

Die Prozessentwicklung vom Entwurf bis zur Fertigung amorpher Bauelemente aus dem Baustoff Beton

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades einer/s Diplom – Ingenieurin/Diplom – Ingenieurs

Studienrichtung: Architektur

Martina Mühlbacher & Wilhelm Jergitsch

Technische Universität Graz
Erzherzog – Johann – Universität
Fakultät für Architektur

Betreuer: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Andreas Trummer | Institut: Institut für Tragwerksentwurf

Mai/2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Herbst 2009/Frühjahr 2010 als Diplomarbeit der Technischen Universität Graz und wurde von der dortigen Fakultät für Tragwerksentwurf angenommen.

Unser besonderer Dank gilt unserem Betreuer Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Andreas Trummer für die Anregung zu dieser Arbeit, die stetige Bereitschaft für wissenschaftliche Diskussionen, die Ratschläge bezüglich der Ausführung unseres Objektes und die Organisation diverser Kontakte, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren möchten wir uns bei Dipl.-Ing., Architekt Helmut Schober vom Institut für Tragwerksentwurf bedanken, welcher uns mit seinen Überlegungen bezüglich der Ausführung des concrete leafs zur Seite stand und außerdem die statische Vorbemessung dieses Objektes ermöglicht hat.

Für die Durchführung der praktischen Versuche, sowie auch für die Beratung bezüglich des Baustoffs UHFB, danken wir dem Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) der TU Graz, insbesondere Hr. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag sowie Hr. Dipl.-Ing. Josef Linder.

Ein weiterer Dank geht an die Firma Idee und Design aus Graz, die sich auf das Fräsen von freigeformten Elementen spezialisiert und ihr Wissen bezüglich dieser Thematik mit uns geteilt hat.

Graz, 2010

Martina Mühlbacher, Wilhelm Jergitsch

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Prozess, ein amorphes Objekt aus ultrahochfestem Beton zu realisieren, dargelegt. Der Fokus bezieht sich, um eine Flexibilität zu garantieren, auf die Herstellung von demontierbaren Fertigteilen. Durch die Entscheidung, dem frei gekrümmten Objekt, titulierte als concrete leaf, einen High – Tech Werkstoff zuzuordnen, welcher die Eigenschaften eines Standardbetons in vielen Punkten übertrifft, eröffnen sich bezüglich der Formgebung und Konstruktion neue Möglichkeiten, welche im Rahmen des Projektes ausgenutzt werden konnten. Aufgrund dessen, dass die Thematik der amorphen Betonelemente im Bauwesen bisher selten Anwendung fand, liegt dem Vorhaben eine gewisse Komplexität zugrunde. Diese Tatsache mag sicherlich daher kommen, dass bezüglich des Bauens von mehrachsigen, im Raum frei gekrümmten Betonelementen, kein standardisiertes Verfahren angewendet werden kann und daher im Falle eines solchen Projektes akzeptable Lösungen gesucht und neue Wege beschritten werden müssen. Unter Berücksichtigung dieses Faktums wurde versucht, anhand von gebauten Referenzprojekten die gegangenen Schritte nachzuvollziehen, gewisse Prozesse abzuleiten und jene daraufhin zu optimieren. Zusätzlich war es unser Anliegen bezüglich diverser Schritte, die ein solches Projekt erfordert, neue Lösungsansätze und Prozessabläufe zu finden und am Beispiel des amorphen Entwurfsobjektes dokumentarisch zu veranschaulichen und zu erklären.

summary

The present thesis shows the process to realize an amorphous object made of ultra high performance concrete.

The focus concentrates on the fabrication of removable pre-cast segments to assure flexibility. The decision to use high tech material called concrete leaf exceeds the qualities of normal concrete. It offered new possibilities concerning shaping and construction during the project. The fact that amorphous concrete has rarely been used in architecture and building industry made the project complex. There is no standard way concerning the building of multi-axle free space bent components.

In the course of the project new acceptable solutions and ways had to be found. Considering all these circumstances we tried to follow the steps to deviate processes and to optimise on our built reference projects.

It was our concern to find solutions, new approaches and process sequences to demonstrate and illustrate our amorphous design object.

