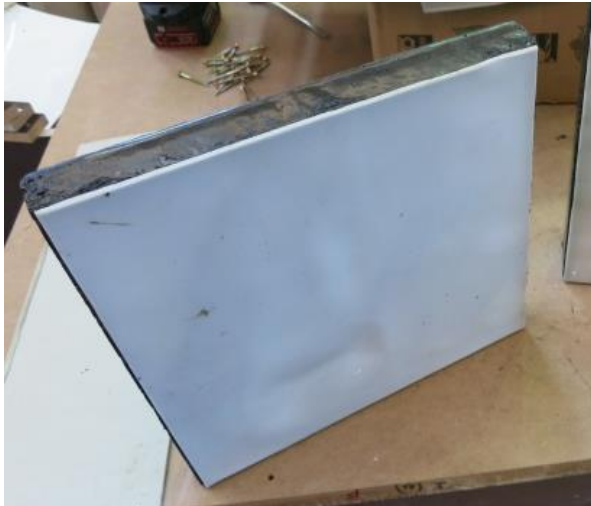


Abbildung 40 Ebene Gussasphaltplatte

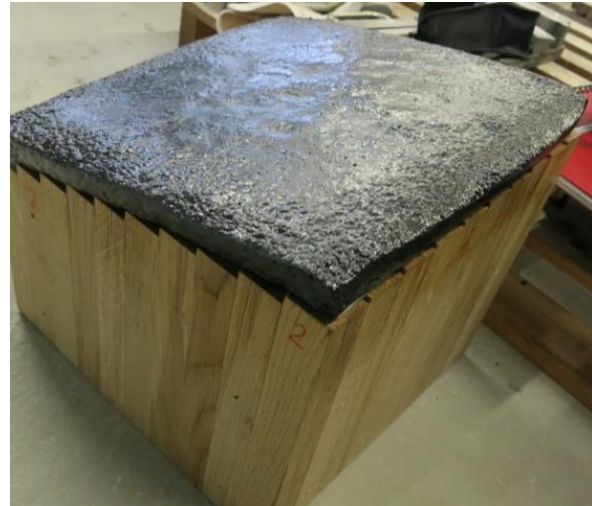


Abbildung 41 Anpassung an Pixeltischgeometrie

Vergossen wurde der Gussasphalt auch mit einer Temperatur von 264°C . Wie im Versuch unter Kapitel 3.3.1 kam die Gussasphaltsorte MA 4 IP70-GE60,G3,KE30 zum Einsatz. Jedoch war nach dem Abkühlen auch bei diesem Versuch zu beobachten, dass die Gussasphalttemperatur zu hoch war. Die Folie war nicht mehr eben, sondern wies Beulen und wie auch bei den ersten zwei Formen Anzeichen von Schmelzpunktüberschreitungen der PP-Folie auf (siehe Abbildung 40). Trotzdem wurde mit diesem Probestück das Anpassen an die Pixeltischgeometrie versucht, um weitere Erkenntnisse über das Verformungsverhalten der Gussasphaltprobe zu erlangen.

Die Gussasphaltprobe wurde in einem Trockenschrank langsam erwärmt und in regelmäßigen Abständen auf seine Verformbarkeit geprüft. Im Bereich von 70°C bis 75°C war es möglich, die Gussasphaltprobe mit geringem Kraftaufwand an die Geometrie anzupassen (siehe Abbildung 41).

Nach dem Abkühlen der Gussasphaltprobe auf Raumtemperatur wurde diese vom Pixeltisch genommen. Die Probe wies ein sehr steifes, verformungsbeständiges Verhalten auf. Nur durch das Eigengewicht der Gussasphaltprobe konnte keine Rückverformung erkannt werden. Mit starker Krafteinwirkung konnte die Probe wieder in ihren Ausgangszustand zurückgeformt werden, ohne dabei zu brechen.

Versuche zum Kriechverhalten bzw. weitere Verformungswiderstandsüberprüfungen wurden mit diesem Material nicht durchgeführt.

3.4 Versuchsdurchführung Wachs

3.4.1 Vorversuch

Um das Schwindverhalten der Wachse zu vermindern, werden bestimmte Zusatzstoffe (Füller) den Wachsen beigemischt. Das hier verwendete Wachs wurde von der Firma Romonta zur Verfügung gestellt. Die genaue Bezeichnung des Waxes ist Romocast 305. Romocast ist ein Feingusswachs und weist ein sehr geringes Schwindverhalten auf. Dies wird durch Zugabe von 35% Polystyrolpulver erreicht.

Da kein Rohdichtewert von Romocast 305 verfügbar war, wurde dieser mittels Tauchwiegung bestimmt. Hierfür wurde eine Probe mit den Abmessungen 160*40*40 mit Romocast 305 abgegossen. Bei der Wiegung ergab sich ein berechneter Wert von **1014,06 kg/m³** bei 22°C Raumtemperatur.

3.4.2 Pixelglättung

3.4.2.1 O.B.B-Sand

Wie schon in der Einleitung erwähnt, wird bei dieser Arbeit nach Möglichkeiten gesucht um die Pixelauflösung am eingestellten Tisch zu glätten. Eine Möglichkeit bestand darin, den Pixeltisch mit einer geeigneten Masse zu verspachteln. Diese Füllmasse sollte nach dem Formprozess leicht entfernt werden können, um den Verschleiß des Pixeltisches so gering wie möglich zu halten.

Die ersten Versuche wurden mit einem O.B.B Sand durchgeführt (siehe Abbildung 42).



Abbildung 42 Verspachtelung mit O.B.B-Sand

Der O.B.B Sand wurde mit der Hand aufgetragen und in mehreren Durchgängen mit einer dünnen, flexiblen Blechspachtel verspachtelt. Der Anpressdruck der Spachtel bestimmte den

Verdichtungsgrad des Sandes. Somit musste darauf geachtet werden, dass am gesamten Pixelfeld der Sand gleichmäßig verdichtet wurde. Die Spachtelbewegung sollte in diesem Fall von unten nach oben durchgeführt werden, sodass ein gutes Verfüllen der Pixelstufen erreicht wird. Das Abbrechen des Sandes an den spitzen Kanten konnte nicht vermieden werden, was sich jedoch auf die gesamte Fläche minimal auswirkte.

Problematisch erschienen an dieser Variante die sandige Oberfläche der Verspachtelung und auch die unterschiedlichen Verdichtungsgrade. Hier müsste auf jeden Fall ein Trennmittel zwischen dem O.B.B-Sand und dem Wachs aufgetragen werden. Die unterschiedlichen Verdichtungsgrade des Formsandes könnten zu ungewollten Verformungen der Verspachtelung durch Einwirkung des Wachseigengewichtes führen.

3.4.2.2 Elastomerplatte

Eine zweite Möglichkeit der Pixelglättung wurde untersucht. Dabei wurde die Pixeloberfläche mit einer Trennschicht geglättet. Beim Auflegen von ebenen Matten auf Freiformflächen sind Zwängungen (Membranspannungen) nicht zu vermeiden, daher ist bei dem vorgeschlagenen Verfahren ein Material mit bestimmten Eigenschaften notwendig. Es wurde eine Elastomerplatte mit einer geringen Shore-Härte gewählt. Dieses Material kann die Zwängungen aufnehmen.

Die Shore-Härte (nach Albert Shore), ist ein Werkstoffkennwert für Elastomere und Kunststoffe, der direkt im Zusammenhang mit der Eindringtiefe steht [DIN ISO 7619-1]. Gemessen wird mit einem federbelasteten Stift auf einer Skala von 0-100, wobei 0 Shore (2,5mm Eindringtiefe) und der Wert 100 Shore (0mm Eindringtiefe) große Härte bedeutet. Dabei unterscheidet man zwischen Shore-A, welche bei weichen Elastomeren angegeben wird und Shore C, welche bei zähen Elastomeren angegeben wird. [27]

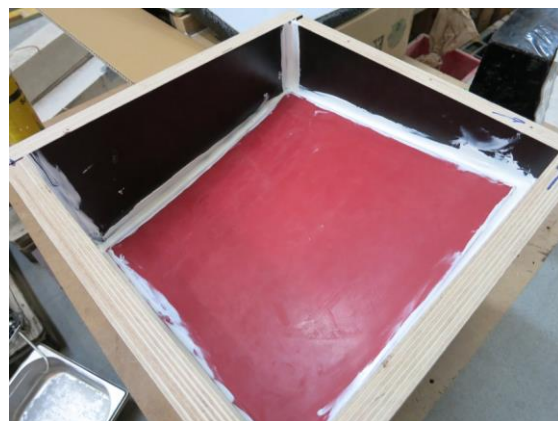


Abbildung 43 Elastomerplatte 10mm

Bei einer zu weichen Matte würden sich die einzelnen Pixel abzeichnen, eine zu harte Matte würde ein sattes Aufliegen der Matte nicht erlauben. Das Optimum lag bei einer 10mm starken Elastomerplatte der Firma Semperit Para A654 mit einer Shore-Härte von 40. Bei

der Versuchsdurchführung wurde eine Matte mit den Maßen 28cm*28cm zugeschnitten und auf den Pixeltisch aufgelegt. Alle Ränder wurden mit Silikon verfugt, um ein Verrutschen der Matte zu vermeiden (siehe Abbildung 43). Eine der negativen Eigenschaften von Wachsen ist ihr starkes Schwindverhalten. Zur Untersuchung des Schwindverhaltens wurde der Pixeltisch mit eingelegter Elastomermatte vor dem Gießvorgang mit einem 3D- Laser-Scanner siehe Abbildung 44 vermessen. Aufbauend auf diesen Referenzdaten wurden nach dem Gießvorgang, durch eine erneute Vermessung der erzeugten Wachsform die Geometrieabweichungen von der Originalform bestimmt.



Abbildung 44 3D Laservermessung

3.4.3 Einschmelzen und Abgießen des Wachses

Der Tropfpunkt von Romocast 305 liegt zwischen 68°C und 72°C. In diesem Temperaturbereich bildet sich aus dem Granulat eine zähflüssige Masse. Bei weiterem Erhöhen der Temperatur nimmt die Viskosität stark ab. Bei etwa 80°C ist die Viskosität so gering, dass sich der beigemengte Füller abzusetzen beginnt. Um diesem Materialverhalten entgegenzuwirken, sollte das Wachs durch Rühren homogenisiert werden. Ein Erhitzen des Wachses über 100°C ist zu vermeiden, da bei dieser Temperatur Crackingprozesse⁵ einsetzen, die das Wachs zerstören.

⁵ Brechen von langen Kohlenwasserstoffketten in Kürzere (Verfahren der Erdölverarbeitung)

Es wurden 8kg Romcast 305 in zwei Blechschalen bei einer eingestellten Ofentemperatur von 75°C aufgeschmolzen (siehe Abbildung 45).



Abbildung 45 Wachs im Ofen aufschmelzen



Abbildung 46 Ausgießen der Form

Um ein Verkleben der Form mit dem Wachs zu vermeiden, wurde die gesamte Form mit einem Silikonspray der Firma Pluradent besprüht.

Nach vollständigem Aufschmelzen des Wachses wurde die Form mit der eingelegten Elastomermatte ausgegossen, siehe Abbildung 46. Die Form musste relativ schnell ausgegossen werden, da das Wachs sehr schnell abkühlt und erstarrt. Der Gießversuch wurde bei 22°C Raumtemperatur durchgeführt.

3.4.4 Ergebnisse

Die ausgegossene Wachsform wurde nach 10 Stunden ausgeformt. Die genaue Zeitspanne für die Aushärtung des Wachses wurde bei diesem Versuchsaufbau nicht untersucht. In Abbildung 47 ist bereits vor dem Ausformen ein eindeutiges Schwinden an den Rändern der Form zu erkennen ist. Durch die mit Silikonspray beschichtete Oberfläche löste sich das Wachs an allen vier Seiten der Form. Die Vermessung ergab ein maximales Spaltmaß von 3 mm. In Bezug auf die Formlänge von 304mm wurde ein horizontales Schwinden von maximal 5mm gemessen. Dies bedeutet ein horizontales Schwindmaß von **1,65%**. Für Wachs ist ein Schwinden um 1,65% ein sehr gutes Ergebnis, da die meisten Wachse 5-8% Schwindmaß aufweisen.

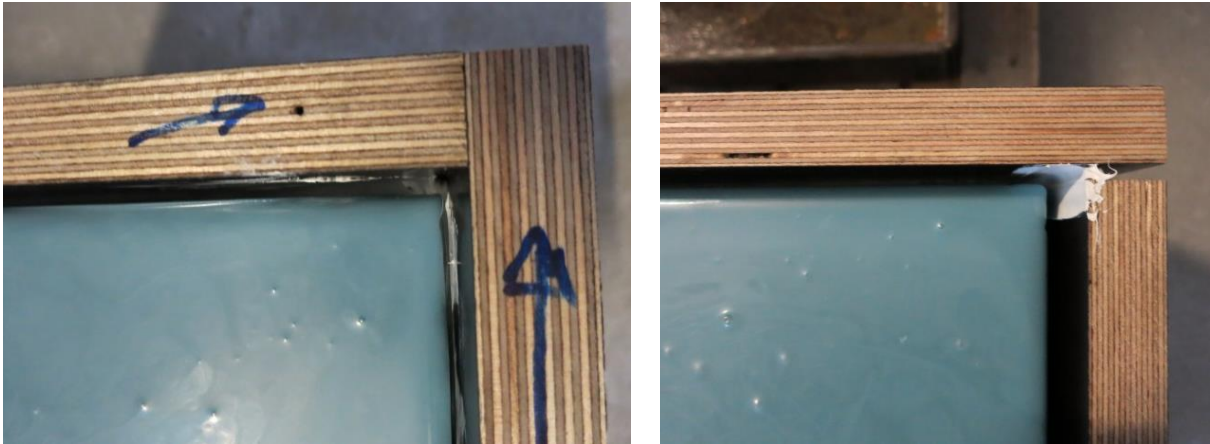


Abbildung 47 Schwinden des Wachses

Der Wachskörper ließ sich sehr leicht ausformen, was dem Silikonspray zuzuschreiben war. Es war kein Verkleben mit der Holzschalung wie auch mit der Elastomermatte festzustellen. Die Oberfläche des Wachskörpers wies eine sehr hohe Oberflächenqualität auf. Die Pixel wurden mit der 10mm starken Elastomermatte vollständig geglättet. Weiters waren keine Lufteinschlüsse oder andere Mängel der Oberflächenbeschaffenheit zu erkennen. Der einzige festgestellte geringfügige Mangel bestand in leichten Schlieren am Randbereich (A), was mit ziemlicher Sicherheit auf die Eingusstechnik zurückzuführen ist (siehe Abbildung 48). Durch die gewählte Eingussposition in der Mitte der Pixeltischform (siehe Abbildung 46), benötigt das Wachs eine gewisse Zeit bis zu vollkommenen Benetzung der Randbereiche der Elastomermatte. In dieser Zeit beginnt das Wachs zu erstarren und es treten diese genannten Schlieren im Randbereich (A) auf.

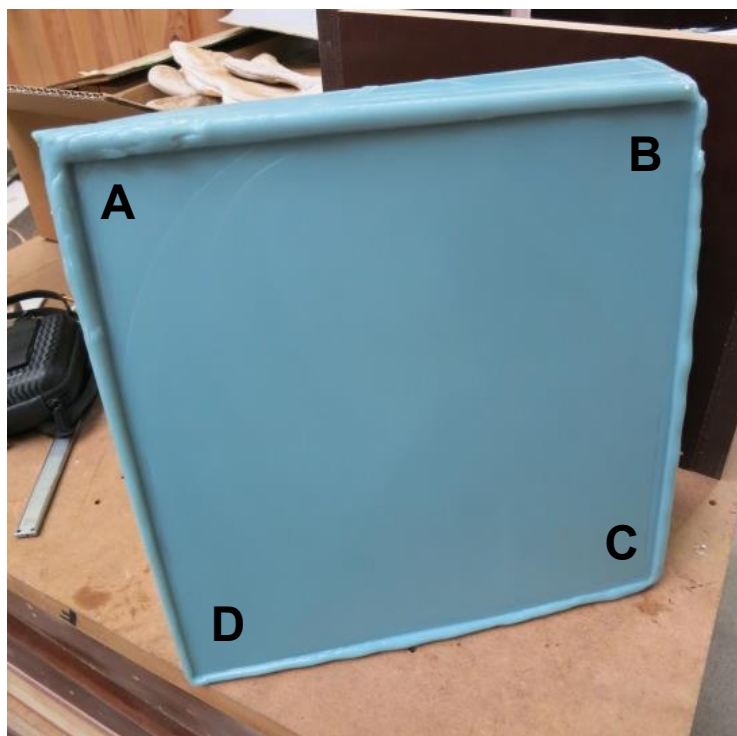


Abbildung 48 Wachsmodell

3.4.5 Formgenauigkeit

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Vermessungen der Oberfläche mit dem 3D-Scanner zusammengefasst. Abbildung 49 stellt die Abweichungen (Normalabstand) der ausgeformten Wachsprobe zur Pixeltischform mit eingelegter Membran dar. Da sich die Wachsprobe nach vollständiger Abkühlung von allen Seiten der Form gelöst hat, konnte kein Referenzpunkt bzw. keine Referenzebene definiert werden. Aus diesem Grund musste mit einer Best-Fit Variante gearbeitet werden. Die Ecken der Form sind mit den Buchstaben A bis D markiert, damit die Messergebnisse mit der abgegossenen Form in Korrelation gebracht werden können.

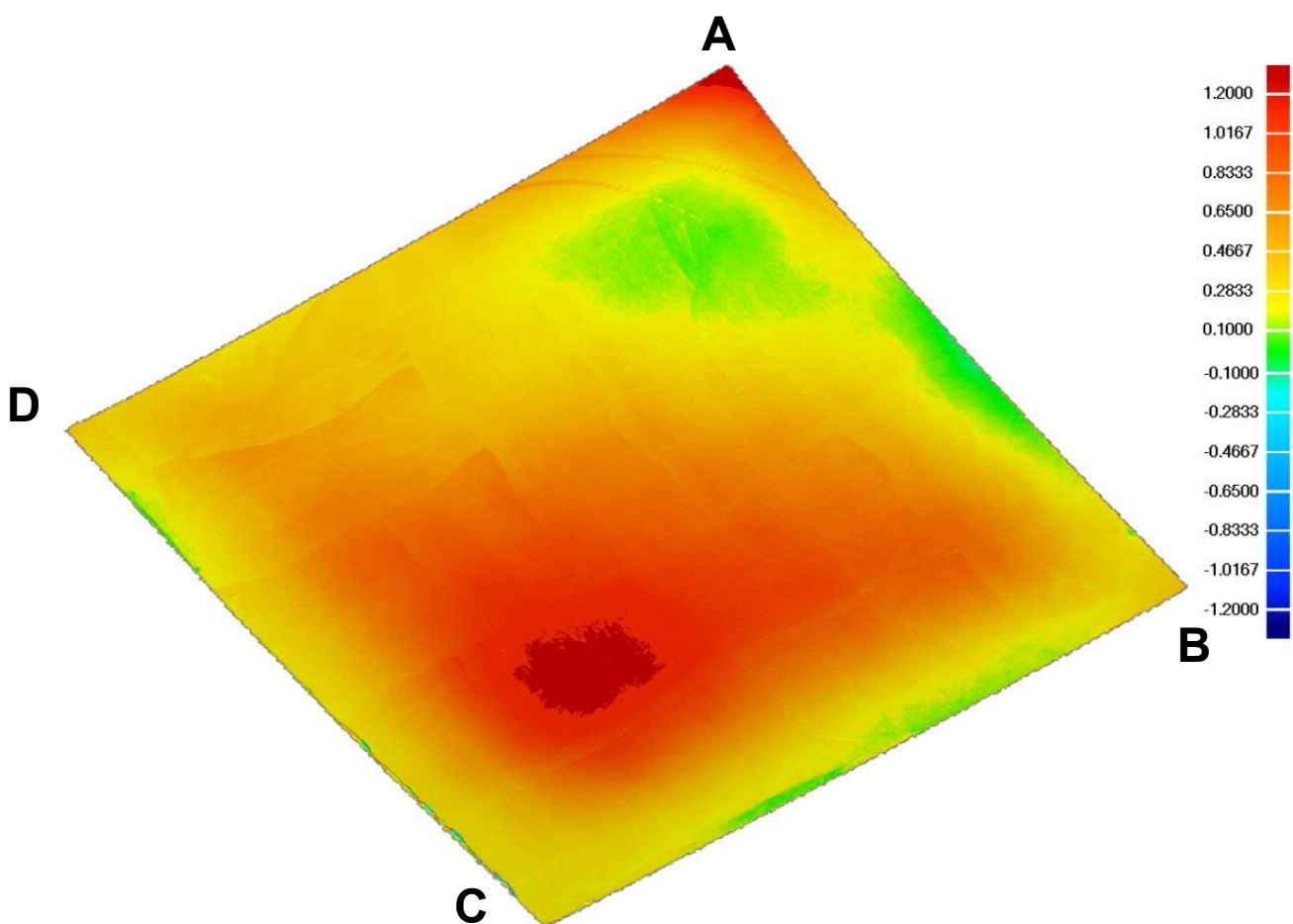


Abbildung 49 Messung Wachsprobe (Skala in mm)

Abbildung 49 stellt die Abweichungen (Normalabstand) der zwei übereinander gelegten gemessenen Flächen farbcodiert dar. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass die 10mm starke Elastomermatte die Pixelstruktur vollständig glättete. Das in Abbildung 49 erkennbare Rastermuster ist auf die Messfehler beim Einscannen der Flächen zurückzuführen. Das Auftreten dieser Muster kann durch mehrmaliges Einscannen derselben Flächen verringert werden.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass mit steigender Wachsüberdeckung die Dauer der vollkommenen Erstarrung zunimmt. Weiteres ist bekannt, dass die Erstarrung des Wachskörpers von außen nach innen vonstattengeht. Die Erstarrungsgeschwindigkeit ist von der Wärmeleitfähigkeit der Schalung, der Lufttemperatur und der Wärmeleitfähigkeit der Elastomermatte abhängig. Die Annahme war, dass im unteren Eckbereich (C) das Wachs am längsten für die Erstarrung benötigt. Da die anderen Bereiche früher erstarren, wird von diesem Bereich (C) Wachs abgezogen. Diese Annahme bestätigte sich, da im Eckbereich (C) sehr große Abweichungen erkennbar sind (bis 1,1mm). Der Eckbereich (A) zeigt die stärksten Abweichungen, bis zu 1,2mm. Dieser Eckbereich hat die geringste Wachsüberdeckung mit 8mm, was zu einem schnellen Erstarren dieses Bereiches führte. Eckbereich (C) weist eine Wachsüberdeckung von 110mm auf. Die starken Verformungen im Eckbereich (A) können auf den Schüsseleffekt zurückgeführt werden, da das Wachs an der Luftseite schneller aushärtet als im unteren Bereich der Elastomermatte. Wie groß die Stauchungen der Elastomermatte waren, konnte bei diesem Versuch nicht nachgewiesen werden.