Inhaltsverzeichnis

- 1 Idee
- 2 Entwurf
- 3 Recherche
- 4 Erkenntnis
- 5 Machbarkeit
- 6 Verbindungsmöglichkeiten
- 7 Entwicklung System I
- 8 Test System I
 - Schalung
 - Lackexperimente
 - Ansichten & Schnitte
 - Schalungsoptimierung
 - Einbauten
 - Styrodurschalung
 - Bestandteile
 - Schalvorgang & Ausschalen
 - Holzschalung
 - Bestandteile
 - Schalvorgang & Ausschalen
 - Vergleich zwischen XPS- und Holzschalung
 - Montage der Testkörper
- 9 System I bei gewölbten Bauteilen
 - Möglichkeit 1
 - Möglichkeit 2
- 10 Entwicklung System II
- 11 Vergleich der Systeme I + II bei gewölbten Bauteilen
- 12 Herleitung der Begrenzungsfaktoren für System II
- 13 Möglichkeiten der Endausbildung
- 14 Berechnungsmodell
 - Transformation
 - RFEM
 - Import & Flächengenerierung
 - Lastbild
 - Kopplungsstäbe zur Ergebnisauswertung
 - Ergebnisauswertung der Kopplungsstäbe unter ULS
 - Ergebnisauswertung der Auflager unter ULS
 - Ergebnisauswertung des Verformungsdiagramms unter SLS
 - Ergebnisauswertungen der Spannungen unter ULS
 - Darstellungen der Spannungen
- 15 Erkenntnisse der Berechnung
 - Fundamente
 - Auflager A+B
 - Auflager C
 - Änderung des Verbindungsschemas
 - Konsequenz der Fundamentausbildungen
 - Zuganker
- 16 Entwicklung System III
 - Anwendung bei gewölbten Bauteilen
- 17 Ergänzende Darstellungen
 - Ansichten
 - Funktionsschema der Verbindungen unter System III
 - Thematik der Vorspannungen
- 18 Schalungsplanung
- 19 Anwendungsmöglichkeiten von amorphen Betonfertigteilen
- 20 Resümee

1. Idee

Durch den experimentellen Umgang mit dem Baustoff Beton, dessen Formungsmöglichkeiten sowie der Gestaltung eines durchgehenden Informationsflusses vom Entwurf bis zur Fertigung, soll die effiziente Erzeugung amorpher Betonelemente ermöglicht werden.

Dies bedeutet nicht nur, dass vorhandene Einsatzmöglichkeiten bzw. Fertigungsprozesse optimiert werden sollen, vielmehr geht es bei diesem Projekt um den konstanten Realisierungsversuch eines amorphen Referenzprojektes, dessen komplexe Formgebung bisherige Möglichkeiten bis an die Grenzen des Machbaren ausreizen, um dadurch Anforderungen zu schaffen, die neue Lösungsansätze fordern. Zudem soll aufgezeigt werden, dass bei vergleichbaren Projekten kein standardisiertes Verfahren angewendet wurde, sondern aufs Neue individuelle Wege beschritten werden mussten.

Die geringe Anzahl an Referenzprojekten, die die Thematik des Bauens von mehrachsig gekrümmten Betonelementen aufgreifen und deren nicht vollständig veröffentlichten Dokumentationen der Planungs- u. Ausführungsschritte, vom Entwurf bis zur Ausführung, lässt die Komplexität des Vorhaben vermuten.

Bereits vorhandene Entwicklungen in diesem Forschungsbereich sollen durch Recherche und Analyse betrachtet, verbessert, zusammengefügt und eventuell weiterentwickelt werden, um letztendlich einen Prozess, der die Schritte, ein amorphes Objekt aus Beton zu bauen, anschaulich aufzeigt.

Materialwahl:

Bereits in einer sehr frühen Phase des Projektes fiel die Entscheidung auf den Baustoff UHFB (ultrahochfester Beton), da er quasi als „High Tech“ Werkstoff im Bereich des modernen Betonbaus gilt. Seine außergewöhnlich guten Eigenschaften können für den Bau eines amorphen Betonobjektes nur förderlich sein, wenn man seine Vorteile gezielt ausnutzt.

Ein zusätzlicher Grund, dieses Material zu wählen, ergab sich dadurch, dass die TU-Graz im Bereich des ultrahochfesten Betons forscht, weshalb schon Erfahrungen mit seinem Umgang vorliegen, die in den Prozess miteinfließen können.

2. Entwurf - Form- und Nutzungsfindung des amorphen Objektes

Nach reichlichen Überlegungen wurde die Entscheidung getroffen, sich in Bezug auf die Formfindung von der Natur inspirieren zu lassen. Im experimentellem Umgang sollte durch eine Kombination von einerseits zufälligen und andererseits gewollten Prozessen ein Objekt generiert werden. Von der spätsommerlichen Umgebung begeistert, wurde eines Nachmittags, als das Blatt eines Baumes in einem Cafe direkt auf den Tisch segelte, die Entscheidung getroffen, eine experimentelle Formgenerierung mit genau diesem zu starten.

Eine amorphe Formfindung mithilfe eines Blattes, begründet sich auf der natürlichen Verformung von diesem in der herbstlichen Jahreszeit, wenn das Grün vergeht, die Blätter von den Bäumen fallen und sich daraufhin während dem Trocknungsvorgang in den verschiedensten Formen krümmen und einrollen.

Das gewählte Blatt, welches ein großzügiges Verhältnis von Länge zu Breite aufwies, wurde schließlich auf eine Papierschablone übertragen und vervielfältigt.



2. Entwurf - Formfindung manuell



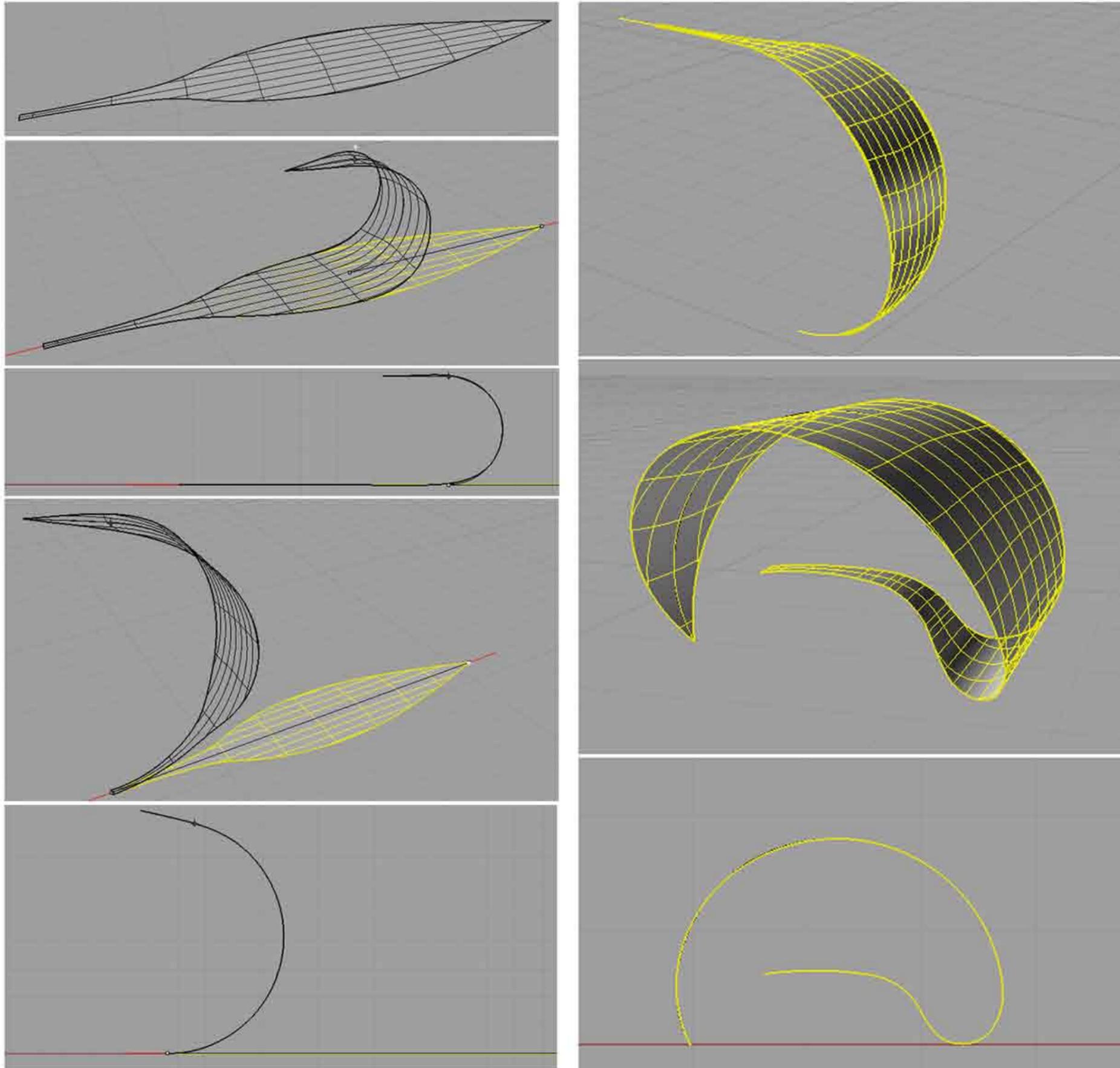
Die zweidimensionale Fläche des Blattes sollte nun durch diverse Verdrehungen und Verwindungen in einen dreidimensionalen Zustand versetzt werden. Die Papierschablone wurde also im Experiment in den Raum gebracht, aus 2D wurde 3D und eine Interaktion des Blattes mit der planen Ebene entstand. Durch diesen Prozess beeinflusst, fiel die Entscheidung eine Überdachung als Objekt zu kreieren, welche quasi mit der planen Fläche ein Zusammenspiel hervorruft.

Bald wurde im Experiment jedoch klar, dass während dem Verformungsprozedere die sich windende „Schleife“ im manuellen Prozess bald an ihre Grenzen stößt, da die gleichzeitige Verbiegung um mehrere Achsen nicht festgehalten werden kann.

Die Möglichkeit, dieses Hindernis zu umgehen und eine größere Vielfalt an Auswahlmöglichkeiten zu erlangen, konnte durch eine Fortführung des Formfindungsprozesses mit digitalen Medien gelöst werden.



2. Entwurf - Form- und Nutzungsfindung digital



Das Blatt wurde nun in ein digitales Medium übertragen. Die Entscheidung, eine Überdachung zu kreieren war schon beim manuellen Prozedere gefallen.

In der digitalen Form wurde dem Blatt auch der Stengel hinzugefügt, beim manuellen Versuch war dieser, zwecks einfacherer Handhabung, nur in gedachter Form Teil des Objekts.