Im Allgemeinen sind die Ergebnisse sehr vielversprechend, da die Verformungen mit maximal 1,2mm gering ausfielen. Ein Mindestwert für die Wachsüberdeckung muss gewährleistet werden, um solche Effekte wie im Eckbereich (A) zu vermeiden.

Die Abweichungen können auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- **gewöhnliche Wärmedehnung des Wachses**
- **Deformationen durch ungleichmäßiges Abkühlen und Erstarren der Wachsprobe**
- **Stauchung der Elastomermatte durch Eigengewicht des Wachses**

3.5 Vorversuche Wachs als Bindemittel (Wachsbeton)

Wie aus den Wachsversuchen von Kapitel 3.4 ersichtlich, konnte das Schwinden durch den Einsatz von speziellen Wachsen, wie z.B. Romocast 305, stark reduziert werden. Die gemessenen Geometrieabweichungen sind dabei noch weit entfernt von der gewünschten Genauigkeit. Da die Eigenschaften von Wachsen wie das starke Schwindverhalten und die somit verbundenen Deformationen nie vollständig vermieden werden können, wurde die Idee geboren, das Wachs nur als Bindemittel in einem Korngefüge wie im Asphaltbau für eine eigene Entwicklung zu verwenden. Die Grundidee bestand darin, dass durch ein gut abgestimmtes Korngefüge Schwindverhalten wie Festigkeitseigenschaften verbessert werden können. Zu diesem Anwendungsgebiet von Wachs war keine Literatur vorhanden.

3.5.1 Grundlagen der Rezeptentwicklung

Die technischen Kenntnisse konnten aus dem Asphaltbau entnommen werden, da das Bitumen-Gestein-Gemenge mit einem Wachs-Gestein-Gemenge am ehesten vergleichbar ist:

- Die Rohdichte von Wachs und Bitumen liegt bei beiden ungefähr bei 1kg/dm^3 .
- Das Verhältnis des Wärmedehnungskoeffizienten bei Bitumen und Gestein beträgt fast **1:20**, dem Gleichzusetzen ist jener von Wachs zu Gestein.
- Viskositätsabnahme bei Temperaturerhöhung

Da am Pixeltisch nur sehr geringe Verdichtungsarbeiten zulässig sind, musste nach einem selbstverdichtenden, fließfähigen Gemisch gesucht werden. Diese Eigenschaften waren mit dem des Gussasphaltes gleichzusetzen.

Der erste Schritt war, verschiedene Gesteinsarten, Kornzusammensetzungen mit verschiedenen Bindemittelanteilen (Wachs) in Kleinformen abzuformen und auf bestimmte Kriterien zu untersuchen.

Folgende Kriterien für Wachs als Bindemittel wurden definiert:

- **Gutes Mischverhalten des Gesteins mit dem Wachs**
- **Hohlraumfreies Gefüge**
- **Verarbeitbarkeit, Konsistenz**
- **Möglichst geringes Schwinden des Gussteils**
- **nicht poröse Oberfläche / glatt oder strukturiert**

Um den Wachsanteil für die verschiedenen Rezepturen zu ermitteln, musste die Schüttdichte der einzelnen Gesteine ermittelt werden. Der aus der Schüttdichte berechnete Hohlraum war mit dem Wachsanteil gleichzusetzen, um den Hohlraum des Gefüges vollständig zu füllen.

Die Ermittlung von Schüttdichten und Hohlraum wurde gemäß ÖNORM EN 1097-3 [28] durchgeführt, Rohdichten und Wasseraufnahme nach ÖNORM EN 1097-6 [29].

$$m_W = V_G \cdot \frac{VMA}{100} \cdot \rho_W \quad [4]$$

m_W Masse Wachs [g]

V_G Volumen Gestein (Schüttdichte)[dm³]

VMA Hohlraumgehalt des Korngerüstes [V%]

ρ_W Rohdichte Wachs [$\frac{g}{dm^3}$]

Theoretisch müsste ein geringer Wachsüberschuss vorhanden sein, da auch das Schwinden des Wachses berücksichtigt werden sollte. Um so viele Daten wie möglich in Bezug auf das Verhalten des Wachses in Verbindung mit dem Korngerüst zu sammeln, wurden Kombinationen von unterschiedlichen Kornstrukturen (Rundkorn, Bruchkorn) und verschiedenen Sieblinien untersucht. Die verwendeten Gesteinsarten waren:

- **Kornklasse RK 1/4 Quarz+ Kalkstein (aus Bad Fischau)** Abk. **1/4 F.**
- **Produkt „H32“ Quarzsand (Quarzwerke Österreich)** Abk. **H32**
- **Kornklasse KK 0/2 Basalt (aus Klöch)** Abk. **0/2 B.**
- **Kornklasse KK 2/4 Basalt (aus Klöch)** Abk. **2/4 B.**
- **Füller Basalt <0,063mm (aus Klöch)** Abk. **Fül. B.**

Die einzelnen Sieblinien wie auch die Hohlraumberechnungen sind im Anhang dokumentiert. Schüttdichte für Fül.B: wurde nicht ermittelt.

Berechnung der spezifischen Oberfläche:

Die Berechnung der spezifischen Oberfläche kann näherungsweise unter Berücksichtigung der Kornform und der Korngrößenverteilung nach Wesche [25] wie folgt durchgeführt werden.

$$O = \sum_i O_i = \frac{a_f}{\rho_{Rg}} \cdot \sum_i \left(\frac{10 \cdot a_i}{d_{m,i}} \right) \quad [5]$$

mit $d_{m,i} = \sqrt{(d_{u,i} \cdot d_{o,i})}$ [6]

O spezifische Oberfläche [m²/kg]

O_i Oberfläche der Korngruppe i [m²/kg]

ρ_{Rg} mittlere Korndichte der Gesteinskörnung [kg/m³]

$d_{m,i}$ mittlerer Durchmesser der Korngruppe i [mm]

$d_{u,i}/d_{o,i}$ unterer bzw. oberer Korndurchmesser der Korngruppe i [mm]

a_i Anteil der Korngruppe i [M.-%]

a_f Formbeiwert [-]

Kornform	a_f
Kugelig	6,0
Würfelig	8,5
Tetraederförmig	17,0
Oktaederförmig	10,5
Gedrungen, gerundet, kantig	8,0...10,5
Plattig, nadelig	12,0...17,0

Tabelle 4 Formbeiwert a_f nach Wesche [25]

3.5.2 Versuchskonzept, Versuchsablauf

Als Gussform (Abbildung 50) diente eine dreifache Prismenform aus hochlegiertem Stahl nach EN 196-1 [28], mit einem Gesamtvolumen von $0,8 \text{ dm}^3$. Eine einzelne Prismenform hat die Abmessungen $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$.



Abbildung 50 Prismenform



Abbildung 51 Mörtelmischer

Für den Mischvorgang wurde ein Stahlbehälter mit einem Fassungsvermögen von 8 dm^3 verwendet. Da beim Mischen der Rezeptur eine Temperatur von mindestens 74°C Voraussetzung war, wurde der Stahlbehälter in ein temperiertes Wasserbad gestellt. Gemischt wurde mit einem handelsüblichen Mörtel-Farbmischer (siehe Abbildung 51), der mittels Akkubohrmaschine betrieben wurde.

Die Gesteinsorten und das Wachs wurden eingewogen, in einem Behälter vermengt und im Ofen bei 80°C aufgewärmt. Die Temperatur des Wasserbades wurde im Bereich 76°C-85°C gehalten. Nach vollkommenem Aufschmelzen des Wachses wurde das Gemisch im Wasserbad für circa fünf Minuten gemischt und wieder in den Ofen zurückgestellt.

Dieser Vorgang wurde mindestens dreimal wiederholt, um ein vollständiges Aufschmelzen des Wachses sowie eine ausreichende Homogenisierung zu gewährleisten.



Abbildung 52 Mischvorgang

Nach Beendigung des Mischvorganges konnte der Wachsbeton (Wachs + Gestein) abgegossen werden. Dies musste sehr schnell erfolgen, da der Wachsbeton, verstärkt durch die Stahlform, sehr schnell aushärtet.

Es werden 4 Mischungen (Tabelle 5) untersucht:

Rezeptur	1/4F [M.-%]	2/4B [M.-%]	0/2B [M.-%]	H32 [M.-%]	Fül. B. [M.-%]	Wachs [M.-%]
I.	79,9					20,1
II.	72,9			14,5		12,6
III.		35,2	43,1			21,7
IV.		37,5	29,2		16,6	16,7

Tabelle 5 Massenanteile der untersuchten Wachs-Gesteinsmischungen

3.5.3 Versuche und Ergebnisse

3.5.3.1 Rezeptur I

Begonnen wurde mit einem 1/4 Rundkorn aus Bad Fischau. Die Bestandteile des Gesteins sind hauptsächlich Quarz, aber auch Kalkstein und andere Gesteine.

Rezeptur	$m_{1/4F}$ [g]	VMA _{1/4F} [V.-%]	$\rho_{Sch1/4F}$ [g/dm ³]	m_W [g]	Wachs [M.-%]
I	1960,8	40,147	1634	494,1	20,1

Tabelle 6 Erforderliche Mengen für die Herstellung von ca. 1,2l Wachsbeton

m_W Masse Wachs

In der folgenden Berechnung ist die Ermittlung des Massenanteils Wachs mittels Hohlraumgehalt des Korngefüges (VMA_{1/4F}), Schüttdichte ($\rho_{Sch1/4F}$) und Rohdichte des Wachses (ρ_W) ersichtlich. Für die Herstellung der Mischung wurden 1,2 dm³ von 1/4F verwendet.

$$\rho_W = 1014,06 \frac{g}{dm^3} \quad [7]$$

Die Schüttdichte von 1/4 F ($\rho_{Sch1/4F}$) mit den 1,2dm³ multipliziert, ergibt die benötigte Menge an 1/4 F. ($m_{1/4F}$).

$$1634 \cdot 1,2 = 1960,8g \quad [8]$$

$$1,2 \cdot 0,40147 = 0,48176dm^3 \quad \text{Hohlraum von 1,2 dm}^3 \text{ 1/4 F} \quad [9]$$

Mit der Rohdichte des Wachses (ρ_W) und dem berechneten Hohlraum von 1,2dm³ 1/4 F., kann die benötigte Wachsmenge (m_w) berechnet werden.

$$1014,06 \cdot 0,48716 = 494,1g = m_W \quad [10]$$

$$\frac{494,1 * 100}{1960,8 + 494,1} = 20,1 M.-% \quad \text{Masseanteil Wachs} \quad [11]$$

Bei diesem Versuch wurde exakt die berechnete Menge Wachs verwendet, welche für die vollkommene Hohlraumfüllung erforderlich ist. Beim Mischvorgang sollte dieser Umstand in einem geringen Wachsüberschuss sichtbar werden, da das eingesetzte Wachs im flüssigen Zustand aufgrund der Temperaturexpansion eine Volumenvergrößerung von bis zu 6% gegenüber Raumtemperatur aufweisen kann. Wie in Abbildung 53 ersichtlich, setzt sich bei Unterbrechung des Mischvorganges Wachs an der Oberfläche ab. Dies ist ein Hinweis für Bindemittelüberschuss.



Abbildung 53 Bindemittelüberschuss



Abbildung 54 Fertiger Abguss Rezeptur I.

Die Mischung der Rezeptur I ließ sich sehr leicht mischen, was auf den hohen Bindemittelanteil und das verwendete Rundkorn zurückzuführen ist. Abgegossen wurde bei einer Mischungstemperatur von 80°C und einer Stahlformtemperatur von 23°C.

Nach vollständiger Aushärtung des Wachsbetons konnte mit freiem Auge an den Rändern ein kleiner Spalt zwischen Prismenform und Wachs beton erkannt werden. Dies ist auf das Schwindverhalten des Wachses zurückzuführen.

Das Ausformen der drei Wachs beton-Modelle funktionierte sehr gut, nur geringes Haftverhalten an der Stahlform war zu beobachten.



Abbildung 55 Untere Fläche



Abbildung 56 Seitenfläche

Bei den Oberflächenqualitäten wurde zwischen der unteren Fläche und den Seitenflächen unterschieden. Die eindeutig beste Qualität wies die untere Fläche auf, welche keine Lufteinschlüsse aufwies, (siehe Abbildung 55) und relativ eben war. Die Ebenheit des Wachs Körpers wurde auf einer Stahlplatte durch Auflegen überprüft. Es war eine leichte, gleichmäßige Struktur zu erkennen. Diese Strukturierung ist auf das schnelle Aushärten des Wachses an den Randbereichen, aufgrund der guten Wärmeabfuhr der Stahlform, zurückzuführen. Dieser Effekt ist in Abbildung 56 sehr gut zu erkennen.

Die Seitenflächen wiesen eine viel stärkere Strukturierung auf und das Gestein kam direkt an der Oberfläche zu liegen. Die Ergebnisse der Rezeptur I können wie folgt zusammengefasst werden:

- **Leichtes Verarbeiten und Mischen**
- **Ebene Oberfläche**
- **Keine Luftporeneinschlüsse**
- **Leichte Struktur**

Bei allen drei Wachs betonprismen wurden die Länge und Breite mit einer Schiebelehre gemessen und ein Mittel gebildet. Aufbauend auf diesen Messungen konnte das Schwindverhalten der Rezeptur bestimmt werden. Im Kapitel 3.5.4 findet sich eine Tabelle mit den Messungen aller vier Wachs betonrezepturen.

3.5.3.2 Rezeptur II

Um den Hohlraum des Korngerüsts zu verringern und somit auch den Wachsanteil, wurde bei Rezeptur II H32 Quarzsand von den Österreichischen Quarzwerken hinzugefügt. H32 hat einen mittleren Korndurchmesser von 0,37mm und besteht aus Kornklassen von 0,125 bis 0,15mm.

Rezeptur	$m_{1/4F}$ [g]	m_{H32} [g]	VMA_{neu} [V.-%]	$\rho_{Sch1/4F}$ [g/dm ³]	m_w [g]	Wachs [M.-%]
II	1634	326,8	27,8	1634	282	12,6

Tabelle 7 Erforderliche Mengen für die Herstellung von ca. 1l Wachs beton

Die getroffene Annahme war hier eine Hohlraumfüllung des 1/4F. Korngerüsts durch den Quarzsand H32 ohne Beeinflussung des Gesamtvolumens. Verändert werden soll nur die Schüttdichte. Das Mischungsverhältnis wurde wie folgt angenommen:

16, 6M-% H32 mit 83,4 M.-% 1/4 F. (Annahme)

In der folgenden Berechnung ist die Ermittlung des neuen VMA (VMA_{neu}) und der Masse des erforderlichen Wachses ersichtlich.

Ausgangswert war hier 1dm^3 1/4 F. ($1634\text{g}/\text{dm}^3$). Durch Subtraktion des gegebenen $\text{VMA}_{1/4}$, und dem berechneten Reinvolumen von H32 (ρ_{H32}), konnte VMA_{Neu} berechnet werden.

$$V_{\text{H32}} = \frac{m_{\text{H32}}}{\rho_{\text{H32}}} \quad [12]$$

V_{H32} Reinvolumen von H32 [dm^3]

ρ_{H32} Trockendichte H32 [$\frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$]

m_{H32} Masse H32 [g]

$$\frac{326,8}{2650} = 0,12331\text{dm}^3 \quad [13]$$

$$\text{VMA}_{1/4} = 40,15 \text{ [Vol. \%]} \quad [14]$$

$$\text{VMA}_{\text{Neu}} = (0,4015 - 0,123321) \cdot 100 = \mathbf{27,8\%} \quad [15]$$

$$\rho_W = 1014,06 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3} \quad [16]$$

Wie bei Rezeptur I, wird der berechnete Hohlraum mit der Rohdichte des Waxes multipliziert um die benötigte Wachsmenge zu erhalten.

$$m_W = 1014,06 \cdot 0,2782 = \mathbf{282,1\text{g}} \quad [17]$$

Die Versuchsdurchführung war gleich wie bei Rezeptur I, jedoch wurde eine zweite Stahlform auf 80°C vorgewärmt, um eine gleichmäßigere Abkühlung des Wachsbetons zu erreichen. Insgesamt wurden zwei Prismen in der nicht vorgewärmten Form und ein Prisma in der vorgewärmten Form abgegossen.



Abbildung 57 Wenig Bindemittelanteil



Abbildung 58 Geringe Selbstverdichtung

Wie in Abbildung 58 ersichtlich, wies die Rezeptur II kein Selbstverdichtungsverhalten auf. Bei der Verarbeitung wies der Wachs Beton Merkmale von zu geringem Bindemittelanteil auf.

In der vorgewärmten Form bildete sich ein dünner Wachs film an der Oberfläche, was wiederum auf ausreichenden Bindemittelanteil hinweist. Zehn Stunden nach dem Abgießen wurde ausgeformt, um der aufgewärmten Form genügend Zeit für die vollständige Aushärtung des Wachs betons zu geben.



Abbildung 59 Unterseiten (Stahlseite)

Abbildung 60 Oberseiten (Luftseite)

Bei der nicht vorgewärmten Form konnte gleich wie bei Rezeptur I ein kleiner Spalt im eingeschalteten Zustand festgestellt werden. Bei der vorgewärmten Form war kein Spalt bemerkbar. Wie in Abbildung 59 und Abbildung 60 ersichtlich, zeigten die Oberflächen große Qualitätsunterschiede bei vorgewärmter und nicht vorgewärmter Form.

Um die Ebenheit der Unterseite der Wachs betonmodelle festzustellen, wurden die Proben auf eine ebene Stahlplatte gestellt. Bei der nicht vorgewärmten Probe war ein eindeutiges Kippen festzustellen. Die vorgewärmte Probe lag plan auf und es war kein Kippen oder Wackeln des Wachs betonkörpers erkennbar. Die Messungen ergaben bei der vorgewärmten Probe ein viel geringeres Schwindverhalten gegenüber den Proben mit nicht vorgewärmter Form. Alle Messungen und Vergleiche zu den vier Proben sind in Kapitel 3.5.4 zu finden.

3.5.3.3 Rezeptur III

Bei Rezeptur III wurde mit einem Bruchkorn gearbeitet, um Verarbeitungsunterschiede zum Rundkorn festzustellen. Hier kamen ein Basalt 2/4 und 0/2 aus Klösch zum Einsatz.

Um den VMA des 2/4 Basalt zu verringern, wurde ein Mischungsverhältnis von **45M.-% 2/4B zu 55M.-% 0/2B** hergestellt. Mit diesem Mischungsverhältnis, konnte eine Sieblinie mit einer

stetigen Kornverteilung erreicht werden. Der VMA dieser neuen 0/4 Mischung wurde nach ÖNORM EN 1097-3 [28] bestimmt.

Rezeptur	$m_{2/4B}$ [g]	$m_{0/2B}$ [g]	VMA _{0/4B} [V.-%]	$\rho_{Sch0/4B}$ [g/dm ³]	m_W [g]	Wachs [M.-%]
III	731,7	894,3	44,35	1626	449,7	21,7

Tabelle 8 Erforderliche Mengen für die Herstellung von ca. 1l Wachsbeton

$$m_W = 0,4435 \cdot 1014,06 = 449,7 \text{ g} = m_W \quad [18]$$

Die Versuchsdurchführung war hier gleich wie bei Rezeptur I. Zusätzlich wurde bei einer Prismenform eine 10mm starke Elastomermatte eingelegt. Es wurde die gleiche Elastomermatte wie bei den Wachsgussversuchen auf dem Pixeltisch verwendet (siehe Kapitel 3.4.2.2.). Mit der eingelegten Elastomermatte sollten ähnliche Verhältnisse wie am Pixeltisch erreicht werden. Weiters wird durch das Einlegen der Elastomermatte eine Isolationsschicht zur Stahlform aufgebaut, was eine Verbesserung der Oberflächenqualität zur Folge haben sollte.

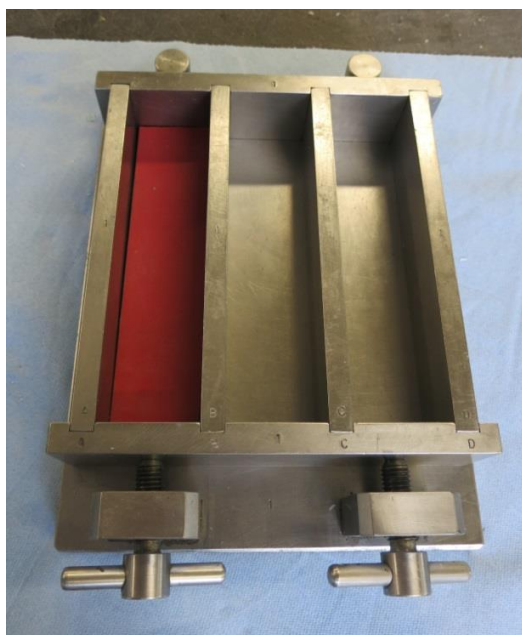


Abbildung 61 Eingelegte Elastomermatte



Abbildung 62 Bindemittel Überschuss

Wie aus Abbildung 62 ersichtlich, ist ein Aufschwimmen einer Wachsschicht erkennbar. Dies ist auf den Wachsüberschuss im Gemenge zurückzuführen. Die Mischung erwies sich als etwas schwerer als die der Rundkornmischungen, da hier mehr Feinteile und auch Bruchkorn beigemischt sind. Die Stahlform wurde bei diesem Versuch nicht vorgewärmt.

Gleich wie bei Rezeptur I und Rezeptur II war ein Spalt zwischen Wachsbe- ton und Stahlform nach der Abkühlung bemerkbar.

Abbildung 63 zeigt die erhärtete Probe, wobei der Randbereich sich eindeutig vom Rest des Wachsbe- tonkörpers unterscheidet. Das anliegende Material an der Stahlform bildet einen Ring, der kurz nach dem Abgießen der Form entsteht. In diesem Randbereich härtet der Wachsbe- ton durch die schnelle Wärmeabfuhr der Stahlwände als Erstes aus. Durch die schnelle Aushärtung des Wachsbe- tons wird im Randbereich keine vollständige Selbstverdichtung des Gemisches erreicht. Die Oberflächen der Unterseiten der Wachsbe- tonprismen weisen eine gleichmäßige feine Struktur auf. Bei dem Wachsbe- tonprisma mit unterlegtem Elastomer konnte nur ein minimaler Unterschied bezüglich der Oberflächenqualität zu den anderen Proben festgestellt werden. Die Oberfläche mit dem Elastomer wirkte etwas feinstrukturierter als die Wachsbe- tonprismen ohne Elastomereinlage. Die Elastomermatte wirkte als Isolationsschicht zur Stahloberfläche. Dieser Umstand führte zu einer Verzögerung der Wärmeabfuhr, dadurch blieb die Wachsbe- tonmischung länger flüssig und hatte mehr Zeit zur Lückenfüllung an der Unterseite. Die erste Probe von Links in Abbildung 64 zeigt das Wachsbe- tonprisma mit untergelegtem Elastomer. Alle Wachsbe- tonprismen wurden mit der Stahlplatte auf Ebenheit überprüft. Bei allen Wachsbe- tonprismen konnte ein Kippen festgestellt werden, jedoch bei dem Prisma mit eingelegtem Elastomer fiel dieses am Geringsten aus.

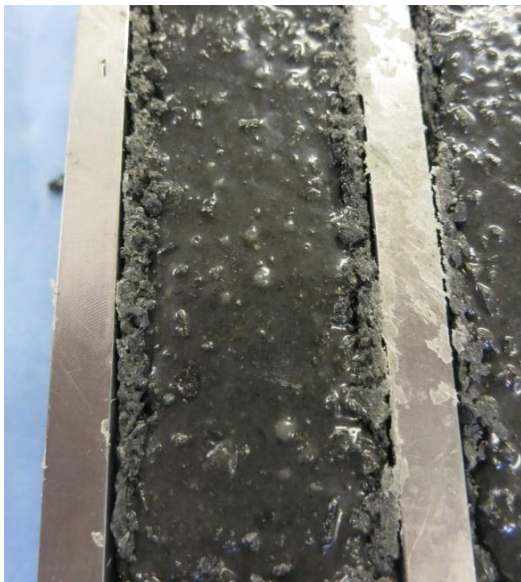


Abbildung 63 Ausgehärtete Rezeptur III



Abbildung 64 Unterseite (Stahlseite) Rezeptur III

3.5.3.4 Rezeptur IV

Bei der Rezeptur IV wurde eine Gussasphalt-Rezeptur als Vorlage genommen, da die Gussasphalteeigenschaften sich stark mit den gewünschten Kriterien überschneiden. Wie

schon in Kapitel 2.5 erläutert, ist Gussasphalt selbstverdichtend und weist ein sehr geringes Schwindverhalten auf. Das Korngerüst von Gussasphalt hat durch seine spezielle Rezeptur einen sehr geringen Hohlraumgehalt. Dieser Umstand reduziert den Bindemittelanteil stark. Da bei dieser Probe Wachs anstelle von Bitumen als Bindemittel zum Einsatz kam, wurde die Wachsmenge in einem iterativen Mischungsprozess bestimmt.

Begonnen wurde mit einem **9%-igen** Masseanteil an Wachs. Der Füller wurde durch kontinuierliche Zugabe langsam eingemischt. Der Wachsanteil wurde auf **13M.-%** (siehe Abbildung 65) erhöht, was aber noch immer zu keiner homogen selbstverdichtenden Mischung führte. Bei 15M% erreicht man die Grenzen der Mischbarkeit, da sich eine sehr kompakte zähe Mischung ergab. Erst bei **16,7M.-%** Wachsanteil konnte eine gussasphaltähnliche Mischung erreicht werden (siehe Tabelle 9). Bei 16,7M.-% wurde das Mischverhalten auch wieder besser, jedoch war die Drehzahl des Akkuschaubers für diese Konsistenz zu hoch. Bessere Mischergebnisse könnten mit dem Einsatz eines größeren und langsam drehenden Mischers erzielt werden.

Rezeptur	$m_{2/4B}$ [g]	$m_{0/2B}$ [g]	$m_{Fül.B.}$ [g]	m_W [g]	Wachs [M.-%]
IV	1147,2	1003,8	717	573,6	16,7

Tabelle 9 Erforderliche Mengen für die Herstellung von ca. 1,4l Wachsbeton

Gleich wie bei der Rezeptur II wurde eine zweite Prismenform auf 80°C vorgewärmt. Elastomermatte wurde keine eingelegt.



Abbildung 65 15M% Wachsanteil



Abbildung 66 20M% Wachsanteil

Wie schon bei der Rezeptur III bildete sich bei der nicht aufgewärmten Form nach 30 bis 45 Sekunden ein ausgehärteter Randbereich. Schon nach zwei Minuten konnte ein Spalt zwischen Wachsbeton und Stahlform festgestellt werden. Bei der vorgewärmten Form war

dies nicht der Fall, jedoch dauerte hier der Aushärtungsprozess um einiges länger, dafür verlief dieser gleichmäßiger.

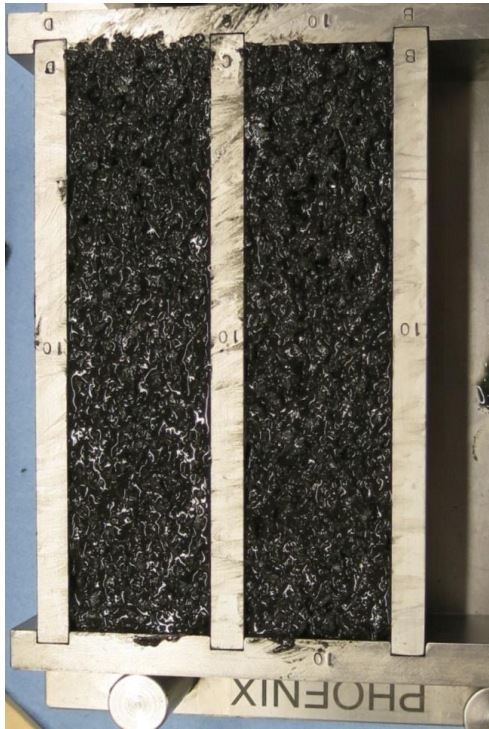


Abbildung 67 Vorgewärmte Form



Abbildung 68 Nicht Vorgewärmt

Nach ungefähr sechzehn Stunden wurde ausgeformt, um ein vollständiges Erhärten der Wachsbetonprismen der vorgewärmten Form zu gewährleisten. Wie in Abbildung 69 erkennbar, weist das Wachsbetonprisma der vorgewärmten Form eine viel bessere, fast spiegelglatte Oberfläche im Gegensatz zum anderen Wachsbetonprisma auf. Vereinzelt sind Luftporeneinschlüsse in der Oberfläche zu erkennen. Wie schon bei den letzten Rezepturen wurden alle Wachsbetonprismen mittels Stahlplatte auf Ebenheit überprüft. Bei den nicht vorgewärmten Prismen konnte ein Kippen festgestellt werden. Die vorgewärmten Prismen lagen alle plan auf, und es konnte kein Kippen festgestellt werden.

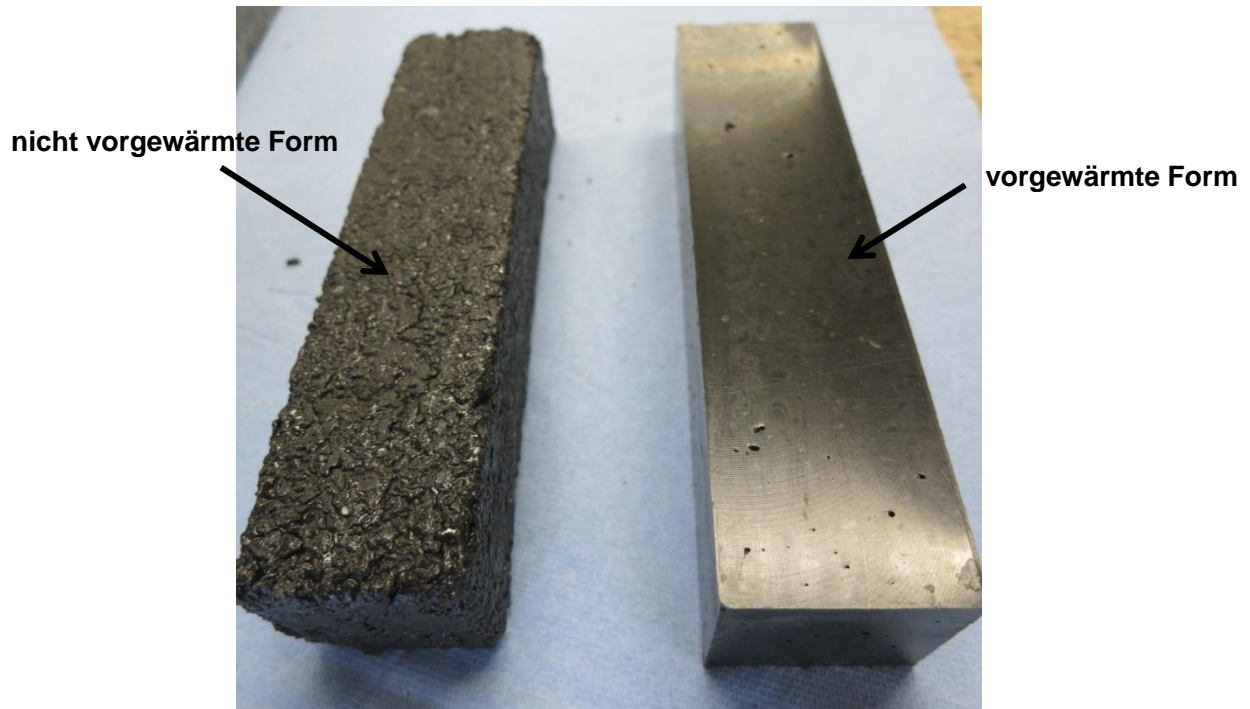


Abbildung 69 Unterseite

3.5.4 Vergleichende Versuchsauswertung der vier Wachsbetonrezepturen

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse sowie die Oberflächenbeschaffenheit und Verarbeitbarkeit der einzelnen Rezepturen beschrieben. Von jeder Rezeptur wurden alle Prismen mit einer Schiebelehre vermessen und der Mittelwert bestimmt. Als Ist-Länge wurde die Stahlformlänge mit 160,00mm angenommen. Die folgende Tabelle enthält nur Messdaten der Proben aus den nicht vorgewärmten Formen.

Rezeptur	Gestein	Wachs [M.-%]	Spez.Oberfläche [m ² /kg]	VMA [V.-%]	Schwindmaß [%]
I	1/4F	20,1	1,44	40,1	0,52
II	1/4F+H32	12,6	3,49	27,8	0,37
III	0/4B	21,7	4,67	44,35	0,62
IV	0/4B+Fül.B	16,7	42,43	ca.20-25	0,32

Tabelle 10 Auswertung Schwindmaß nicht vorgewärmt

Die spezifische Oberfläche der Rezepturen wurde mit der Formel 4 nach Wesche [25] berechnet.

Schwinden bei nicht vorgewärmten Stahlformen:

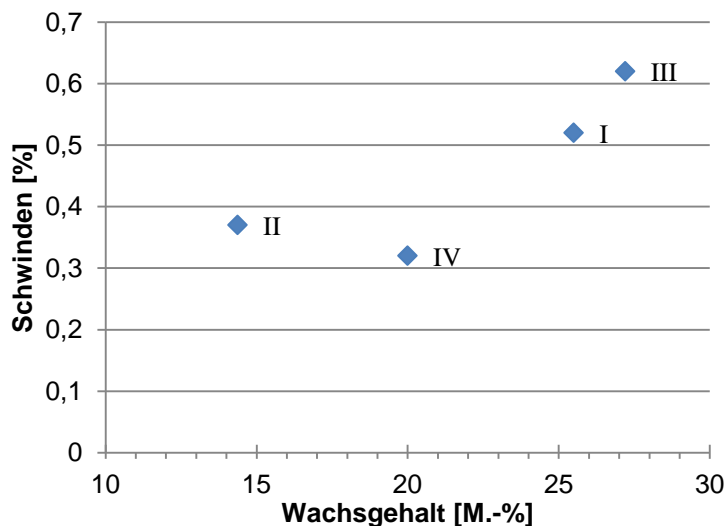


Abbildung 70 Schwinden zu Wachsgehalt

Bei den ersten drei Rezepturen kann die Aussage getroffen werden, dass mit steigendem Wachsanteil das Schwinden zunimmt. Eine Ausnahme macht hier Rezeptur IV, die mit 16,7M.-% Wachsanteil ein geringeres Schwindverhalten als Rezeptur II aufweist, die nur 14,38M.-% Wachs beinhaltet siehe Abbildung 70. Dieses Verhalten könnte mit dem hohen Feinanteil (Füller) zusammenhängen. Um dies zu klären, wurde eine Auswertung nach der spezifischen Oberfläche durchgeführt (siehe Abbildung 71). Aber auch hier ist keine Korrelation festzustellen. Der Feinanteilgehalt in Rezeptur IV bewirkt eine Reduktion des Hohlraumgehalts im Vergleich zur Rezeptur III auf 20-25V.-% und zusätzlich eine Veränderung der Verarbeitbarkeit. Die Mischung der Rezeptur IV wird sehr zäh (viskos) und weist einen sehr hohen Scherwiderstand beim Mischen auf. Unterschiede zwischen Rundkorn und Bruchkorn können bei dieser Versuchsreihe bezogen auf das Schwindverhalten nicht festgestellt werden.

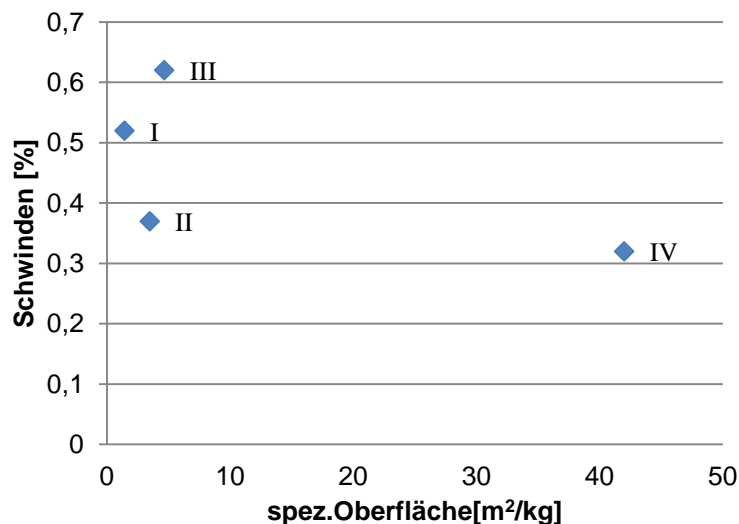


Abbildung 71 Schwinden zu spez. Oberfläche

Grundsätzlich kann bezogen auf das Schwindverhalten festgehalten werden, dass **Rezeptur IV** am geeignetsten ist. Dies korreliert mit dem geringsten Hohlraumgehalt dieser Mischung und könnte auch mit der relativ höchsten Viskosität des Gemisches aus Wachs und Füller verbunden sein. Das geringste Schwinden tritt bei Rezeptur IV auf, obwohl bei der Mischung mit Bindemittelüberschuss gearbeitet werden musste, um sie mit dem verfügbaren Mischer (Akkuschrauber mit Mörtelmischwerkzeug) verarbeiten zu können.

Schwinden bei vorgewärmten Stahlformen:

Hier ist eindeutig ersichtlich, dass bei allen Wachsbetonprismen enorme Verbesserungen bei Oberflächenqualität, Schwindverhalten und Ebenheit erzielt wurden. Das gleichmäßige und langsame Abkühlen der Wachsbetonprismen führte zu geringeren inneren Spannungen, was weiters zu geringeren Deformationen in Längs- und Querrichtung der Prismen führte. Bei den vorgewärmten Formen der Rezeptur I und IV (Rezeptur I und III wurden nicht vorgewärmt) konnte **keine Abweichung** zwischen Prismen und Stahlformlänge von 160mm mit der Schiebelehre festgestellt werden. Weiters konnte kein Kippen bei der Ebenheitsüberprüfung bei allen Wachsbetonprismen mit vorgewärmter Stahlform festgestellt werden. Bei einem Ausdehnungskoeffizienten von Stahl ($\alpha_S = 12 \cdot 10^{-6}/K$), einem ΔT von $58^\circ C$ und der Prismenformlänge 160mm, würden sich die 160mm auf 160,11mm verlängern ($\Delta l_S = 0,11mm$). Beim Wachsbeton würde sich ein Δl_W von ca. 0,6mm je nach Rezeptur ergeben. Dies zeigt, dass nicht nur das Temperaturschwinden der Stahlform für die guten Schwindergebnisse der Wachsbetonprismen verantwortlich ist. Somit ist zu vermuten, dass durch diese gemeinsame Abkühlung von Form und Wachsbeton die Volumenverminderung durch das Temperaturschwinden über die Höhe der Form durch Absinken der freien Oberfläche stattgefunden hat (siehe Abbildung 72).