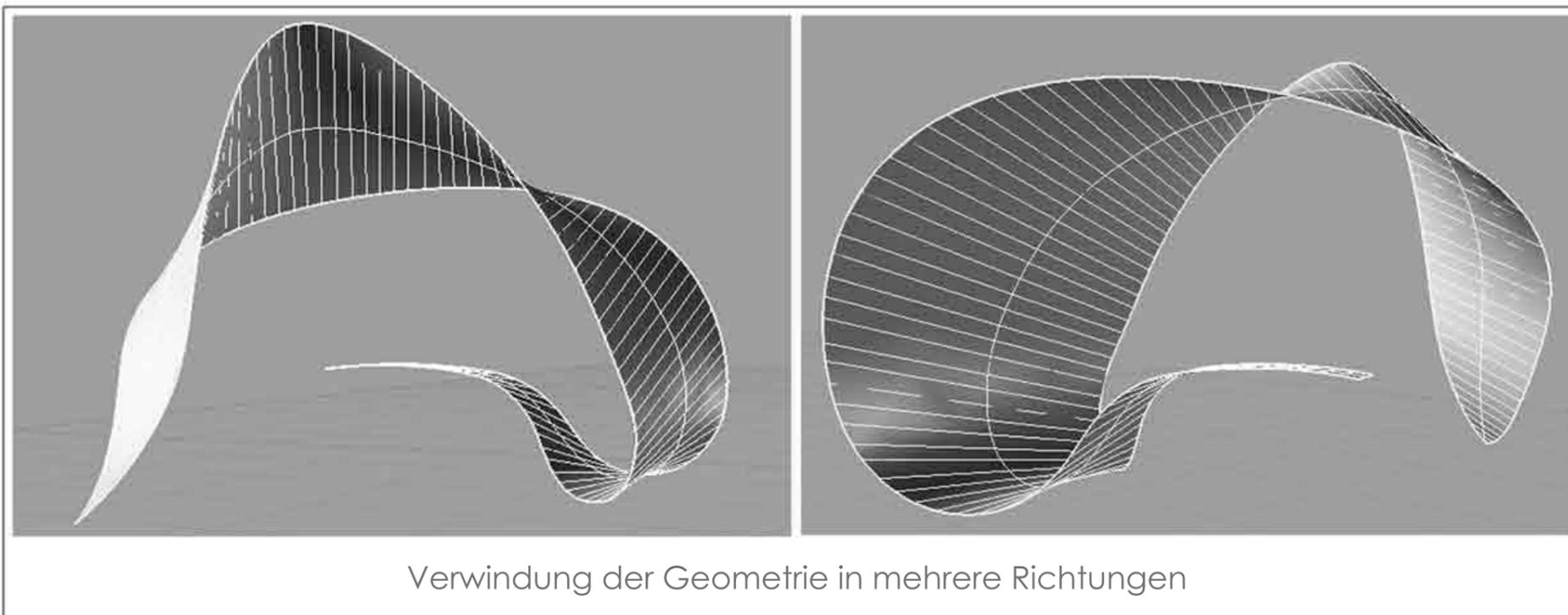
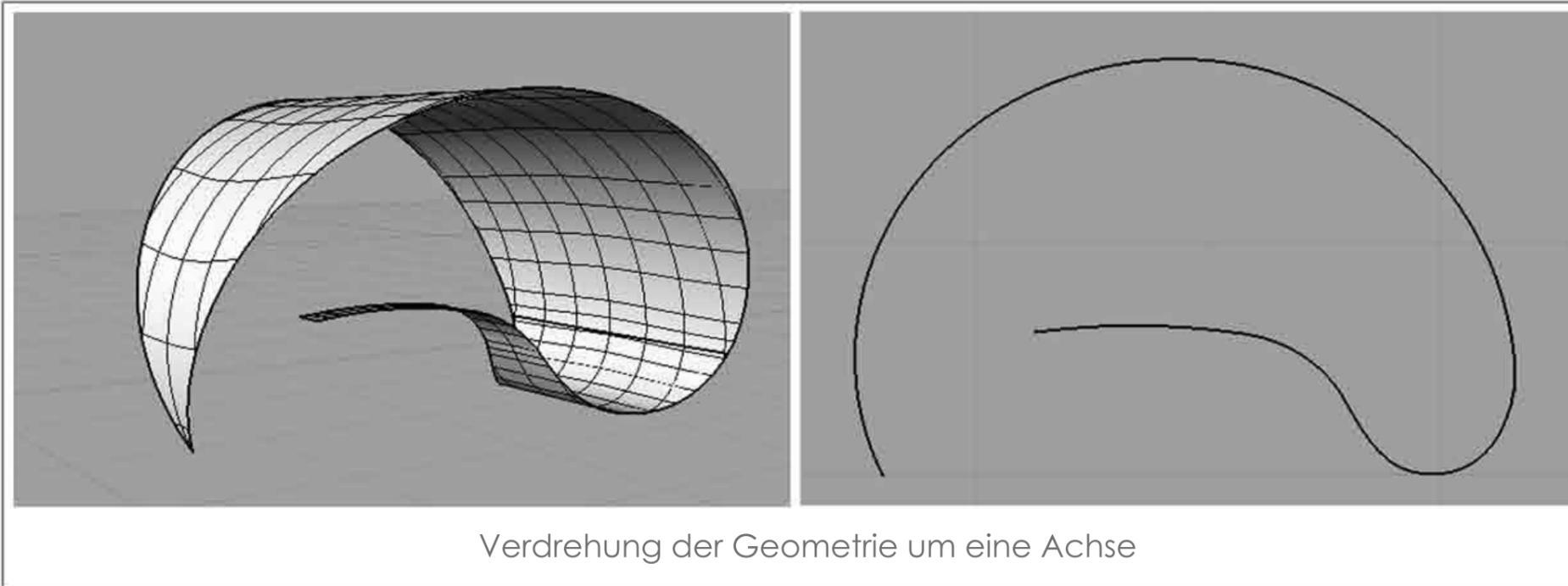
Die Programmwahl für die Fortsetzung des Formfindungsprozesses fiel auf McNeel Rhinoceros, jenes ist prädestiniert für die Erzeugung von Freiformflächen und bietet diverse Tools im Bezug auf diese Thematik an.