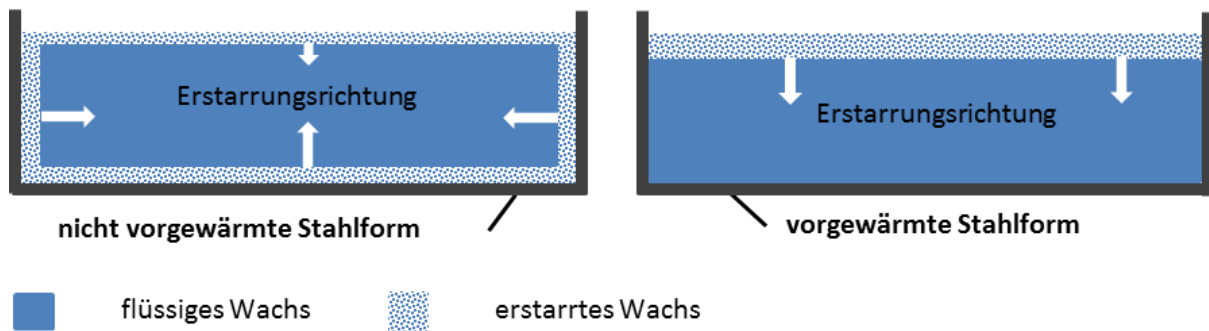


Abbildung 72 Erstarrensverhalten Wachs Beton

Oberflächenqualität:

Die qualitativ hochwertigste bzw. glatteste Oberfläche wies eindeutig **Rezeptur I** auf. Dies ist auf den hohen Wachsanteil zurückzuführen und darauf, dass das sehr fließfähige Wachs die Schalungsoberfläche vollständig benetzte und die relativ groben Körner an der Oberfläche vollständig umhüllen konnte. Wenn jedoch eine Strukturierung der Oberfläche wünschenswert ist, können **Rezeptur III und IV** in Betracht gezogen werden.

Mischverhalten:

Am einfachsten ist hier eindeutig Rezeptur I zu mischen. Dies ist auf den hohen Wachsanteil und das Rundkorn zurückzuführen. Den größten Widerstand beim Mischvorgang setzte die Rezeptur IV entgegen, jedoch kann hier mit einer anderen Mischmethode ausgeholfen werden. Die Viskosität des Wachs-Füller Gemisches ist sehr hoch und es scheint ein scherverdickendes Verhalten vorzuliegen. Dies bedeutet, mit zunehmender Drehzahl des Mixers erhöht sich der Scherwiderstand und die Viskosität.

3.5.5 Biegezug und Druckprüfung nach ÖNORM EN 196-1 [30]

Durch die auftretenden hydrostatischen Kräfte beim Betoniervorgang sind gute Verformungsbeständigkeit und Festigkeit zu gewährleisten. Um weitere Erkenntnisse über Wachs Beton zu erlangen, werden Biegezug und Druckprüfungen nach ÖNORM EN 196-1 [30] an den verschiedenen Wachs Betonprismen durchgeführt, siehe Abbildung 73 und Abbildung 74.



Abbildung 73 Biegezugprüfung



Abbildung 74 Druckprüfung

Zuerst wurden die Proben auf Biegezug bis auf Versagen geprüft und mit den beiden Bruchteilen wurde nachfolgend die Druckprüfung durchgeführt. Dieser Prüfung wurden alle Proben, unabhängig ob mit vorgewärmten Formen oder nicht vorgewärmten Formen hergestellt, unterzogen. In der folgenden Tabelle sind alle ausgewerteten Daten der Biegezug- und Druckprüfung aufgelistet. Die Biegezug- und Druckprüfung wurde bei Raumtemperatur durchgeführt. Vier Proben wurden einer Druckprüfung bei 50 °C Probentemperatur unterzogen (siehe Tabelle 11).

Probe	Rezeptur	Gestein	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Temp. Probe [°C]	Temp. Form [°C]	Biegezugfestigkeit ⁶ [N/mm ²]	Druckfestigkeit ⁷ [N/mm ²]
0.0		Nur Wachs	160	40	29,5	22	80	7,1	(50)
1.1	I	1/4F	160	40	39,1	22	22	5,8	10,3
2.1	II	1/4F+H32	160	40	34	22	22	5,2	9,4
2.2	II	1/4F+H32	160	40	34	22	22	5,0	
3.1	III	0/4B	160	40	39,64	22	22	6,6	11,7
3.2	III	0/4B	160	40	39,64	22	22	7,1	
3.3	III	0/4B	160	40	40	50	22		0,4
3.4	III	0/4B	160	40	40	50	22		0,4
4.1	IV	0/4B+Fül.B.	160	40	40	22	22	7,4	13,1
4.2	IV	0/4B+Fül.B.	160	40	40	22	22	8,1	
4.3	IV	0/4B+Fül.B.	160	40	40	22	80	7,9	14,8
4.4	IV	0/4B+Fül.B.	160	40	40	22	80	6,9	
4.5	IV	0/4B+Fül.B.	160	40	40	50	22		0,5
4.6	IV	0/4B+Fül.B.	160	40	40	50	22		0,5

Tabelle 11 Biegezug Druck Prüfung

⁶ Mit den vorgewärmten Proben wurden keine Biegezugfestigkeitsprüfungen durchgeführt

⁷ Bei den angegebenen Werten der Druckfestigkeit, handelt es sich um den Mittelwert der beiden Bruchstücke von der Biegezugprüfung.

Bei den Biegezugergebnissen ist eindeutig eine Tendenz in Richtung feinteilreiche Mischungen ersichtlich (Rezepturen III und IV). Bei den Proben mit hohem Feinanteil (Proben 4.1-4.4), konnten die höchsten Werte erreicht werden, bis zu $8,1\text{N/mm}^2$. Ein Biegezugfestigkeitsunterschied zwischen vorgewärmten und nicht vorgewärmten Formen konnte hier nicht festgestellt werden. Am schlechtesten schnitten die Proben mit geringem Feinanteil ab (Probe 1.1-2.2). Eine Ausnahme lieferten die Proben 2.1-2.2, die trotz höheren Feinanteils als die Probe 1.1 eine geringfügig niedrigere Biegezugfestigkeit aufwiesen. Dieses Ergebnis ist mit ziemlicher Sicherheit auf den zu geringen Wachsanteil der Proben 2.1-2.2 zurückzuführen. Bei der Probe 0.0 wurde ein reiner Wachskörper geprüft, um die Ergebnisse der anderen Mischungen besser deuten zu können. Mit $7,1\text{ N/mm}^2$ liegt die Probe 0.0 im Mittelbereich. Nur mit den Proben mit hohem Fülleranteil (4.1-4.4) konnten bessere Biegezugergebnisse erzielt werden.



Abbildung 75 Bruchfläche Probe 1.1

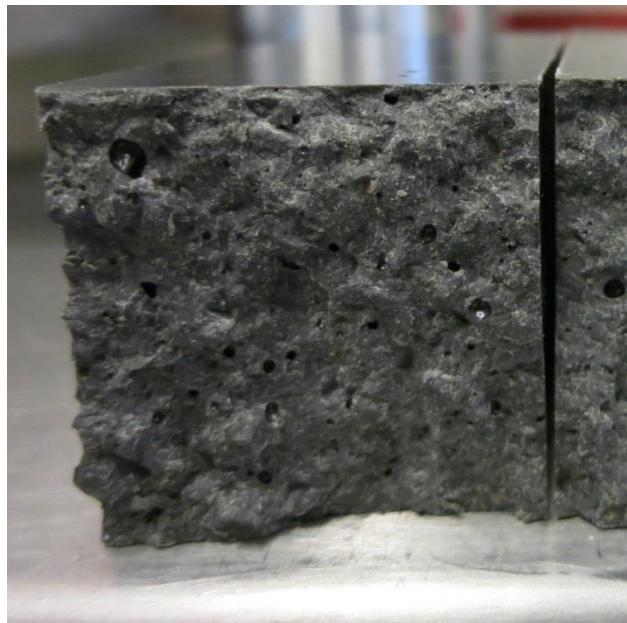


Abbildung 76 Bruchfläche Probe 4.3

Abbildung 75 und Abbildung 76 zeigen die Bruchflächen einer feinteilarmen Probe 1.1 und einer feinteilreichen Probe 4.3 nach dem Biegezugversuch. Hier sind bei beiden Proben 1.1 und 4.3 eindeutig Luftporen zu erkennen. Ein Zusammenhang zwischen Luftporengehalt und Feinanteil konnte hier nicht festgestellt werden.

Aus den Biegezugversuchen kann man schließen, dass für das Biegezugverhalten die Festigkeit des Wachses den größten Einfluss hat. Zusätzlich hat auch das Haftverhalten zwischen Wachs und Gesteinskorn einen Einfluss auf die Festigkeit. Das Haftverhalten von dem verwendeten Wachs (Romocast 305) auf verschiedenen Oberflächen wurde bei dieser Arbeit nicht gezielt untersucht. Es ist aber so, dass sie Mischungen mit eher glatten Rundkorn geringere Biegezugfestigkeiten aufweisen als der raue und kantige Basalt.

Bei den Druckprüfungen war die Tendenz ähnlich wie bei den Biegezugversuchen. Die höchsten Werte erreichten die feinteilreichen Proben 4.1-4.4 mit maximal $14,8\text{N/mm}^2$. Jedoch waren hier die Unterschiede größer als bei den Biegezugversuchen. Bei der Biegezugfestigkeit lieferte die Proben 4.1-4.2 eine um 12% höhere Biegezugfestigkeit als die Proben 3.1-3.2. Bei der Druckfestigkeit konnte jedoch bei denselben Proben eine Steigerung von 18% erreicht werden. Bei der Wachsprobe 0.0 (siehe Tabelle 11) ist der Wert 50N/mm^2 in Klammer gesetzt, da dieser Versuch als ungültig zu sehen ist. Hier traten sehr große plastische Verformungen auf und es konnte kein eindeutiger Bruch festgestellt werden. Bei der Druckprüfung stieg die Druckkraft zuerst konstant wie bei allen anderen Wachsbetonproben an. Hier trat jedoch kein typisches Bruchverhalten auf und die Prüfung wurde nicht automatisch abgebrochen. Über einen gewissen Zeitraum blieb die Kraftereinwirkung konstant und starke Verformungen waren festzustellen. Nach einer gewissen Verformung der Probe stieg die Druckkraft wieder an und es wurden Werte bis 50N/mm^2 (Versuchsabbruch) erreicht.



Abbildung 77 Druckprüfung Probe 1.1

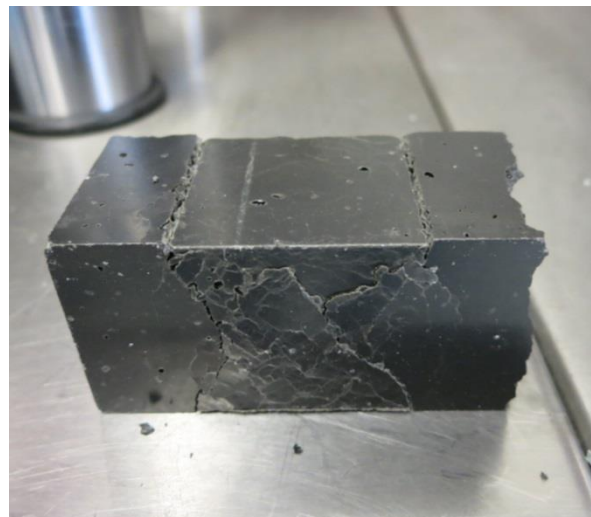


Abbildung 78 Druckprüfung Probe 5.1

Abbildung 76 und Abbildung 77 zeigen Proben nach der Druckprüfung. Die Wachsbetonproben zeigen bei 22°C Probentemperatur ein ähnliches Bruchverhalten wie Beton. Die Proben brechen nicht zur Gänze, können jedoch mit geringem Kraftaufwand getrennt werden. Dies ist auf plastische Wachsverformungen im Wachsbetonkörper zurückzuführen.

Druckprüfung mit 50°C Probentemperatur:

Da die Eigenschaften von Wachsen stark von der Temperatur abhängig sind, wurden vier Proben im Ofen auf 50°C erwärmt und danach sofort der Druckprüfung unterzogen. Die Proben wurden vier Stunden auf 50 °C erwärmt, um eine konstante Temperatur im gesamten Probekörper zu gewährleisten.

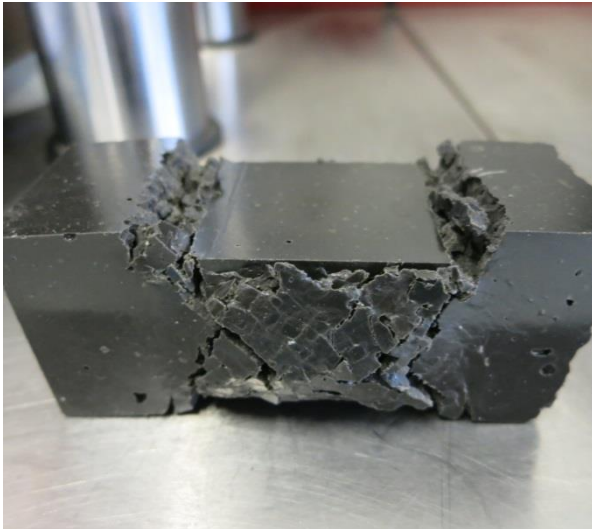


Abbildung 79 Druckprüfung Probe 4.5



Abbildung 80 Druckprüfung Probe 4.6

Bei optischer Betrachtung wirkten die Proben nach dem Aufwärmen auf 50°C fest und formstabil. Der Tropfpunkt des Waxes liegt zwischen 68°C und 72°C. Wie aus der Tabelle 11 ersichtlich, wurden maximale Werte von lediglich 0,5N/mm² Druckfestigkeit erreicht. Die Erwärmung der Proben führte zu einem rapiden Abfall der Druckbelastbarkeit. Bei der Durchführung der Druckprüfung konnte kein typisches Bruchverhalten erkannt werden (siehe Abbildung 78 und Abbildung 79). Bei den angegebenen Werten im Bereich von 0,4N/mm² traten die ersten erkennbaren Verformungen auf. Ab diesem Punkt blieb die Druckkraft für kurze Zeit konstant, da eine Komprimierung des Korngefüges standfand. Danach stieg die Druckkraft wieder konstant an und es konnten Druckfestigkeiten bis 32N/mm² und höher bei allen Proben erreicht werden. Ab diesen Werten wurde die Druckprüfung abgebrochen.

Die Messung zeigte, dass die Proben mit hohem Feinanteil (Probe 3.3-3.4) die höchsten Druckbelastungen bei 50°C Probentemperatur aufwiesen. Bei der Annahme einer Betonierhöhe von drei Metern und einer Betonrohddichte von 2500kg/m³ würde sich ein maximaler hydrostatischer Betondruck (bei UHPC auf die gesamten 3 Meter) von 0,038N/mm² ergeben. Somit ist ein Druckversagen der Wachsbetonschalung bei 50°C auszuschließen. Voraussetzung hierfür ist die Aufnahme der Biegebeanspruchung durch entsprechende Rüstung. Abbildung 80 zeigt die Änderung der Druckfestigkeit des Wachsbetons bei steigender Temperatur.

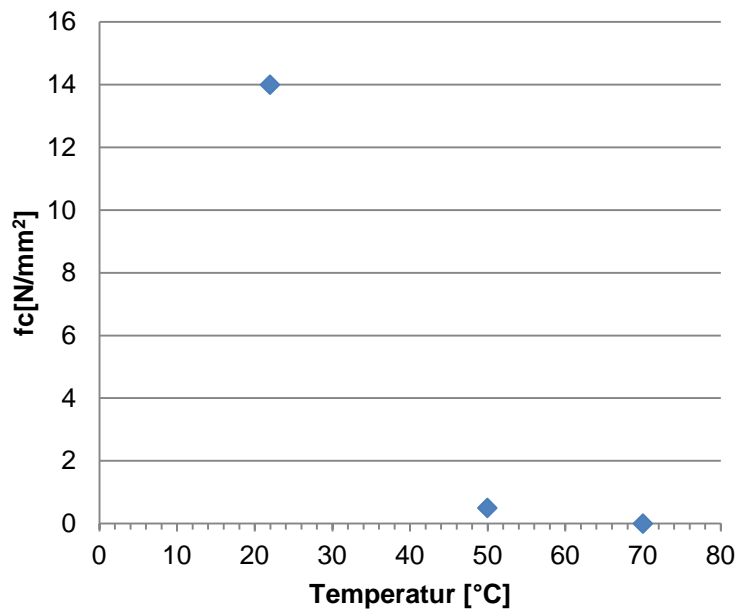


Abbildung 81 Zusammenhang Temperatur und f_c [N/mm²]

3.5.6 Abschließende Anmerkungen

Da es bei den Versuchen, Wachs als Bindemittel, in der begrenzten Zeit nur möglich war, mit einem Wachs verschiedene Mischungen auszutesten, können hier nur erste grundsätzliche Aussagen in Bezug auf Wachs als Bindemittel getroffen werden. Für eine bessere Untermauerung der Rückschlüsse sind unbedingt noch weitere Versuche mit verschiedenen Wachsen erforderlich.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass durch verschiedene Kornmischungen und Bindemittelmengen die Eigenschaften wie Schwinden, Oberflächenqualität oder Ebenheit beeinflusst werden. Aus den Versuchen wurde jedoch ersichtlich, dass diese Eigenschaften viel stärker durch die Gusstechnik und Mischungstemperaturen bestimmt werden.

Die besten Ergebnisse wurden bei allen Proben mit vorgewärmter Form erreicht, da hier ein gleichmäßiges Abkühlen des Wachsbetons sichergestellt wird und somit die Deformationen durch Abbau der inneren Spannungen stark reduziert werden. Das Vorwärmen der Formen wird auch im Aluminiumguss angewandt.

Des Weiteren ist die Mischungstemperatur des Wachsbetons ausschlaggebend für die Gießfähigkeit der Masse, da die Viskosität des Wachses bei steigender Temperatur stark abnimmt.

3.6 Pixeltischversuche mit Wachs als Bindemittel

3.6.1 Versuchskonzept und Durchführung

Ziel dieses Versuches war es, die zwei vorhandenen Pixelformen mit Wachsbeton abzugießen und mit den gewonnenen Wachsbetonschalungen eine UHPC-Schale zu erzeugen. Als Pixelglättung wurde wie in den letzten Versuchen mit Wachs eine 10mm starke Elastomermatte eingelegt. Hier wurde diese lose eingelegt und nicht mit Silikon am Rand fixiert.

Bei diesem Versuch entschied man sich für die Wachsbetonmischung der Rezeptur I (1/4 Fischau) und der Rezeptur III (0/4 Basalt), siehe Tabelle 5. Mit dieser Vorgehensweise konnten bei der Fertigung einer UHPC-Schale, die Oberflächenverträglichkeit zweier Wachsbetonmischungen gleichzeitig untersucht werden.

Da bei den Vorversuchen ersichtlich wurde, dass bei beiden Rezeptur (I und III) ein Wachsüberschuss vorhanden war, wurden bei beiden Mischungen der Wachsanteil um jeweils 1% verringert (siehe Abbildung 53 und Abbildung 62).

Rezeptur	$m_{1/4F}$ [g]	$\rho_{sch1/4F}$ [g/dm ³]	m_w [g]	Wachs [M.-%]	Temp. [°C]
I	12581,8	1634	3000	19,3	90

Tabelle 12 Rezeptur I für ca. 8 Liter

Rezeptur	$m_{2/4B}$ [g]	$m_{0/2B}$ [g]	$\rho_{sch0/4B}$ [g/dm ³]	m_w [g]	Wachs [M.-%]	Temp. [°C]
III	5634,09	6886,11	1626	3130	20	90

Tabelle 13 Rezeptur III für ca. 8 Liter

Der Mischvorgang der Wachsbetone wurde gleich wie in den Vorversuchen mit einem Mörtelmischer in einem auf 85-90°C temperiertem Wasserbad durchgeführt (siehe Abbildung 52). Die Formen wurden fast vollständig aufgefüllt und mit einer MDF-Platte, wie mit einem Deckel, geschlossen.