Um im Rhino eine plane Fläche digital verbiegen zu können, muss zunächst eine Rückgratlinie erzeugt werden, welche als Biegeachse dient. Im ersten Schritt wurde diese mittig angelegt, um vorerst symmetrische Biegeversuche durchzuführen. Ein weiterer Faktor für das Verbiegen ist der sogenannte Biegewinkel, er gibt die Krümmungsmöglichkeiten vor. Hierfür wurden 180° ausgewählt, um eine größtmögliche Flexibilität gewährleisten zu können.

Die Verbiegung des Blattes um eine Achse wiederholten wir entsprechend oft, bis wir ein Modell generiert hatten, bei dem die Form unseren Vorstellungen entsprach.

Zudem wurde während dem Prozess beschlossen der Überdachung eine Sitzmöglichkeit hinzuzufügen. Auf die Nutzung unseres amorphen Objekts bezogen, war die Entscheidung nun hier gefallen und stand somit fest. Daraufhin wurden noch Optimierungen die Nutzung betreffend ausgeführt, d.h. korrekte Sitzhöhe, Überdachungsbreite, etc.... Die weiteren Prozesse im Rhino beschränkten sich nun nur mehr auf die Formfindung.

2. Entwurf - Formfindung digital

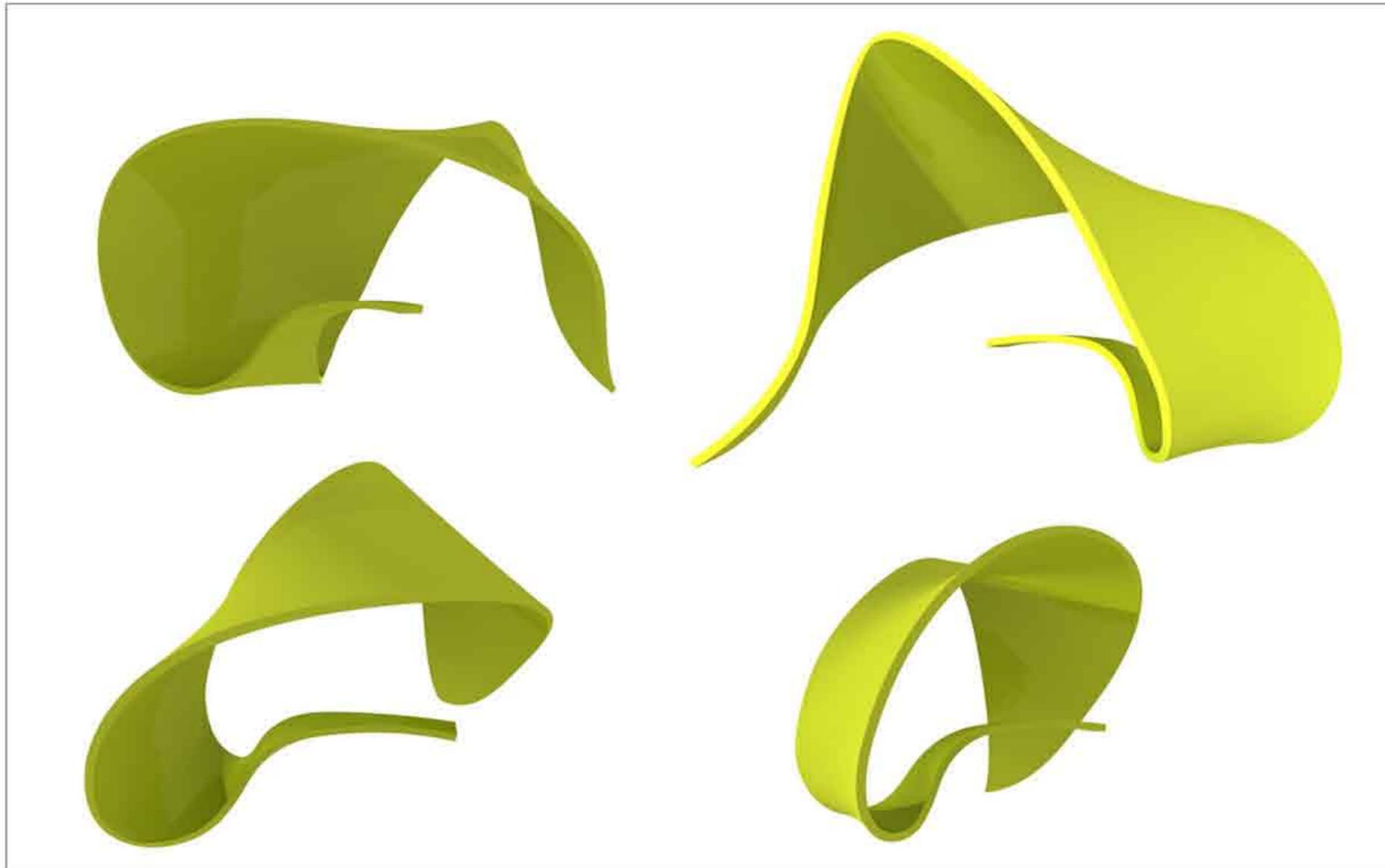
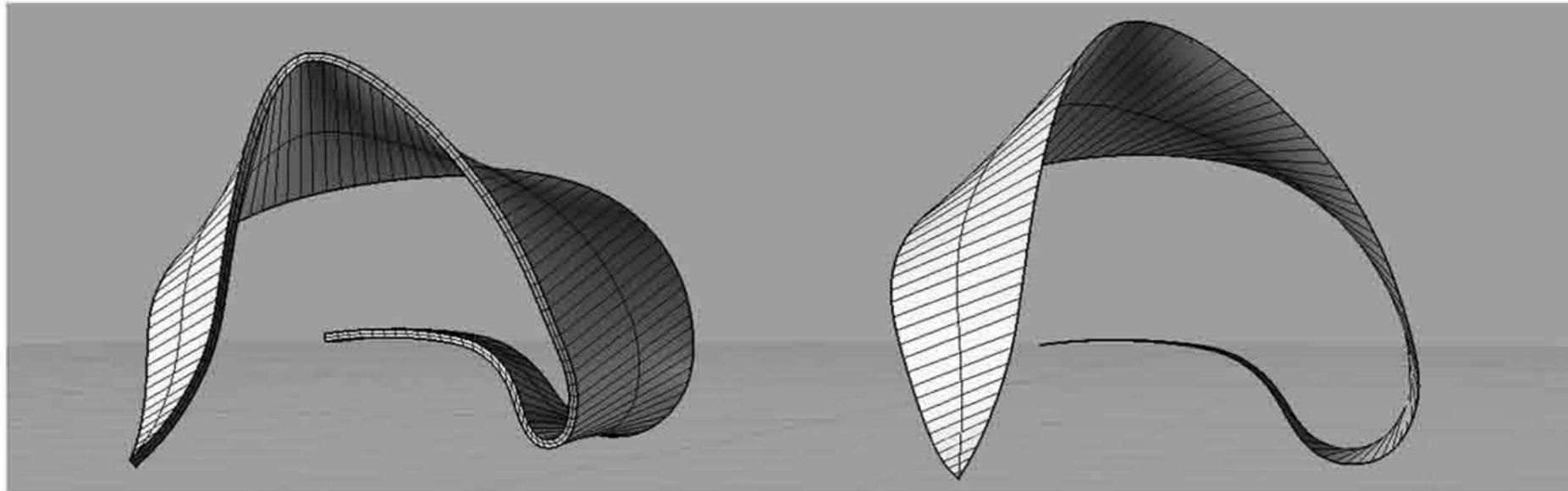