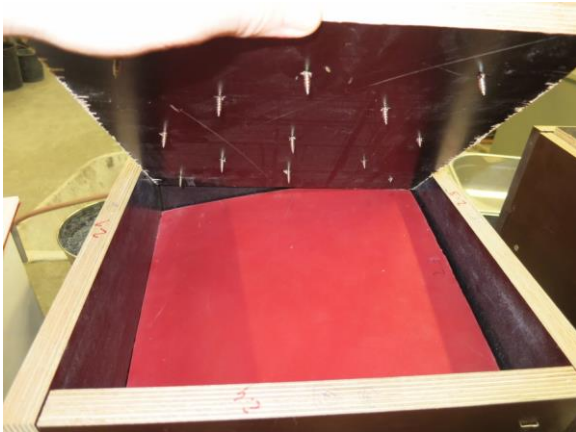


Abbildung 82 Pixeltisch mit Elastomer und MDF-Platte als Deckel



Abbildung 83 Gießvorgang mit Rezeptur III

Abbildung 81 zeigt die MDF-Platte mit durchgeschraubten Holzschrauben, um ein Verankern der Platte im Wachsbeeton zu gewährleisten. Bei beiden Formen wurde kein Trennmittel (Silikon) auf die Holzschalung oder auf die Elastomermatte aufgetragen.

Beim Abgießen der Pixeltischform mit der Rezeptur III wurde die Elastomermatte im Ofen auf 80°C erwärmt um bessere Oberflächenergebnisse zu erreichen. Beim Abgießen der Pixeltischform mit der Rezeptur I blieb die Elastomermatte auf 22°C Raumtemperatur. Nach 14 Stunden wurden beide Pixeltischformen ausgeformt.

3.6.2 Ergebnisse

3.6.2.1 Handling



Abbildung 84 Ausschalen Rezeptur I



Abbildung 85 Pixelglättung Elastomermatte

In Abbildung 84 (Rezeptur I) ist die Glättfunktion der Elastomermatte gut ersichtlich. Es sind leichte Anpassungen an die scharfen Kanten der Holzpixel ersichtlich, aber weitere, starke Verformungen sind nicht zu erkennen.

Ein Haften des Wachsbetons an der MDF-Randabschalung konnte nicht beobachtet werden, und das Ausformen konnte mit nur einer geöffneten Seitenschalung, wie in Abbildung 84 ersichtlich, erfolgen. Zwischen Wachsбетон und Elastomermatte konnte ein Haften festgestellt werden, jedoch konnte die Elastomermatte mit geringem Kraftaufwand abgezogen werden. Dieses Haften ist auf Verunreinigungen der Elastomermatte zurückzuführen, da auf derselben Matte Sand-Kunstharzmischungen abgeformt wurden. Hier blieben leichte Harzrückstände auf der Elastomermatte, welche die Rauigkeit der Elastomeroberfläche erhöhten.

3.6.2.2 Oberflächenqualität

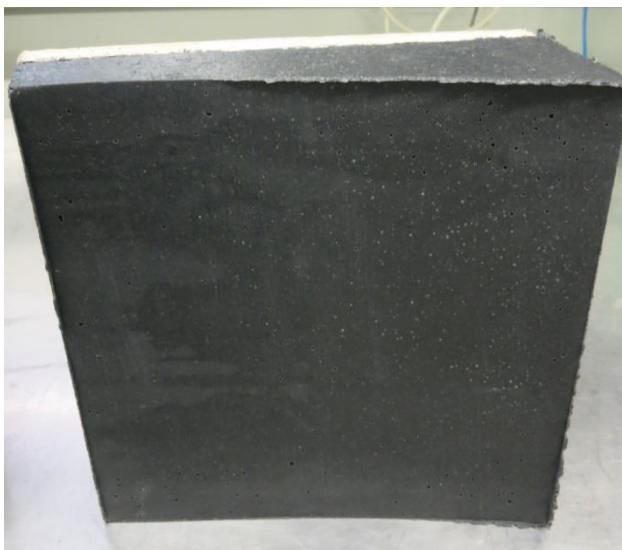


Abbildung 86 Wachsбетон schalung Rezeptur III



Abbildung 87 Wachsбетон schalung Rezeptur I

Schalungsform Rezeptur I:

Die Oberfläche der Rezeptur I wies eine schuppige, raue Oberflächenqualität auf (siehe Abbildung 88). In Abbildung 87 ist zu erkennen, dass die Oberflächenqualität von innen nach außen stark abnimmt, was die Ursache im zentralen Eingießen des Wachsбетons hat. Die Hauptursache für diese schlechte Oberflächenqualität ist in der nicht vorgewärmten Elastomermatte zu finden. Aufgrund der relativ kühlen Matte kommt es zu einem schnellen Abkühlen des Wachsбетons und somit zu keiner vollständigen Glättung der Oberfläche.

Schalungsform Rezeptur III:

Bei Rezeptur III wurde die Elastomermatte auf 80°C vorgewärmt, dies führte zu einem eindeutig besseren Ergebnis. Beim Abguss dieser Mischung fand man eine sehr glatte Oberfläche vor, welche jedoch verstärkt in den Randbereiche Luftporen aufwies (siehe Abbildung 89). Bei dem ersten Abgussversuch mit reinem Wachs (siehe Kapitel 3.4.4) sind keine Luftporen aufgetreten.

Daraus lässt sich schließen, dass die zu geringe Entlüftung des Wachsbetons auf die Kornzusammensetzung und den Feinanteil verbunden mit dem Wachs zurückzuführen ist. Der Feinanteil wirkt viskositätserhöhend auf die Mischung und dieser Umstand wirkt sich auf die Entlüftung negativ aus.



Abbildung 88 Oberflächenqualität (40*40mm) Rezeptur I



Abbildung 89 Oberflächenqualität (40*40mm) Rezeptur III.

3.6.2.3 Geometrieabweichungen Pixeltischform zu Wachsbetonschalung

Wie schon in Kapitel 3.4.5 beschrieben, wurden auch bei dem Versuch mit Wachs als Bindemittel die Pixeltischoberfläche mit eingelegter Elastomermatte und die fertige Wachsbetonschalung gescannt. Mit dem Vergleich dieser beiden Oberflächenmessungen konnte erhärtungsbedingtes Schwinden des Wachsbetons bestimmt werden.

Abbildung 90 stellt die Abweichungen der zwei übereinander gelegten Flächen farbcodiert dar. Die angegebenen Abweichungen sind Normalabstände zur Fläche. Grundsätzlich muss man bei der Bewertung dieses Messergebnisses zwischen Randbereich und innerem Bereich unterscheiden.

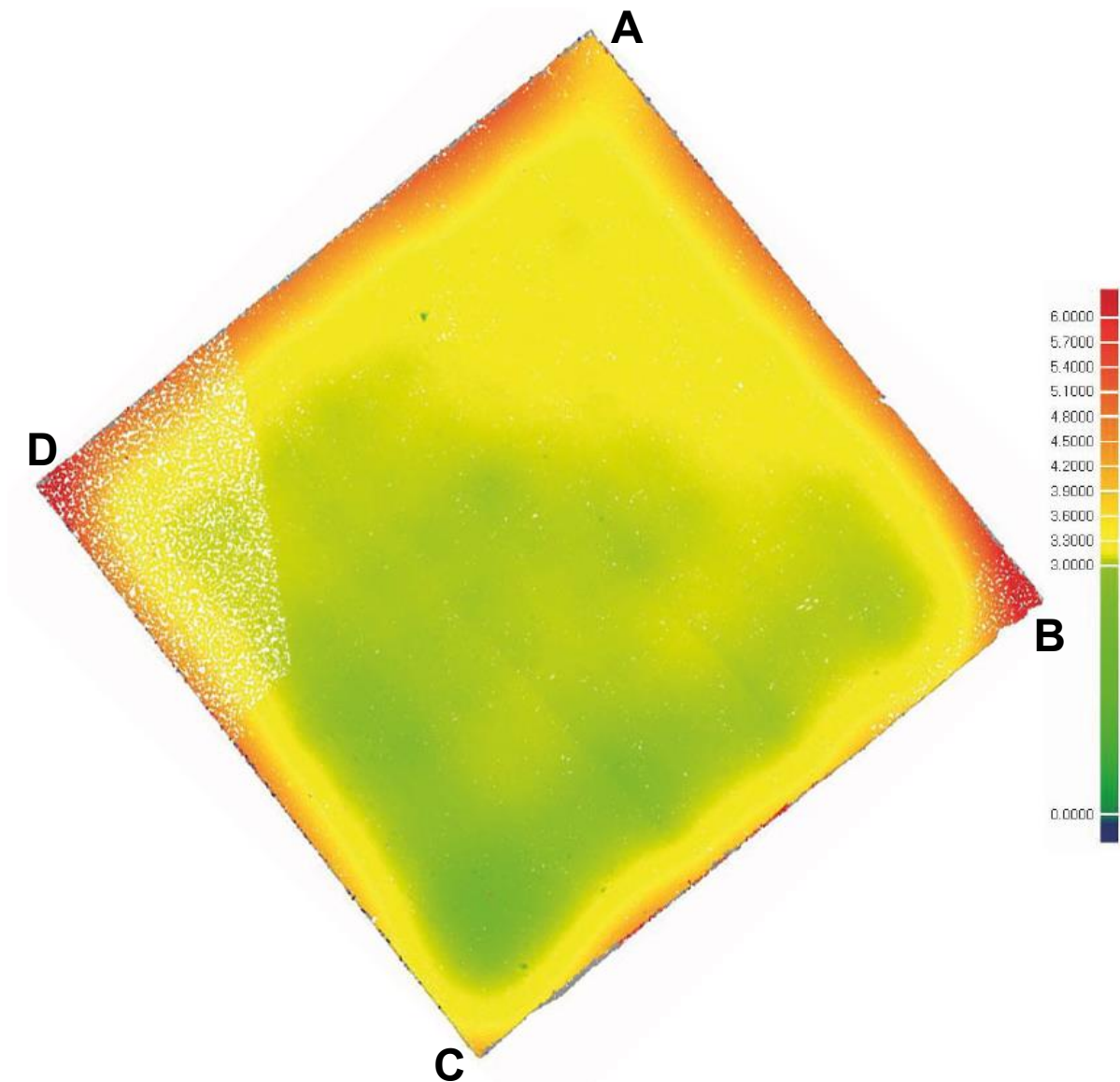


Abbildung 90 Messung Geometrieabweichung (Normalabstand) Wachsбетon (Skala in mm)

Durch das lose Auflegen der Elastomermatte hebt sich die Matte in der äußersten Pixelreihe abhängig von der Krümmung von der Pixeloberfläche ab. Beim Abgießen drückt das Eigengewicht des Wachsбетon die Elastomermatte auf die Pixeloberfläche. Dies führt zu den starken Geometrieabweichungen im Randbereich. Bei den Eckbereichen ist dieser Effekt am stärksten zu erkennen (bis zu 6mm Abweichung). Dieser Effekt ist auch im Randbereich (A) bis (D) und (A) bis (B) zu beobachten, obwohl in diesen Bereichen die geringsten Wachsüberdeckungen vorzufinden sind.

Sehr gute Ergebnisse zeigt der innere Bereich: Hier traten nur minimale Abweichungen von maximal 0,5mm auf. Die größte Überdeckung mit Wachsбетon ist im Eckbereich (C) und die minimalste im Eckbereich (A) gegeben. Bei höherer Überdeckung sollte sich die Elastomermatte mehr stauchen als bei geringer Überdeckung. Starke Abweichungen im Bereich (C), wie bei den Messungen in Abbildung 48, blieben hier aus. Offensichtlich verhinderte das Korngefüge das Abziehen von noch nicht ausgehärtetem Wachsбетon in

diesem Bereich. Eine unvollständige Glättung der Pixelstruktur war hier optisch und messtechnisch nicht festzustellen. Die Messergebnisse zeigen auch, dass ein sehr geringes und gleichmäßiges Schwinden des Wachsbetonkörpers auftrat. Die Ergebnisse mit Wachsbeton zeigen ein eindeutig besseres Verhalten gegenüber den Messungen mit Wachs als Formstoff (siehe Abbildung 49). Die geringen Abweichungen im Randbereich bei den Messungen mit Wachs sind auf die Silikonverfugung der Elastomermatte zurückzuführen (siehe Abbildung 43).

3.7 Betonierversuch mit UHPC⁸

Vor dem Zusammenbau der beiden Wachsbetonschalungen für den Betonierversuch wurden Trennmittel aufgetragen. Folgende Trennmittel kamen zum Einsatz:

- **Wachsartiges Schalungstrennmittel (Rheofinish 323 P der Firma BASF)**
- **Bodenwachs (Büffelglanz Hartwachs)**

Ein Drittel der Wachsbetonoberfläche der Rezeptur III wurde mit Bodenwachs, ein weiteres Drittel mit Rheofinish (Wachstrennmittel) bestrichen und ein Drittel wurde unbehandelt belassen. Ein Drittel der Wachsbetonoberfläche der Rezeptur I wurde mit Bodenwachs bestrichen, der Rest blieb unbehandelt.

Nach dem Auftragen der Trennmittel wurden beide Wachsbetonschalungen in vertikaler Position zusammengebaut und mit UHPC ausgossen. Der Abstand der beiden Wachs Schalungen wurde auf 5cm festgelegt (Wandstärke im Projekt UHPC-Schale), sodass zweifach gekrümmte UHPC-Elemente mit etwa 30*30*5cm entstehen (siehe Abbildung 91).

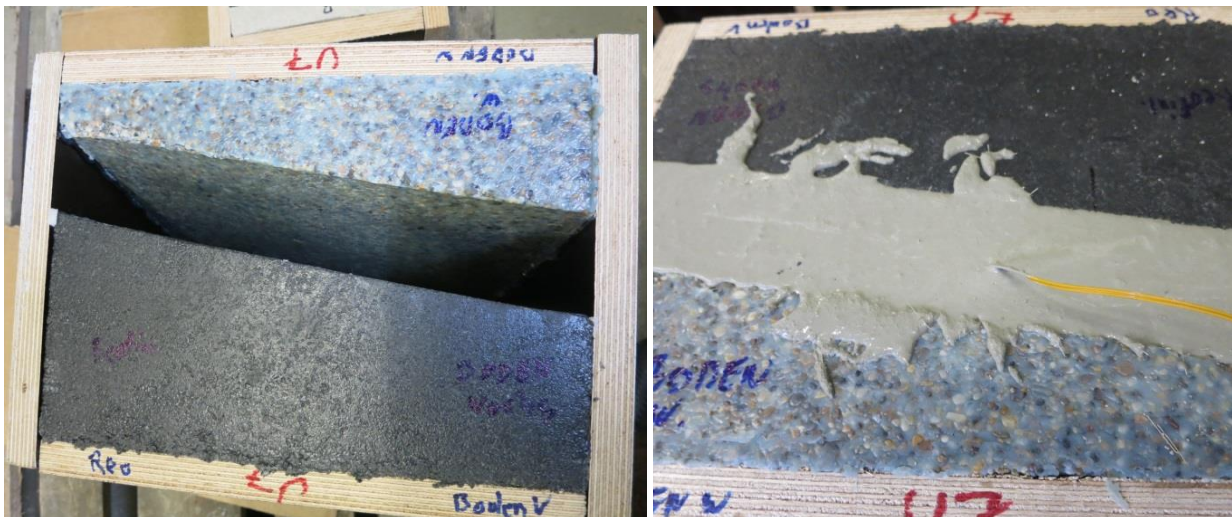


Abbildung 91 Fertige Schalung

⁸ Protokoll des gesamten Betonierversuches (Rezeptur UHPC) befindet sich im Anhang.

Zusätzlich wurde eine Temperaturmessung mit einem PT 100 Sensor über die gesamte Abbindedauer des Betons durchgeführt. Diese Messung war notwendig, da der Tropfpunkt des verwendeten Wachses zwischen 68 und 72°C liegt und die Eigenschaften des Wachses, wie Festigkeit und Formstabilität, mit steigender Temperatur schnell abnehmen.

Wie aus den Druckprüfungen in den Vorversuchen mit Wachsбетон ersichtlich (siehe Kapitel 3.5.5), sollte eine Temperatur der Form von 50°C nicht überschritten werden. Der Temperatursensor wurde mittig in der Schalung platziert. Die Messungen ergaben einen Spitzenwert von 29°C Kerntemperatur. Diese Temperatur stellt in keiner Hinsicht für die Wachsбетон Schalung ein Problem dar.

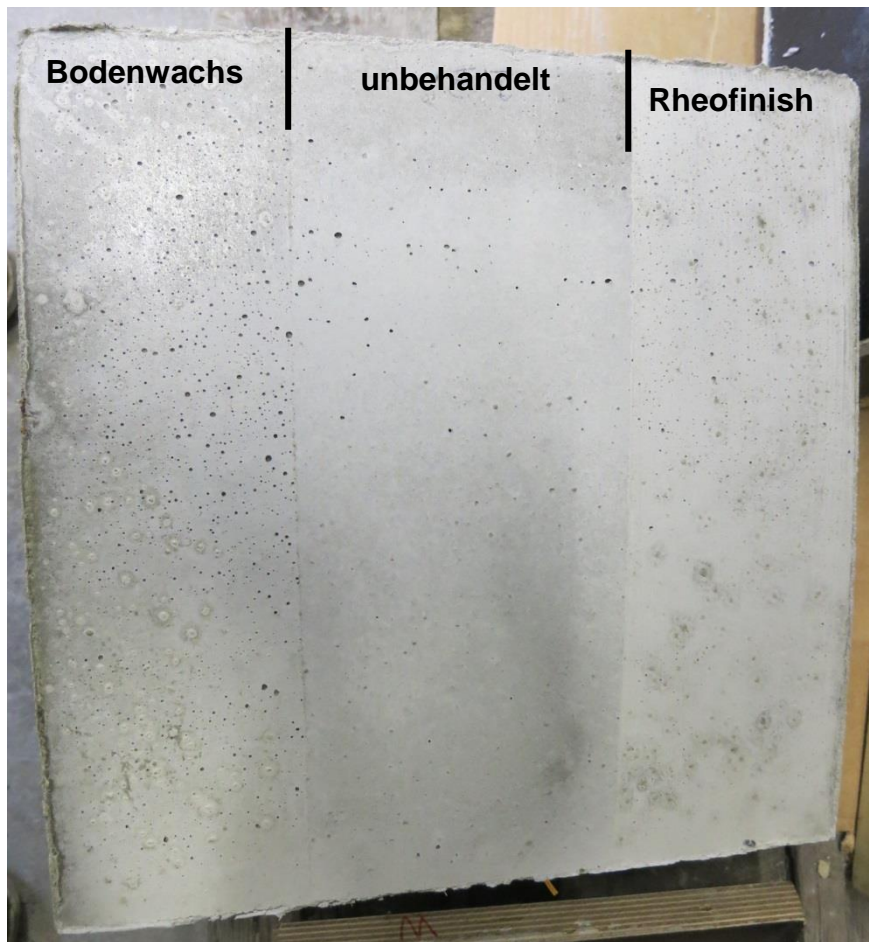


Abbildung 92 Betonoberfläche Schalungsseite der Rezeptur III

In Abbildung 92 ist die Betonoberfläche der Wachsбетонrezeptur III mit den mit drei Trennmitteln behandelten Abschnitten zu erkennen.

In Bezug auf Luftporeneinschlüsse schneidet eindeutig die unbehandelte Oberfläche am besten ab, gefolgt von Rheofinish. Der mit Bodenwachs behandelte Bereich wies mit Abstand die meisten Luftporeneinschlüsse auf. Im unteren Bereich konnten bei der unbehandelten Oberfläche leichte Abweichungen von der Farbgleichheit erkannt werden. Bei Rheofinish war dies nicht der Fall. Bei den behandelten Oberflächen mit Bodenwachs und Rheofinish sind Betonrippen mit dunkler Umrandung zu erkennen. Dies sind die mit UHPC

ausgefüllten oberflächlichen Luftporenlunker des Wachsbetons. Die dunklen Ringe entstehen durch einen Überschuss an Trennmittel, der beim Betonieren durch das Austreten des Trennmittels aus den Luftporen der Wachsbetonschalung entsteht. Beim optischen Prüfen mit dem freien Auge oder durch manuelles Abtasten konnte keine Pixelstruktur nachgewiesen werden.

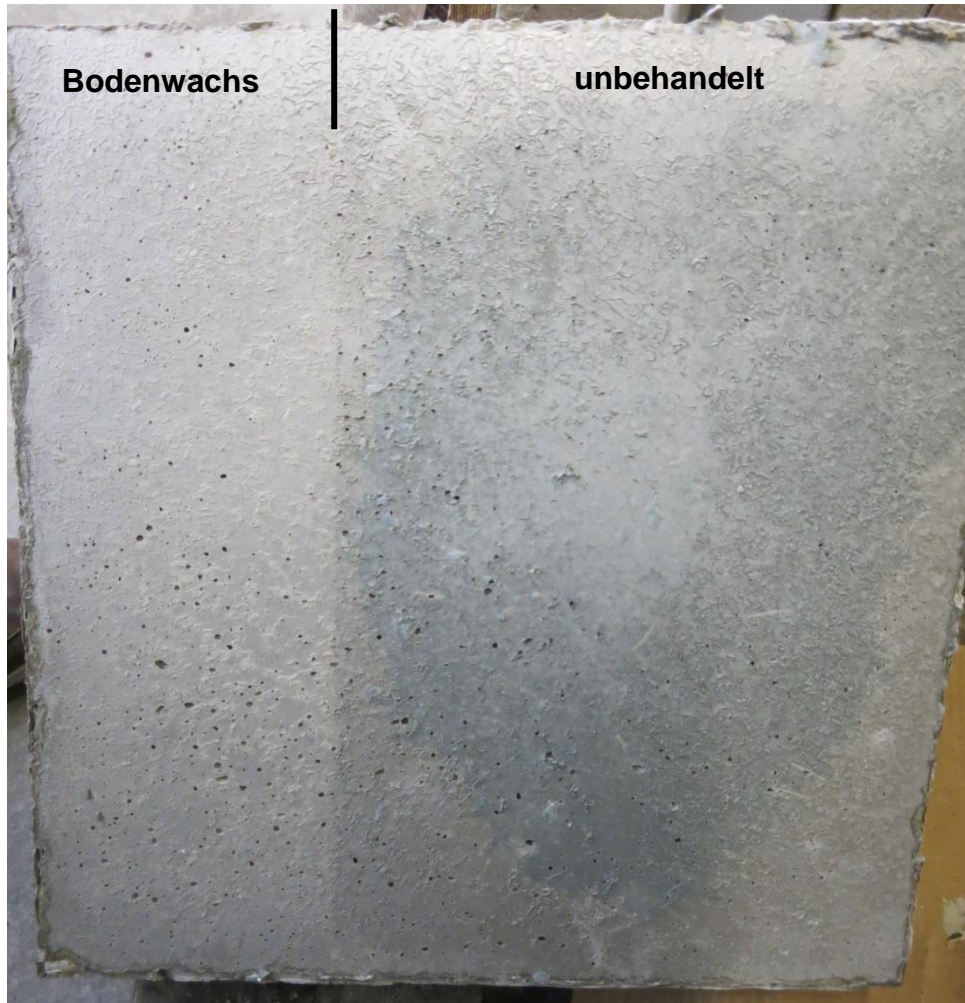


Abbildung 93 Betonoberfläche der Schalungsseite Rezeptur I.

Abbildung 93 zeigt die ausgeschalte Betonoberfläche der Rezeptur I. Der linke Teil der Schalungsoberfläche wurde mit Bodenwachs behandelt. Über die gesamte Fläche verteilt waren einige Luftporen zu erkennen, wobei die größte Konzentration von Poren im Bereich der mit Bodenwachs behandelten Fläche zu erkennen war. Weiters konnte eine stark aufgeraute Oberfläche in allen Bereichen festgestellt werden, dies ist auf die raue Wachsbetonschalung zurückzuführen. Der unbehandelte Bereich wies einen großen bläulichen Fleck auf und es waren auch Wachsreste auf der Betonschale zu finden. Diese bläuliche Einfärbung stammt mit hoher Sicherheit vom Wachs. Diese Färbung kann möglicherweise auf eine Reaktion mit dem UHPC zurückgeführt werden. Ein Schmelzen des Wachses kann ausgeschlossen werden, da die Temperaturmessung während der 24

Stunden Aushärtezeit einen Maximalwert von 29°C ergab. In dem mit Bodenwachs behandelten Bereich der Rezeptur I sowie auch auf der ganzen Schalungsfläche der Rezeptur III konnte dieses Phänomen nicht beobachtet werden. Das aufgetragene Bodenwachs als Trennmittel verhinderte eine Reaktion des Wachsbetons mit dem UHPC bei der Rezeptur I. Es ist gut möglich, dass dieser Effekt auch bei reinem Wachs auftreten könnte. Hier besteht unbedingt Aufklärungsbedarf.

4 Erkenntnisse und Schlussfolgerung

In diesem Kapitel werden die recherchierten und geprüften Materialien hinsichtlich der geforderten Kriterien miteinander verglichen. Die Hauptanforderungen an den gesuchten Füllstoff sind:

- Geringe geometrische Abweichungen der Form von der eingestellten Pixeltischgeometrie (Schwinden)
- Keine unerwünschte Wechselwirkung mit dem UHPC (Qualität der Betonoberfläche)
- Gute Verarbeitbarkeit und Wechselwirkung des Füllstoffes mit dem Pixeltisch
- Hohe Wiederverwendbarkeit

	Asphalt	Wachs	Wachsbeton
Schwinden	+	-	+
Oberflächenqualität (Schalung)	+	+	+-
Luftporeneinschlüsse (Lunker) Schalung	+-	+	+-
Verarbeitungstemperatur[°C]	ca. 200°C	ca.70°C	ca.80°C
Rohdichte [kg/m ³]	ca. 2400	ca. 1000	ca. 2000
Trennmittel notwendig	Ja	K.A	Ja/Nein

Tabelle 14 Übersicht Formstoffe

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht, bei der die geprüften Formstoffe bestimmten Eigenschaften gegenübergestellt sind. Gussasphalt weist das geringste Schwindverhalten aller geprüften Stoffe auf. Durch sein selbstverdichtendes Verhalten und das gut abgestimmte Korngerüst mit einem Optimum an Bindemittelgehalt entsteht eine minimale Volumenkontraktion beim Erstarren des Gussasphalts. Der Nachteil ist die hohe Gussasphalttemperatur (bis 260°C), die zu Materialschäden am Pixeltisch führen kann. Zusätzlich führen die hohen Temperaturen bei der Verarbeitung von Gussasphalt zu hohen Energiekosten bei der Wiederverwendung des Formstoffs. Der geplante Pixeltisch wird mit Kunststoffpixeln ausgestattet, diese erlauben nicht den Einsatz von Gussasphalt. Es müssten andere temperaturbeständigere Materialien wie Aluminium für den Bau des Pixeltisches zum Einsatz kommen, damit Gussasphalt als Formstoff einsetzbar wird. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, ist eine Trennschicht zwischen Gussasphalt und UHPC notwendig, um ein Abfärben des Bitumens zu vermeiden. Es wurde jedoch gezeigt, dass es auch möglich ist, eine ebene Gussasphaltplatte durch Erwärmung auf 75°C an die Pixeltischgeometrie anzupassen. Genauere Aussagen können hier aufgrund fehlender Messungen nicht gemacht werden.

Wachse können schon bei 70°C oder wenn nötig bei 100°C abgegossen werden. Die niedrigere Verarbeitungstemperatur reduziert im Vergleich zum Gussasphalt die

Energiekosten für die Wiedererwärmung enorm. Dieser Effekt wird durch die niedere Dichte von Wachs (ca. 1kg/dm^3) gegenüber Gussasphalt (bis $2,4\text{kg/dm}^3$) verstärkt. Der höhere Verformungswiderstand von Gussasphalt ist für die vorhandenen Betondrücke nicht erforderlich.

Bei den in Kapitel 3.4.5 und Kapitel 3.6.2.3 beschriebenen Messungen wurden die Geometrieabweichungen zwischen Pixeltischform mit eingelegter Elastomermatte zu Wachs- bzw. Wachsбетonform bestimmt. Hier zeigt die Wachsбетonform ein eindeutig besseres Verhalten als die Wachsform. Bei der Wachsбетonform konnten die Deformationen stark reduziert werden, was zu einer homogenen Fläche mit geringen Abweichungen zur Pixeltischfläche führte.

In Kapitel 3.5 „Wachsбетon“ konnte gezeigt werden, dass durch Variation der Gesteinskörnungen und Wachsanteile das Schwinden beeinflusst werden kann. Das geringste Schwindmaß und die besten Festigkeitswerte ergab die Rezeptur IV. Aus den Vorversuchen mit Wachsбетon wurde ersichtlich, dass sich durch die Adjustierung der Abgusstechnik, wie z.B. das Vorwärmen der Form, ein viel stärkerer Einfluss auf das Schwinden des Wachsбетons ergibt als durch die Mischungszusammensetzung. Bei den in Kapitel 3.4.5 und Kapitel 3.6.2.3 durchgeführten Messungen wurden die Geometrieabweichungen zwischen Pixeltischform mit eingelegter Elastomermatte zu Wachs- bzw. Wachsбетonform bestimmt. Hier zeigt die Wachsбетonform ein eindeutig besseres Verhalten als die Wachsform. Bei der Wachsбетonform konnten die Deformationen stark reduziert werden, was zu einer homogenen Fläche mit geringen Abweichungen zur Pixeltischfläche führte.

Zur Betonoberfläche bei Wachsбетon kann gesagt werden, dass die besten Ergebnisse ohne Trennmittel erreicht wurden. Wie in Abbildung 86 ersichtlich, sind aber auch bei der unbehandelten Wachsбетonoberfläche Lufteinschlüsse vorhanden. Bei der Betonoberfläche der Wachsбетonrezeptur I, wie in Abbildung 87 ersichtlich, wurde ein Abfärben des Wachses beobachtet. Warum dies bei der Wachsбетonrezeptur III nicht auftrat, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden. Es sollte überprüft werden, ob dieses Abfärben auch bei Schalungen mit reinem Wachs auftritt.

Für optimale Ergebnisse mit Wachsбетon am Pixeltisch sollten folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Vorwärmen der Elastomermatte auf Wachsбетontemperatur
- Rahmenschalung des Pixeltisches sollte isoliert oder wenn möglich beheizbar sein
- Zu hoher Feinanteil in der Wachsбетonmischung sollte vermieden werden, um eine gute Entlüftung zu gewährleisten
- Die Temperaturerhöhung beim Abbinden des Betons sollte so niedrig wie möglich gehalten werden

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung dieser Arbeit war es, im Rahmen des Forschungsprojektes „UHPC Schalen“ (FFG Bridge Nr.836524) ein geeignetes Schalungsmaterial zu finden, um Betonschalen mit Freiformgeometrie herzustellen.

Das Forschungsprojekt „UHPC-Schale“ arbeitet an einem Gesamtkonzept für die Herstellung von UHPC-Schalentragwerken aus Fertigteilen. Das Schalentragwerk ist bei der Planung und Herstellung in mehrere Teile (Schalenelemente) unterteilt. Diese einzelnen Schalenelemente werden in einem Fertigteilwerk gefertigt. Für die Erzeugung der Schalungen für die UHPC-Segmente ist ein variabel einstellbarer Pixeltisch vorgesehen. Am Pixeltisch werden die geometrischen Flächen mittels Roboter, der mit den Daten der CAD-Planung gespeist wurde, eingestellt und mit einem geeigneten Formstoff (Schalungsmaterial) abgeformt. Nach der Fertigung von zwei Schalungselementen (Negativ und Positiv) kann ein UHPC-Schalensegment in vertikaler Position betoniert werden. Da jedes UHPC-Schalenelement von seiner geometrischen Form her einzigartig ist, sollte der Formstoff (Schalungsmaterial) erneut verwendet werden können, um weitere Schalungen am Pixeltisch herstellen zu können. Die UHPC-Schalenelemente werden am Rand zugeschnitten, an den Kontaktflächen auf 1/10mm genau gefräst und mittels Trockenfugen mit speziellen Verbindungsmitteln zu einer großen tragfähigen Schale zusammengefügt.

Nach der Recherche von möglichen Materialien stellte sich als vielversprechend heraus:

- Bitumen
- Asphalt
- Wachs
- Wachs als Bindemittel (Wachsbeton)

Mit den obig aufgezählten Materialien wurden zunächst verschiedene Versuche, wie auch ein Betonversuch mit UHPC, durchgeführt.

Mit dem Material Bitumen wurden zunächst Versuche mit Polymerbitumen durchgeführt. Dieses Material erwies sich aber als nicht geeignet für den betrachteten Einsatzbereich und deshalb wurde Bitumen für Gussasphalt weiter verfolgt.

Da sich zur Zeit der Erstellung dieser Diplomarbeit der oben erwähnte Pixeltisch noch in der Fertigung befand, kam im Rahmen dieser Arbeit ein Prototyp aus Eichenholzpixeln zum Einsatz. Mit diesem Tisch konnten aussagekräftige Versuche mit den unterschiedlichen Materialien durchgeführt werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt dieser Diplomarbeit war die Glättung der Pixelstruktur der eingestellten Flächen. Hier wurde für jedes Schalungsmaterial eine eigene Pixelglättungsvariante erprobt.

Die ersten Versuche am Pixeltischprototypen wurden mit Gussasphalt durchgeführt. Als Trennlage zwischen Pixeltisch und Gussasphalt wurde eine 2mm starke Kunstharzfolie eingelegt. Diese Folie verschmolz an der Oberfläche mit dem Gussasphalt. Diese Kunstharzfolie findet auch breite Anwendung im Asphaltbau als Dichtschicht. Gussasphalt wurde wegen den selbstverdichtenden Eigenschaften eingesetzt, um eine zusätzliche Verdichtung am Pixeltisch zu vermeiden. Die Pixeltischoberfläche konnte nicht zur Gänze geglättet werden und in manchen Bereichen war eine eindeutige Beulenbildung zu erkennen, was auf die hohen Gussasphalttemperaturen zurückzuführen ist (260°C). Bei einem weiteren Versuch wurde eine ausgehärtete Platte Gussasphalt durch Erwärmung an den Pixeltisch angepasst. Dieses Andrücken konnte bei einer Gussasphalttemperatur von 75°C erfolgen. Es war jedoch möglich, diese dünne Platte (5 cm) bereits bei Raumtemperatur mit größerem Kraftaufwand manuell in ihre ursprüngliche Lage zurückzuformen. Dies könnte zu Verformungen durch die auftretenden Betonierdrucke führen.

Ein weiteres Füllstoffmaterial, das untersucht wurde, war Wachs. Hier kam ein spezielles Feingusswachs der Firma Romotan aus Deutschland zum Einsatz. Dieses Wachs hat einen Tropfpunkt zwischen 68-72 °C und weist ein sehr geringes Schwindverhalten beim Erstarren auf. Hier waren keine genauen Herstellerangaben des Schwindverhaltens vorhanden. Dieses Feingusswachs war mit 30% Polystyrolpulver versetzt. Da das Schwinden nie ganz ausgeschlossen werden kann, wurden der Pixeltisch und der fertig abgegossene Wachsteil mit einem Laserscanner vermessen und verglichen. Die Pixelglättung wurde hier mit einer eingelegten 10mm starken Elastomermatte gewährleistet. Dieses Elastomer wies eine geringe Shore-Härte (40) auf, um sich an die Freiformflächen anpassen zu können. Bei den Vergleichsmessungen ergaben sich maximale Abweichungen von 1,2mm in Dickenrichtung. Es war eindeutig zu erkennen, dass beim Abkühlen des Wachses Deformationen durch das ungleiche Schwinden entstanden.

Um dem ungleichen Schwinden entgegen zu wirken, wurde Wachs als Bindemittel eines Korngefüges eingesetzt. Ähnlich wie beim Gussasphalt sollte diese Wachsbetonmischung (Wachs + Gestein) selbstverdichtend sein und beim Erstarrungsprozess das Schwinden des Wachses verhindern. Hier wurden zuerst Vorversuche in kleineren Stahlprismenformen durchgeführt. Es wurden Mischungen mit folgenden Gesteinen erprobt:

- Kornklasse RK 1/4 (aus Bad Fischau)
- Produkt „H32“ (Quarzwerke Österreich)
- Kornklasse KK 2/4, Kornklasse KK 0/2, Füller (Basalt aus Klöch)

Der benötigte Wachsanteil wurde entweder mit Hohlraumberechnungen des Korngefüges oder durch einen iterativen Prozess bestimmt. Bei den Vorversuchen wurde zwischen vorgewärmten und nicht vorgewärmten Prismenformen unterschieden. Die Wachsbetonmischungen wurden nach dem Ausformen mit einem Messschieber vermessen,

um das Schwindverhalten der unterschiedlichen Mischungen feststellen zu können. Alle Wachsbeconproben wurden einer Biegezug- und Druckprüfung unterzogen, um Festigkeitsunterschiede der Mischungen zu bestimmen. Da die Eigenschaften von Wachs stark temperaturabhängig sind, wurden gewisse Wachsproben vor der Druckprüfung auf 50°C vorgewärmt. Die einzelnen Messergebnisse sind im Kapitel 3.5.5 dokumentiert.

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Vorversuchen wurden zwei Wachsbeconmischungen gewählt (Rezeptur I und III). Mit diesen Mischungen wurden weiterführende Versuche am Pixeltischprototypen durchgeführt. An den zwei Pixeltischen wurde je eine Form (Negativ und Positiv) aus Wachsbecon abgegossen. Bei Wachsbeconmischung 2, siehe Abbildung 85, wurde die Elastomermatte auf 80°C vorgewärmt. Bei Rezeptur I blieb die Elastomermattentemperatur auf 22°C. Das Aufwärmen führte zu einer sehr glatten Wachsbeconoberfläche mit vereinzelt Luft einschließen. Bei Rezeptur I ergab sich eine sehr raue, nicht homogene Oberfläche, was mit Sicherheit auf die nicht vorgewärmte Elastomermatte zurückzuführen ist. Hier wurden, wie schon bei dem ersten Wachsabguss in Kapitel 3.4.5, die Form und die Wachsbeconschalung vermessen und verglichen. Die Geometrieabweichungen waren bei der Wachsbeconmischung um einiges geringer und homogener als mit der Form aus Wachs.

Mit diesen zwei Wachsbeconelementen konnte eine Schalung zusammengestellt und mit UHPC abgegossen werden. Bei diesem Betonversuch wurden zwei Trennmittel (Rheofinish 323P der Fa. BASF und Bodenwachs) auf eine der zwei Wachsbeconschalungen aufgetragen. Da das eingesetzte Wachs nur für einen bestimmten Temperaturbereich einsatzfähig ist, wurde ein Temperaturfühler (PT100) mit einbetoniert, der über einen Zeitraum von 24 Stunden den Temperaturverlauf aufzeichnete. Dies war nötig, da beim Abbinden des Betons je nach Randbedingung Temperaturen bis 60°C auftreten können. Die Temperaturmessung ergab über 24 Stunden einen Maximalwert von 29°C. Bei diesen niedrigen Temperaturen ist der Einsatz von Romocast 305 Wachs problemlos möglich.

Es konnte nur ein geringes Haftverhalten zwischen UHPC und Wachsbeconschalung beobachtet werden. Die besten Ergebnisse der Betonoberflächenqualität wurden mit der Wachsbeconschalung der Rezeptur III (siehe Abbildung 89) ohne Trennmittel erzielt. Jedoch traten auch hier in mehreren Bereichen Luftporen auf. Mit der sehr rauen, inhomogenen Wachsbeconschalung der Rezeptur I wurden sehr schlechte Ergebnisse, bezogen auf die Oberflächenrauheit und Luftporeneinschlüsse, erzielt. Hier konnte auch ein Abfärben des Wachses auf die UHPC-Schale beobachtet werden. Dieser Effekt trat nur im unbehandelten Bereich auf, siehe Abbildung 93.

Grundsätzlich muss gesagt werden, dass noch einige Bereiche zum Themengebiet Wachsbecon als Formstoff, wie etwa die Wechselwirkung zwischen Wachs und UHPC, aber auch die Mischungszusammensetzung der Wachsbetone, weiter erforscht werden müssen. Des Weiteren sollten Versuche mit unterschiedlichen Wachsen durchgeführt werden, da hier

noch eine Vielzahl von Wachsen mit unterschiedlichen Eigenschaften im Handel zu Verfügung stehen. Die durchgeführten Versuche haben jedoch gezeigt, dass Wachs wie auch Wachsbeton für den Einsatz bei der Herstellung von Schalungen prinzipiell geeignet sind.