In diesem Schritt der digitalen Formfindung ging es um den Grund des Einsatzes digitaler Methoden, nämlich die Möglichkeit die Form an ausgewählten Stellen um mehrere Achsen zu verbiegen. Das hierfür verwendete digitale Werkzeug kann man sich wie einen Magneten vorstellen, mit dem man die zuvor generierte Fläche herausziehen bzw. hineindrücken kann.

Da für diesen Schritt und auch für alle folgenden Prozesse eine feinere Oberfläche nötig war, mussten wir die Anzahl der U und V Linien des Objektes erhöhen und eine regelmäßigeren Anordnung gewährleisten. U und V Linien sind vereinfacht ausgedrückt die Struktur- bzw. Skelettlinien eines Objektes, anhand derer sich das Flächenmodell generieren lässt.

Nach mehreren Durchgängen und Versuchen war der Formfindungsprozess schließlich beendet, das gewünschte Ergebnis, eine im Raum gekrümmte 3D Fläche aus einer 2D Blattgeometrie zu erzeugen, war erreicht.

2. Entwurf - Formfindung digital



Nachdem die Formfläche generiert war, galt es aus dem Flächenmodell einen Volumenkörper mit konstanter Stärke zu generieren. Hierfür wählten wir unter Berücksichtigung der Bogenwirkung der Form eine Stärke von 5 cm.