6 Anhang

LABORPROTOKOLL

Bestimmung der Korngrößenverteilung

Auftraggeber: Johannes Mitteregger

Auftrags-Nr: _____

Bezeichnung: Basalt 0/2 gewaschen

Proben-Nr: _____

Trockenschrank: _____

Waage: _____

Siebsatz: _____

Siebmaschine: _____

Sieböffnung	Siebung				Auswertung			
	SL ₁ Rückstand		SL ₂ Rückstand		Spannweite		Mittlerer Rückstand	Mittlerer Durchgang
	g	%	g	%	%		%	%
M _S Gesamter Siebsatz leer [g]	9301,2		9313,3					
M _{SP} Ges. Siebsatz+Probe nach Trocknung [g]	9777,2		9800,9					
Einwaage M ₁ [g]	476		487,6					
90								
63								
45								
31,5								
22,4								
16								
11,2								
8								
4								100,0
2	55,1	11,58	56,6	11,61	0,03	ok	11,59	88,4
1	210,2	44,16	206,3	42,31	1,85	ok	43,23	45,2
0,5	116,9	24,56	117,0	24,00	0,56	ok	24,28	20,9
0,25	42,8	8,99	56,6	11,61	2,62	Fehler	10,30	10,6
0,125	19,8	4,16	23,3	4,78	0,62	ok	4,47	6,1
0,063	7,4	1,55	6,1	1,25	0,30	ok	1,40	4,7
0	8,0	1,68	8,4	1,72	0,04	ok	1,70	3,0
Auswaage ΣRi+P	460,2	96,68	474,3	97,27				
Überprüfung-Ergebnisse	Wiederholung		Wiederholung					

Anmerkungen:

LABORPROTOKOLL

Bestimmung der Korngrößenverteilung

Auftraggeber: Johannes Mitteregger Auftrags-Nr: _____

Bezeichnung: Basalt 2/4 gewaschen Proben-Nr: _____

Trockenschrank: _____ Waage: _____

Siebsatz: _____ Siebmaschine: _____

Sieböffnung	Siebung				Auswertung			
	SL ₁ Rückstand		SL ₂ Rückstand		Spannweite		Mittlerer Rückstand	Mittlerer Durchgang
	g	%	g	%	%		%	%
M _S Gesamter Siebsatz leer [g]	12642,2		1264,4					
M _{SP} Ges. Siebsatz+Probe nach Trocknung [g]	13060,3		13106,3					
Einwaage M ₁ [g]	418,1		562,3					
90								
63								
45								
31,5								
22,4								
16								
11,2								
8	0,0		0,0					100,0
4	38,5	9,21	50,6	9,00	0,21	ok	9,10	90,9
2	355,8	85,10	472,0	83,94	1,16	ok	84,52	6,4
1	22,1	5,29	37,2	6,62	1,33	Fehler	5,95	0,4
0,5								
0,25								
0,125								
0,063								
0								
Auswaage $\Sigma Ri+P$	416,4	99,59	559,8	99,56				
Überprüfung-Ergebnisse	OK		Wiederholung					

LABORPROTOKOLL

Bestimmung der Korngrößenverteilung

Auftraggeber:

Auftrags-Nr:

Bezeichnung: 1/4 Bad Fischau 118 404/13 (gr. Lieferung B1&B2)

Proben-Nr:

Trockenschrank:

Waage:

Siebsatz:

Siebmaschine:

Sieböffnung	Siebung				Auswertung			
	B1		B2		Spannweite		Mittlerer Rückstand	Mittlerer Durchgang
	SL ₁ Rückstand g	%	SL ₂ Rückstand g	%	%		%	%
M _S Gesamter Siebsatz leer [g]								
M _{SP} Ges. Siebsatz+Probe nach Trocknung [g]	1622		1627					
Einwaage M ₁ [g]	1622		1627					
90								
63								
45								
31,5								
22,4								
16								
11,2								100,0
8	0,8	0,05	0,0				0,05	100,0
4	176,5	10,88	271,5	16,69	5,81	Fehler	13,78	86,2
2	963,5	59,40	1004,7	61,75	2,35	ok	60,58	25,6
1	403,3	24,86	296,7	18,24	6,63	Fehler	21,55	4,0
0,5	44,5	2,74	36,5	2,24	0,50	ok	2,49	1,5
0,25	5,7	0,35	3,2	0,20	0,15	ok	0,27	1,3
0,125	7,3	0,45	1,1	0,07	0,38	ok	0,26	1,0
0,063	1,3	0,08	1,3	0,08	0,00	ok	0,08	0,9
0	19,1	1,18	11,9	0,73	0,45	ok	0,95	0,0
Auswaage $\sum Ri+P$	1622,0	100,00	1626,9	99,99				
Überprüfung-Ergebnisse	OK		OK					

Anmerkungen:

LABORPROTOKOLL GESTEINSKÖRNUNGEN

Schüttdichte und Hohlraumgehalt gemäß PA NKM015

Auftraggeber: Mitteregger

Auftrags-Nr: _____

Bezeichnung: Bad Fischau 1/4

Proben-Nr: _____

Verwendungszweck: _____

Schüttdichte:

Größtkorn: 4 mm

Probe	Masse [g]		Volumen [cm ³]	Schüttdichte g/cm ³	
	m ₁	m ₂			
1	203,00	1.957,50	1063,13	1,650	MW:
2	159,20	563,60	249,87	1,618	1,634
3					

Prüfer: ReiDatum: 06.NovSpannweite a : 0,0zulässige Spannweite a_{zul} : 0,037Plausibilität: **Plausibilität gegeben****Hohlraumgehalt:**

Probe	Schüttdichte		Trockenrohdicht Mg/m ³	Hohlraumgehalt %	
	Mg/m ³				
1	1,65		2,73	39,560	MW:
2	1,62		2,73	40,733	40,147
3					

Anmerkungen:

LABORPROTOKOLL GESTEINSKÖRNUNGEN

Schüttdichte und Hohlraumgehalt gemäß PA NKM015

Auftraggeber: Hr. Mitteregge

Auftrags-Nr: _____

Bezeichnung: 2/4 Basalt

Proben-Nr: _____

Verwendungszweck: _____

Schüttdichte:

Größtkorn: 4 mm

Probe	Masse [g]		Volumen [cm ³]	Schüttdichte g/cm ³	
	m ₁	m ₂			
1	202,80	1.712,40	1063,13	1,420	MW:
2	159,00	520,60	249,87	1,447	1,434
3					

Prüfer: ReiDatum: 06.NovSpannweite a : 0,0zulässige Spannweite a_{zul} : 0,037Plausibilität: **Plausibilität gegeben****Hohlraumgehalt:**

Probe	Schüttdichte		Trockenrohdicht Mg/m ³	Hohlraumgehalt %	
	Mg/m ³				
1	1,42		2,923	51,420	MW:
2	1,45		2,923	50,496	50,958
3					

Anmerkungen:

LABORPROTOKOLL GESTEINSKÖRNUNGEN

Schüttdichte und Hohlraumgehalt gemäß PA NKM015

Auftraggeber: Hr. Mitteregge

Auftrags-Nr: _____

Bezeichnung: Quarzsand H32

Proben-Nr: _____

Verwendungszweck: _____

Schüttdichte:

Größtkorn: 0,5 mm

Probe	Masse [g]		Volumen [cm ³]	Schüttdichte g/cm ³	
	m ₁	m ₂			
1	203,00	1.816,10	1063,13	1,517	MW:
2	159,20	536,80	249,87	1,511	1,514
3					

Prüfer: ReiDatum: 06.Nov

Spannweite a: 0,0

zulässige Spannweite a_{zul}: 0,037Plausibilität: **Plausibilität gegeben****Hohlraumgehalt:**

Probe	Schüttdichte		Trockenrohdicht Mg/m ³	Hohlraumgehalt %	
	Mg/m ³				
1	1,517		2,65	42,755	MW:
2	1,511		2,65	42,989	42,872
3					

Anmerkungen:

LABORPROTOKOLL GESTEINSKÖRNUNGEN

Schüttdichte und Hohlraumgehalt gemäß PA NKM015

Auftraggeber: Hr. Mitteregger

Auftrags-Nr: _____

Bezeichnung: 0/4 Basalt

Proben-Nr: _____

Verwendungszweck: _____

Schüttdichte:

Größtkorn: 4 mm

Probe	Masse [g]		Volumen [cm ³]	Schüttdichte g/cm ³	
	m ₁	m ₂			
1	202,70	1.934,30	1063,13	1,629	MW:
2	159,10	564,80	249,87	1,624	1,626
3					

Prüfer: ReiDatum: 06.NovSpannweite a : 0,0zulässige Spannweite a_{zul} : 0,037Plausibilität: **Plausibilität gegeben****Hohlraumgehalt:**

Probe	Schüttdichte		Trockenrohdicht Mg/m ³	Hohlraumgehalt %	
	Mg/m ³				
1	1,63		2,923	44,270	MW:
2	1,62		2,923	44,441	44,355
3					

Anmerkungen:



ROMOCAST

ROMOCAST 300 Serie Feingusswachse – gefüllt -

Produktbeschreibung

Die ROMOCAST 300 Serie sind gefüllte Modellwachse für den Feinguss.

Eigenschaften

- mittelharte, elastische Wachse
- sehr geringe Schwindung beim Abkühlen
- sehr gute Abbildeigenschaften
- sehr niedriger Glührückstand

Mögliche Anwendungsgebiete

- Modellwachse

Lieferform

- Pastillen

Verpackung

- 25 kg – PE-Säcke
- 25 kg – PE-Säcke auf Paletten, mit PE-Folie umschumpft
- Big Bags auf Paletten

Produktspezifikation

Kennwert	ROMONTA Prüf- methode	Spezifikationsgrenzen				
		ROMOCAST 305	ROMOCAST 325	ROMOCAST 326	ROMOCAST 330	ROMOCAST 364
Tropfpunkt	W 1.3	67 – 72 °C	73 – 78 °C	73 – 78 °C	73 – 80 °C	70 – 76 °C
Glührückstand	W 6.1	max. 0.05 %	max. 0.05 %	max. 0.05 %	max. 0.05 %	max. 0.2 %
Nadelpenetration /25 °C	W 8.1	3 - 7 x 10 ⁻¹ mm	3 - 7 x 10 ⁻¹ mm	3 - 7 x 10 ⁻¹ mm	5 - 8 x 10 ⁻¹ mm	2 - 6 x 10 ⁻¹ mm
Viskosität / 100°C (mPas)	W 7.1.1	300 - 600	200 - 500	200 - 500	100 - 400	200 - 500

Dieses Informationsblatt wurde auf der Grundlage unseres derzeitigen Wissens und sorgfältiger Untersuchungen erstellt. Die Angaben dienen zur Beschreibung des Produktes. Änderungen behalten wir uns vor.

Eine Verbindlichkeit für die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten sowie für die Betrachtung möglicher Rechte Dritter können wir nicht übernehmen.

Ausgabe 01/2013

ROMONTA Bergwerks Holding AG
OT Amsdorf
Chausseestrasse 1
06317 Seegebiet Mansfelder Land
Deutschland
Tel. +49 34601 - 40154
www.romonta.de
marketing@romonta.de

SF-UHPC in Mini-Formen

Versuche vom 03.12.2014

Versuchsreihe: SF-UHPC in verschiedene Mini-Sandform Schalungen und eine Wachsschalung

Inhalt

1	Fragestellung und Ziele	1
2	Versuchsaufbau, verwendete Materialien und Versuchsablauf	1
3	Herstellung	6
3.1	anhand von Bildern	6
4	Ergebnisse der Frischbetonprüfung	7

1 Fragestellung und Ziele

Es soll das Befüllen von Guss-Formen - das sind „Mini-Freiform-Schalungen“, die am Pixeltischmodell abgeformt wurden - aus gebundenem Sand und aus Wachs mit SF-UHPC (UHPC mit Stahlfasern) untersucht werden. Es interessiert

1. Welche Oberflächenbehandlung der Formstoffe bzw. welche Trennmittel sind geeignet, um eine Sichtbeton-Oberflächenqualität des hergestellten UHPC Schalenelementes zu erreichen
2. Von welchen Parametern hängt es ab, eine gute Oberflächenqualität des UHPC in solchen Schalungen zu erreichen (weiterführende Bachelor Arbeit von Hr. Hofer)
3. Wie gelingt das Abgießen von UHPC mit einer Wachsbeton-Form (Variante U7, weiterführende Masterarbeit von Hr. Mitteregger)

2 Versuchsaufbau, verwendete Materialien und Versuchsablauf

SF-UHPC: 0312201- UHPC-Schale
Nanodur Mischg mit SF und Mikrosilika

Trennmittel:

1. Rheofinish 323P	U1, U2, U7
2. BASF Emulsion R 201	
3. Supercast 3100	U6
4. Anstrich aus Bindemittel mit 0,1% Katalysator	U3
5. Silikonspray,	U5
6. Trennspray (PTFE)	U5
7. Zemdren Classic & MD	U4
8. Trennmittel für Modellbau-Formsand	U2
9. Lack	U3
10. Bodenwachs	Nur bei Wachstform U7

SF-UHPC in Mini-Formen

Versuche vom 03.12.2014

Tabelle 1: verwendeter SF UHPC

Zielfestigkeit	≥ 150 MN/m ²	Baustelle:		LKI	
Verdichtung		Rezeptur:		0312201- UHPC-Schale	
Verdichtungsdauer					
Gesamtmenge	50.0 Liter				
Herstelldatum:					
Mischer	Zyklus Betonlabor				
Zielseitzfließmaß (mit faser)	≥ 800 mm				
Einsatzstoff		Gehalt [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³ /m ³]	Ansatz: 50.0 Ltr.	
1. Luftporengehalt in V%-Luftg.		0.00 %Vol. Bt	0.0		
2. Faser		1.50 %Vol. Bt			
Faser 1 (Stahlfaser L13-D0.2)	F1	1.50 %Vol. Bt	117.8	15.0	5.888 kg
Faser 2 (Carbonfaser L9-W1-T0.1)	F2	0.00 %Vol. Bt	0.0	0.0	0.000 kg
Summe Zuschlag		1.50 %Vol. Bt			
3. Matrix					
3.1. V Lcim / (V Lcim + V aggregate)		0.640			
3.2. Leim (Vol.%)		63.04 %Vol. Bt			
3.2.1. Pulver					
Nanodur Compound 5941 grau	NC	1171.25	1171.2	406.7	58.562 kg
Mikrosilika Elkem Grade 971 U	SF	5.00 % wt. NC	58.6	26.0	2.928 kg
Quarzmehl (Mikro-Dorsliit® 110)	QM	0.00 % wt. NC	0.0	0.0	0.000 kg
3.2.2. Zusatzmittel					
Fließmittel 1 (Sika® ViscoCrete®-20 Gold)	FM 1	1.50 % wt. NC	17.6	16.7	0.878 kg
Fließmittel 2 (Glenium® Stream)	FM 2	0.00 % wt. NC	0.0	0.0	0.000 kg
3.2.3. Wasser					
(Wasser / Zement) Wert		16.50 % wt. NC			
Wasser added	W		161.0	161.0	9.048 kg
3.3. Gesteinkörnung (Vol.%)		35.46 %Vol. Bt			
Körnung 1 (Dorsliit® 0.1-0.5 mm)	K 1	0.00 % Vol. K	0.0	0.0	0.000 kg
Körnung 2 (Dorsliit® 0.3-0.8 mm)	K 2	100.00 % Vol. K	932.6	354.6	46.630 kg
Körnung 3 (Dorsliit® 0.6-1.2 mm)	K 3	0.00 % Vol. K	0.0	0.0	0.000 kg
Körnung 4 (Dorsliit® 1.0-1.8 mm)	K 4	0.00 % Vol. K	0.0	0.0	0.000 kg
Körnung 5 (Dorsliit® 1.6-2.5 mm)	K 5	0.00 % Vol. K	0.0	0.0	0.000 kg
Crushed basalt (2-5mm)	K6	0.00 % Vol. K	0.0	0.0	0.000 kg
Summe Zuschlag		100.00 %			
Beton		2479		1000.0	Setzfließmaß (mm) = 800-900
w/NC-Wert		0.165			Vw/Vpow = 0.447
w/b-Wert (w/(NC+SF))		0.157			
Rohdichten		ρ _d			ρ _d
Körnung 1 (Dorsliit® 0.1-0.5 mm)		2.630	Wassergehalt= 0.000	Nanodur Compound 5941 grau	2.880
Körnung 2 (Dorsliit® 0.3-0.8 mm)		2.630	Wassergehalt= 0.000	Mikrosilika Elkem Grade 971 U	2.250
Körnung 3 (Dorsliit® 0.6-1.2 mm)		2.630	Wassergehalt= 0.000	Quarzmehl (Mikro-Dorsliit® 110)	2.630
Körnung 4 (Dorsliit® 1.0-1.8 mm)		2.630	Wassergehalt= 0.000		
Körnung 5 (Dorsliit® 1.6-2.5 mm)		2.630	Wassergehalt= 0.000		
Crushed basalt (2-5mm)		3.000	Wassergehalt= 0.000		
Faser 1 (Stahlfaser L13-D0.2)		7.850		Fließmittel 1 (Sika® ViscoCrete®-20 Gold)	1.050
Faser 2 (Carbonfaser L9-W1-T0.1)		1.800		Fließmittel 2 (Glenium® Stream)	1.010

Es wurden 2 Mischungen (M1 und M2) im 75l Zyklus Labormischer unmittelbar nacheinander hergestellt

Mischablauf: trocken mischen (premix+Mikrosilika)30", Wasserzugabe, 4 min mischen, Sand-Zugabe, 4 min mischen, Stahlfaser-Zugabe, 4 min mischen

Schalungen (1 konvex, 1 konkav):

Gießerei-Sandformen (gebundener Formsand GF) auf Mini-Pixeltisch (30*30 cm, Pixel 3*3cm mit verschiedenen Trennlagen wie ZB einer Gummimatte) mit Spezial-Bindemittel der Firma Furtenbach und Quarzsand H32, hergestellt am 27.11. – 2.12. (Parmann etc.)

SF-UHPC in Mini-Formen

Versuche vom 03.12.2014

Oberflächenvorbereitung:

Diverse Trennmittel in vertikalen Bahnen aufgebracht (.id.R. auf beiden Schalungsoberflächen, je ½ Bahnen mit gegenüberliegend gleichartigen Trennmitteln)

Tabelle 2: Oberflächenvorbehandlung

Versuchs- teil	Schalung	Schalmaterial	Trennmittel	Beschreibung des Auftragens & Anmerkungen:
U1	S1M15	Geb. Formsand (GF) auf nitrolackierter Holzpixelplatte	Rheofinish 323p	Aufgetragen mit Pinsel
U1	S2M7	GF auf nitrolackierter Holzpixelplatte mit Rheofinish 323P als Trennmittel (Holz und GF) + Verspachtelung (*)	Rheofinish 323p	Aufgetragen mit Tuch, das Wachs vermischte sich mit der pulverartigen Kernverschmiermasse
U2	S1M10	GF auf Gummimatte ohne Trennmittel	½ Acmos ½ Rheofinish 323p	Acmos 3* dünn am 2.12. aufgesprüht Rheofinish aufgetragen mit Tuch
U2	M10M16	GF auf GF mit Acmos als Trennmittel	½ Acmos ½ Rheofinish 323p	Acmos aufgesprüht in 3 Schichten am 2.12., bildet eine hydrophobe, pulverartige Oberfläche Rheofinish aufgetragen mit Tuch (2x aufgetragen, nach 1. mal scheinbar aufgesaugt)
U3	S1M12	GF auf Gummimatte ohne Trennmittel + OBB Sand auf Pixelplatte	½ 2K Klarlack ½ Anstrich mit Bindemittel	Klarlack mit Sprühdose aufgetragen in 3 Schichten Bindemittelanstrich aufgepinselt, GF stark saugend. Das Bindemittel drang ca. 5mm in den GF ein, Auftragsmenge ca. 1,1 kg/m ²
U3	S2M9	GF auf Gummimatte ohne Trennmittel + OBB Sand auf Pixelplatte	½ 2K Klarlack ½ Anstrich mit Bindemittel	Klarlack mit Sprühdose aufgetragen in 3 Schichten Bindemittelanstrich aufgepinselt, GF stark saugend. Das Bindemittel drang ca. 5mm in den GF ein, Auftragsmenge ca. 1,1 kg/m ²

SF-UHPC in Mini-Formen

Versuche vom 03.12.2014

U4	S1M14	GF auf Zemdrain Classic + Gummimatte	Zemdrain Classic	Zemdrain Classic lässt sich leicht vom GF lösen und wurde mit Klebeband an den Rändern befestigt
U4	S2m11	GF auf Zemdrain MD + Gummimatte	Zemdrain MD	Zemdrain MD verbindet sich mit dem Formsand durch die dickere Trägerschicht, lässt sich nur einmal verwenden. Auch zu steif um die gewünschte Form abzubilden.
U5	S2M6	GF auf Gummimatte ohne Trennmittel	½ Silikonspray ½ Trennspray (PTFE)	Silikonspray 2 mal aufgesprüht Trennspray (PTFE) 3 mal aufgesprüht
U5	S1M5	GF auf Gummimatte ohne Trennmittel, Fehlstellen mit Kernverschmiermasse ausgebessert	½ Silikonspray ½ Trennspray (PTFE)	Silikonspray 2 mal aufgesprüht Trennspray (PTFE) 3 mal aufgesprüht
U6	S1M8	GF auf Gummimatte ohne Trennmittel	½ Supercast TS ½ unbehandelt	Supercast TS aufgesprüht und mit einem Tuch die überschüssige Menge abgewischt
U6	S2M13	GF auf Gummimatte ohne Trennmittel	½ Supercast TS ½ unbehandelt	Supercast TS aufgesprüht und mit einem Tuch die überschüssige Menge abgewischt
U7	Teil A	Wachsbeton Basalt 0/4	1/3 Rheofinish 323p 1/3 unbehandelt 1/3 Bodenwachs	
U7	Teil B	Wachsbeton Bad Fischau 1/4	2/3 unbehandelt 1/3 Bodenwachs	

SF-UHPC in Mini-Formen
Versuche vom 03.12.2014

U8	A	Miniform GF	Voranstrich auf Gummimatte aufgetragen	Wird die Gummimatte mit Silikonspray vorbehandelt lässt sich der Anstrich nicht mehr gleichmäßig auftragen.
U8	B	Miniform GF	unbehandelt	
U9	A	Gummimatte	unbehandelt	
U9	A	Gummimatte	Rheofinish 323p	Mit Pinsel aufgetragen.