Das Problem bei der Generierung war, dass es nicht möglich ist, diese in allen Achsen konstant und automatisch zu erstellen.

Hierbei improvisierten wir mit folgender Methode:

Zunächst versetzten wir die äußeren Kontursplines um 5 cm nach unten, danach erzeugten wir eine Füllfläche zwischen den Splines, wodurch wir die Randflächen des zukünftigen Volumenkörpers bekamen.

Nun generierten wir aus den neu erzeugten „offset-splines“ eine Füllfläche, die durch den Prozess genau der Ursprungsfläche, um 5 cm nach unten versetzt, entsprach.

Im letzten Schritt vereinigten wir die Einzelflächen und erhielten einen vollständigen Volumenkörper mit einer konstanten Stärke von 5 cm.

Das finale Ergebnis des Formfindungsprozesses ist links dargestellt.

2. Entwurf - Überprüfung durch Rendering (digital)

Dieser Prozess kann quasi als Entwurfsüberprüfung anhand von optischen und haptischen Eindrücken gesehen werden.

digitale Überprüfung:

Um einen möglichst realistischen Eindruck vom Entwurf zu erhalten, exportierten wir das 3-D Modell in ein Render-Programm, nämlich Cinema4D, in dem wir die Umgebungsfläche (Rasen) generierten und dem Modell das Material Beton gaben.

Das fertige Schaubild wurde von uns nachbearbeitet und mit Menschen versehen, um einen Maßstab unter „realen“ Bedingungen zu erhalten.



2. Entwurf - Überprüfung durch Modell (haptisch)



Ein haptisches Modell war neben dem Rendering die zweite Methodik, die Entscheidungen zu überprüfen und einen „greifbaren“ Eindruck des Objekts zu bekommen.

Das Modell wurde aus dünnem Blech gefertigt, da dieses Material die Fähigkeit besitzt, sich manuell gut verbiegen zu lassen. Die Form des Maßstabsmodells konnte dem realen Objekt natürlich nur möglichst genau angenähert werden, die Überprüfung konnte aber durch das parallel erstellte Rendering und einer darauffolgenden Überlagerung beider Eindrücke dennoch erfolgreich durchgeführt werden.



3. Recherche - Inhaltsverzeichnis

3.1 Einführung (K03 | S02)

3.2 Faserbeton_ allgemeine Grundlagen (K03 | S07)

3.2.1 Historische Entwicklung

3.2.2 Allgemeines

3.2.2.1 Einsatzgebiete von Faserbeton

3.2.2.2 Wirkungsprinzip von Kurzfasern

3.2.3 Fasertypen

3.2.3.1 Stahlfasern

3.2.3.1.1 Drahtfasern

3.2.3.1.2 Gefräste Stahlfasern

3.2.3.1.3 Blechfasern

3.2.3.1.4 Fasern aus der Schmelze

3.2.3.2 Kunststofffasern

3.2.3.3 Zellulosefasern

3.2.3.4 Kohlenstofffasern (bzw. Carbonfasern)

3.2.3.5 Glasfasern

3.2.3.6 Asbestfasern

3.2.4 Eigenschaften

3.2.4.2 Festbeton

3.2.4.2.1 Verhalten bei Druckbeanspruchung

3.2.4.2.1 Verhalten bei Zug- und Biegebeanspruchung

3.2.4.3 Feuerwiderstand

3.2.4.4 Frostwiderstand, Frost- und Taumittelwiderstand

3.2.4.5 Kriechen und Schwinden

3.3 Textilbewehrter Beton (K03 | S07-S13)

3.3.1 Grundidee des Werkstoffs

3.3.2 Allgemeines

3.3.2.1 Einsatzgebiete von Textilbeton

3.3.3 Aufbau des Werkstoffs

3.3.3.1 Eigenschaften Feinbeton

3.3.4 Verarbeitungsprozess des Werkstoffs Textilbeton

3.3.5. Anwendungsbeispiele in der Praxis

3.3.5.1 Textilbetonbrücken der Uni Dresden

3.3.5.2 Sanierung der Dachkonstruktion der FH Schweinfurt

3.3.5.3 Gebrauchsgüter und Kunstobjekte

3.3.5.3.1 Designobjekte von Martin Kleppe

3.3.5.3.2 Kunstwerke von Hans Hoge

3.3.5.4 Fassadenelemente

3.3.5.4.1 Versuchshalle des Instituts für Massivbau (IMB) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen in Deutschland

3.3.5.5 Fachwerkkonstruktionen

3.3.5.5.1 Rautenfachwerk aus Textilbeton

3.4 Ultrahochfester Beton (UHFB) (K03 | S14-S26)

3.4.1 Allgemeines

3.4.1.1 Vorteile von UHFB gegenüber Normal- und Hochleistungsbeton

3.4.1.2 Kostenvergleich von Normalbeton und ultrahochfestem Beton

3.4.2 Aufbau und Herstellung des Werkstoffs

3.4.2.1 Produktpalette

3.4.2.1.1 DUCTAL®

3.4.2.1.2 CEMTECmultiscale®,

3.4.2.1.3 Duracrete® Advanced

3.4.2.1.4 BSI®

3.4.3 Eigenschaften

3.4.3.1 Festigkeits – und Verformungseigenschaften

3.4.3.2 Nachbehandlung des Frisch- und Festbetons

3.4.3.3 Dauerhaftigkeit

3.4.3.4 Brandwiderstand

3.4.4 Anwendungsbeispiele in der Praxis

3.4.4.1 Seonyu Footbridge

3.4.4.2 Gärtnerplatzbrücke

3.4.4.3 Mautstelle des Millau Viadukts

3.4.4.4 Shawnessy Light Rail Transit Station (Haltestelle der S-Bahn)

3.4.4.5 Treppen aus ultrahochfestem Beton

3.4.4.6 Flying Carpet, Ungerer Museum

3.4.4.7 Villa Navarra

3.4.4.8 Fassadengestaltung – ZAC Paris Gauche

3.4.4.9 Verwaltungsgebäude und Busgarage der RATP in Thiais

3.4.5 Zukunftsperspektiven

3.5 Amorphe Betonarchitektur (K03 | S26-S33)

3.5.1 Museum MARTa, Herford

3.5.1.1 Allgemein

3.5.1.1.1 Kenndaten:

3.5.1.2 Aufbau (räumlich)

3.5.1.3.1 Materialien:

3.5.1.4 Umsetzung

3.5.1.5 Schalungsprozess

3.5.1.5.1 Schalungsbau der amorphen Betonarchitektur des MARTas

3.5.2 MUMUTH, Graz

3.5.2.1 Allgemein:

3.5.2.1.1 Kenndaten:

3.5.2.2 Aufbau (räumlich)

3.5.2.3 Der „Twist“

3.5.2.3.1 Entstehung der Twistgeometrie

3.5.2.3.2 Aufbau (konstruktiv)

3.5.2.3.3 Datentransfer/Planung

3.5.2.3.4 Schalungsprozess

3.6 Quellenangaben (K03 | S34-S43)

3.6.1 Abbildungsverzeichnis

3.6.1.1 Abbildungsverzeichnis Faserbeton

3.6.1.2 Abbildungsverzeichnis Textilbeton

3.6.1.3 Abbildungsverzeichnis Ultrahochfester Beton

3.6.1.4 Abbildungsverzeichnis Amorphe Betonarchitektur

3.6.2 Literaturangaben

3.6.2.1 Literaturangaben_Faserbeton

3.6.2.1.1 Bücher

3.6.2.1.2 Buchauszüge

3.6.2.1.3 Internetressourcen

3.6.2.1.3.1 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel/Skripten

3.6.2.2 Literaturangaben_Textilbeton

3.6.2.2.1 Bücher

3.6.2.2.2 Zeitschriftenartikel

3.6.2.2.3 Internetquellen

3.6.2.2.3.1 Homepages

3.6.2.2.3.2 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel

3.6.2.2.3.3 Videoclips

3.6.2.3 Literaturangaben UHFB

3.6.2.3.1 Bücher

3.6.2.3.2 Internetquellen

3.6.2.3.2.1 Homepages

3.6.2.3.2.2 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel/Skripten

3.6.2.4 Literaturangaben Amorphe Betonarchitektur

3.6.2.4.1 MARTa

3.6.2.4.1.1 Internetquellen

3.6.2.4.1.1.1 Homepages

3.6.2.4.1.1.2 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel/Skripten

3.6.2.4.2 MUMUTH

3.6.2.4.2.1 Zeitschriftenartikel

3.6.2.4.2.1 Internetquellen

3.6.2.4.2.1.1 Homepages

3.6.2.4.2.1.1 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel/Skripten

3.Recherche - Einführung - Faserbeton_allgemeine Grundlagen

3.1 Einführung

Stahlbeton generell kann quasi als der erfolgreichste und bedeutendste Baustoff des vergangenen Jahrhunderts bezeichnet werden. Sein Erfolg ist begründet in der nahezu perfekten Kombination zweier Baustoffe, einerseits Beton zur Abtragung von Druckkräften und andererseits Bewehrungsstahl zur Aufnahme von Zugkräften.¹

Prinzipiell kann festgestellt werden, dass die Motivation der Menschen immer höher und größer zu bauen, die Entwicklung von neuen und leistungsfähigen Materialien antreibt. Viele dieser Entwicklungen können diesbezüglich auch auf den Baustoff Beton zurückgeführt werden. Ein Material welches schon bei den Römern unter dem Namen „opus caementitium“ bekannt war und aus dem schon in der damaligen Zeit monumentale Bauwerke errichtet wurden, als Beispiel kann hier das Pantheon in Rom angeführt werden. Bis heute hat sich daran nichts geändert, tagtäglich findet das Standardmaterial Beton in den unterschiedlichsten Einsatzgebieten Anwendung.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die neuen technischen Möglichkeiten im Betonbau, der Fokus liegt hier in der Thematik des