Anmerkung 1: gebundener Formsand GF
Wachs W

Anmerkung 2: Verspachtelung (*) mit Kernspachtel von Fa. Furtenbach

SF-UHPC in Mini-Formen

Versuche vom 03.12.2014

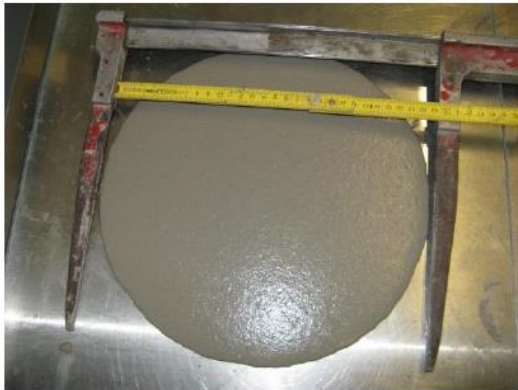
3 Herstellung**3.1 anhand von Bildern**

Abbildung 1: Ausbreitfließmaß mit Mörtelkonus auf Glasplatte



Abbildung 2: Befüllen einer Sand-Gussform (3-D Flächen-Schalung und Konterschaltung aus Sand)

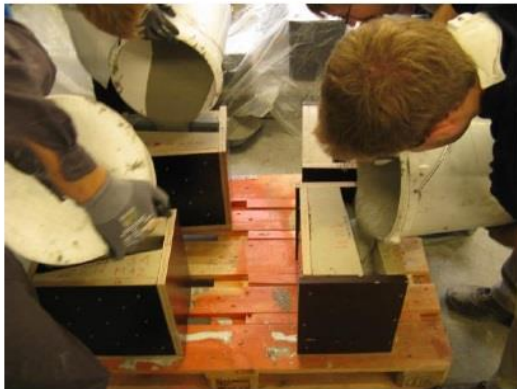


Abbildung 3: synchrones Befüllen der Sand-Gussformen (U1-U4 mit M1, U5-U9 mit M2)



Abbildung 4: Befüllen einer Wachsbron-Form (3-D Flächen-Schalung und Konterschaltung aus 2 verschiedenen Wachsbron Mischungen)

SF-UHPC in Mini-Formen

Versuche vom 03.12.2014

4 Ergebnisse der Frischbetonprüfung

Ergebnisse Frischbeton 3.12.2014						
	Zeit nach Wasser-zugabe	Ausbreit- fließmaß	Fließzeit bis 200mm mit Mörtel- konus	Ausbreit- fließmaß	Fließzeit bis 500mm mit Beton- konus	Luft-gehalt Mörteltopf 1l
		mit Mörtel- konus		mit Beton- konus (verkehrt)		
	Min	cm	sec	cm	sec	%
M1	(Wasserzugabe:10:35) Ohne Fasern	29,5	6			
	Mit Fasern nach 2 min Nach 5 min	26,6 27,5	8	75,5	7	4,8 Zum Zeitpunkt des Befüllens (10:58)
M2	(Wasserzugabe:11:03) Ohne Fasern	28,5	6			
	Mit Fasern nach 2 min Nach 5 min	26,3 27,0		76,5	6	3,2 Zum Zeitpunkt des Befüllens (11:28)

Thermoplast	Kurzzeichen	Dichte	Zugfestigkeit	E-Modul	Optische Transparenz	Lineare Wärmeausdehnung	Spezifische Wärme	Dauergebrauchstemperatur	
								min.	max.
	-	g/cm ³	N/mm ²	N/mm ²	+ ja - nein	10 ⁻⁶ °C	kJ/ kg·K	°C	°C
Polystyrol, Standard	PS-GP	1,05	55	3350	+	75	1,3	-10	70
Polystyrol, schlagfest	PS-HI	1,05	32	2150	-(+)	70	1,3	-40	70
Styrol-Butadien-Styrol	SBS	1,03	31	1800	+	90	1,3	-20	70
Polystyrol, orientiert	OPS	1,05	57	3200	+	70	1,3	-60	79
Acrylnitril-Butadien-Styrol	ABS	1,05	50	2500	+	90	1,3	-45	85
Acryl-Styrol-Acrylester	ASA	1,07	36	2050	-	95	1,3	-40	75
Styrol-Acrylnitril	SAN	1,08	73	370	+	80	1,3	-20	80
Polyvinylchlorid, hart	PVC-U	1,39	58	2900	+	75	0,9	-5 (-25)	65
Cycloolefin-Copolymer	COC	1,02	66	3200	+	65			170
Polyethylen, hoher Dichte	PE-HD	0,95	28	1100	-	200	2,1-2,7	-50	95
Polypropylen	PP	0,91	30	1200	-(+)	150	2,0	0 (-30)	110
Polymethylmethacrylat, extr.	PMMA, ext	1,18	80	3300	+	70	1,47	-40	70
Polymethylmethacrylat, geg.	PMMA, geg	1,18	80	3300	+	70	1,47	-40	80
Polyoxymethylen, Polyacetal	POM	1,41	66	3000	+	100	1,5	-40	100
Polycarbonat	PC	1,2	61	2300	+	65	1,17	-100	130
Polyestercarbonat	PAR	1,2	66	2300	+	72	1,1	-40	145
Polyphenylenether (-Oxid)	PPE (PPO)	1,08	55	2450	-	70	1,4	-30	80
Polyamid 6, 15 % GF-verstärkt	PA 6 GF15Z	1,22	114	5900	-	61	1,5		140
Polyamid 12	PA 12	1,02	60	1600	-	150	1,6	-70	80
Polyethylenterephthalat, amorph	PET-G	1,27	49	1720	+	51	1,1		63
Polyethylenterephthalat, amorph	A-PET	1,34	30	2200	+	80	1,05	-40	70
Polyethylenterephthalat, kristall.	C-PET	1,37	47	2600	-	70	1,1	-20	220
Polysulfon	PSU	1,24	80	2650	+	56	1,3	-70	150
Polyethersulfon	PES	1,37	80	3000	+	55	1,1		180
Polyphenylensulfid	PPS	1,62	125	12000	-	29			240
Acrylnitril-Methacryl-Butadien	A/MA/B	1,15	56	3450	+	66	2,0	-200	70
Celluloseacetat	CA	1,28	37	1800	+	110	1,6	-40	80
Cellulosediacetat	CdA	1,27	40	1000	+			-20	60
Celluloseacetobutyrat	CAB	1,18	26	1600	+	120	1,6	-40	60
Polyvinylidenfluorid	PVDF	1,78	43	1500	-	120	0,96	-40	120
Polyetherimid	PEI	1,27	105	2800	-	56			170
PET-Elastomer	TPE-E	1,17	28	55	-			-50	105
Polylactacidid	PLA	1,25	53	3500	+		1,3	-20	45

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht Versuche	38
Tabelle 2 Polymermodifiziertes Bitumen	41
Tabelle 3 Gussasphalt Temperaturverlauf	43
Tabelle 4 Formbeiwert a_f nach Wesche [25]	55
Tabelle 5 Massenanteile der untersuchten Wachs-Gesteinsmischungen.....	56
Tabelle 6 Erforderliche Mengen für die Herstellung von ca. 1,2l Wachsбетон	57
Tabelle 7 Erforderliche Mengen für die Herstellung von ca. 1l Wachsбетон.....	59
Tabelle 8 Erforderliche Mengen für die Herstellung von ca. 1l Wachsбетон	62
Tabelle 9 Erforderliche Mengen für die Herstellung von ca. 1,4l Wachsбетон.....	64
Tabelle 10 Auswertung Schwindmaß nicht vorgewärmt	67
Tabelle 11 Biegezug Druck Prüfung	70
Tabelle 12 Rezeptur I für ca. 8 Liter.....	75
Tabelle 13 Rezeptur III für ca. 8 Liter	75
Tabelle 14 Übersicht Formstoffe	84

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Pixeltisch [1].....	2
Abbildung 2 Abformen [1]	2
Abbildung 3 Schleifen der UHPC-Schale [2].....	3
Abbildung 4 Trockenfugenverbindung [2]	4
Abbildung 5 Sieblinie Quarzsand der Grube Haltern	8
Abbildung 6 Klassifizierung der Wachse [15].....	10
Abbildung 7 Eigenschaften einiger Rohstoffe für Modifikation von Wachsen [15].....	12
Abbildung 8 Ausdehnungskurven [18]	14
Abbildung 9 Linearer Expansionsbereich von Gusswachsen [15]	14
Abbildung 10 Volumenkontraktion [15]	15
Abbildung 11 Kokillenguss [18].....	15
Abbildung 12 Plasto-elastische Verformung von Wachsen (nach Höppler) [15]	16
Abbildung 13 Plasto-elaastisches Verhalten von 2 zahnärztlichen Wachsen bei 30°C und einer Prüflast von 30N (nach Rehberg) [15]	17
Abbildung 14 Viskositäts-Temperaturverhalten von Straßenbaubitumen [19]	19
Abbildung 15 Korngerüst [19]	21
Abbildung 16 Sieblinie Gussasphalt 0/5 S [22]	24
Abbildung 17 Oberflächentheorie [23].....	25
Abbildung 18 Marshall-Kennwerte vom Bindemittelgehalt [23]	26
Abbildung 19 Gussasphaltrezepturen [19].....	27
Abbildung 20 Thermoformen [26].....	28
Abbildung 21 Strukturen von Thermoplasten a) Amorph, b) Teilkristallin [26]	29
Abbildung 22 Thermoplastische Halbzeuge [26].....	30
Abbildung 23 Rahmenschalung Firma RSB [5].....	31
Abbildung 24 Trägerschalung [6]	32
Abbildung 25 Arbeitsablauf flexible Schalung [7]	33
Abbildung 26 Übersichtsplan Betonschale [8].....	34
Abbildung 27 Mercedes-Benz Museum [9]	35
Abbildung 28 Doka-Shape [10]	35
Abbildung 29 ETH Zürich Wachsschalung [11].....	36
Abbildung 30 Abmessungen Pixeltisch	39
Abbildung 31 MDF-Schalung	40
Abbildung 32 Holzpixel	40
Abbildung 33 Rahmenschalung	40
Abbildung 34 Negativ und Positivform	40
Abbildung 35 Polymermodifizierte Probekörper	41
Abbildung 36 Kunstharz Trennfolie	42
Abbildung 37 Ebene Gussasphaltform.....	42
Abbildung 38 Abgießen mit Gussasphalt	43
Abbildung 39 Gussasphalt Pixelglättung.....	44
Abbildung 40 Ebene Gussasphaltplatte	45

Abbildung 41 Anpassung an Pixeltischgeometrie	45
Abbildung 42 Verspachtelung mit O.B.B-Sand	46
Abbildung 43 Elastomermatte 10mm	47
Abbildung 44 3D Laservermessung	48
Abbildung 45 Wachs im Ofen aufschmelzen	49
Abbildung 46 Ausgießen der Form	49
Abbildung 47 Schwinden des Wachses	50
Abbildung 48 Wachsmodell	50
Abbildung 49 Messung Wachsprobe (Skala in mm)	51
Abbildung 50 Prismenform.....	55
Abbildung 51 Mörtelmischer	55
Abbildung 52 Mischvorgang.....	56
Abbildung 53 Bindemittelüberschuss	58
Abbildung 54 Fertiger Abguss Rezeptur I.	58
Abbildung 55 Untere Fläche	58
Abbildung 56 Seitenfläche	58
Abbildung 57 Wenig Bindemittelanteil.....	60
Abbildung 58 Geringe Selbstverdichtung.....	60
Abbildung 59 Unterseiten (Stahlseite).....	61
Abbildung 60 Oberseiten (Luftseite).....	61
Abbildung 61 Eingelegte Elastomermatte	62
Abbildung 62 Bindemittel Überschuss	62
Abbildung 63 Ausgehärtete Rezeptur III.....	63
Abbildung 64 Unterseite (Stahlseite) Rezeptur III.....	63
Abbildung 65 15M% Wachsanteil	64
Abbildung 66 20M% Wachsanteil	64
Abbildung 67 Vorgewärmte Form	65
Abbildung 68 Nicht Vorgewärmt.....	65
Abbildung 69 Unterseite.....	66
Abbildung 70 Schwinden zu Wachsgehalt	67
Abbildung 71 Schwinden zu spez. Oberfläche.....	68
Abbildung 72 Erstarrungsverhalten Wachsbeton	69
Abbildung 73 Biegezugprüfung	70
Abbildung 74 Druckprüfung	70
Abbildung 75 Bruchfläche Probe 1.1.....	71
Abbildung 76 Bruchfläche Probe 4.3.....	71
Abbildung 77 Druckprüfung Probe 1.1	72
Abbildung 78 Druckprüfung Probe 5.1	72
Abbildung 79 Druckprüfung Probe 4.5	73
Abbildung 80 Druckprüfung Probe 4.6	73
Abbildung 81 Zusammenhang Temperatur und f_c [N/mm ²]	74
Abbildung 82 Pixeltisch mit Elastomer und MDF-Platte als Deckel	76
Abbildung 83 Gießvorgang mit Rezeptur III	76

Abbildung 84 Ausschalen Rezeptur I.....	76
Abbildung 85 Pixelglättung Elastomermatte	76
Abbildung 86 Wachsbetonschalung Rezeptur III.....	77
Abbildung 87 Wachsbetonschalung Rezeptur I.....	77
Abbildung 88 Oberflächenqualität (40*40mm) Rezeptur I.....	78
Abbildung 89 Oberflächenqualität (40*40mm) Rezeptur III.	78
Abbildung 90 Messung Geometrieabweichung (Normalabstand) Wachsbe- ton (Skala in mm)	79
Abbildung 91 Fertige Schalung.....	80
Abbildung 92 Betonoberfläche Schalungsseite der Rezeptur III	81
Abbildung 93 Betonoberfläche der Schalungsseite Rezeptur I.....	82

9 Literaturverzeichnis

[1]. **Parmann, G.** *Präsentation zu Milstone meeting 4 im Forschungsprojekt UHPC-Schale FFG-P8432, Institut für TWE TU Graz 2014, unveröffentlicht.* Graz, 2014.

[2]. **Peters, S.** *Forschungsprojekt-Antrag "Schalentragerwerke aus UHPC-Fertigteilen" FFG-P8432, Inst. TWE TU Graz, unveröffentlicht.* Graz, 2012.

[3]. **Hofstadler, C.** *Scholarbeiten.* Graz : Springer, 2008.

[4]. **Reckli GmbH.** [Online] [Zitat vom: 22. 12 2014.]
<http://www.reckli.de/firmenprofil/>.

[5]. **RSB Formworktechnology GmbH.** [Online] [Zitat vom: 4. 11 2014.]
<http://www.rsb.info/produkte/rundbecken/>.

[6]. **Doka Österreich GmbH.** [Online] [Zitat vom: 4. 11 2014.]
<http://www.doka.com/web/products/system-groups/doka-wall-systems/timber-beam-formwork/large-area-formwork-top-50/index.de.php>.

[7]. **Schipper, R.** *Verwendung von SVB und Textilbewehrung. BWI Betonwerke International.* 2013, Bd. 5.

[8]. **Kromoser, B.** *Herstellung von Schalentragerwerken aus Beton "Pneumatic Wedge Method" in: Beton und Stahlbetonbau.* 2014, Bd. 8.

[9]. **Robusta-Gaukel GMBH.** [Online] [Zitat vom: 4. 11 2014.]
<http://www.robusta-gaukel.de/?id=5>.

[10]. **bi medien GmbH.** [Online] [Zitat vom: 5. 11 2014.] http://www.bi-constructionnews.com/en_article_Melodious_Premiere_for_DokaShape.news.

[11]. **Kohler, M.** [Online] [Zitat vom: 23. 12 2014.]
http://src.holcimfoundation.org/dnl/f03786c0-f28f-461d-872a-4a4e46f8c033/HolcimAwards11_EUR_acknB.pdf.

[12]. **Herbert, F.** *Fertigungstechnik.* Heidelberg : Springer, 2010.

[13]. **Hasse, S.** *Giesserei-Lexikon.* Berlin : Fachverlag Schiele & Schön GmbH, 2007.

[14]. **Neumüller, O.** *Römpps ChemieLexikon.* Stuttgart : Frank'sche Verlaghandlung, 1983.

[15]. **Eichner, K.** *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung.* Heidelberg : Thieme, 2001.

[16]. **Georg Thieme Verlag KG.** [Online] [Zitat vom: 23. 21 2014.]
<https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-23-00014>.

-
- [17]. **CHEMIE.DE Information Service GmbH.** [Online] [Zitat vom: 26. 12 2014.] <http://www.chemie.de/lexikon/Paraffin.html>.
- [18]. **Finck, E.** *Über Modellwachse für den Metallpräzisionsguss Aus dem Ammoniaklaboratorium der BASF.* Hamburg, 1964.
- [19]. **Weidlinger, K.** *Asphalt Handbuch.* Wien : bcom Advertising GmbH, 2010.
- [20]. **ÖNORM EN 1426,** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, Bestimmung der Nadelpenetration.*
- [21]. **ÖNORM EN 12591,** *Bitumen und bitumehaltige Bindemittel , Anforderung an Straßenbaubitumen.*
- [22]. **DEUTAG GmbH& CO.KG.** [Online] [Zitat vom: 23. 12 2014.] http://www.deutag.de/uploads/media/Fluesterbelag_mit_Einleger_NL_WEST_01.pdf.
- [23]. **Eustaccio, E.:** *Baustofflehre Skriptum, TU Graz Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie.* 1994.
- [24]. **ÖNORM EN 12697-34,** *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 34: Marshall-Prüfung.*
- [25]. **Wesche, K.** *Baustoffe für tragende Bauteile Teil2: Beton Mauerwerk.* Wiesbaden : Bauverlag, 1993.
- [26]. **Schwarzmann, P.** *Thermoformen in der Praxis.* Heibronn : Carl Hanser Verlag, 2008.
- [27]. **DIN ISO 7619-1** *Elastomere oder thermoplastische Elastomere-Bestimmung der Eindringtiefe.*
- [28]. **ÖNORM EN 1097-3** *Prüfung von Gesteinskörnungen Schüttdichte und Hohlraumgehalt.*
- [29]. **ÖNORM EN 1097-6** *Prüfung von Gesteinskörnungen Rohdichte und Wasseraufnahme.*
- [30]. **ÖNORM EN 196-1** *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.*
- [31]. **Ivanovszky, L.** *Wachsenzyklopädie.* Augsburg : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1954.

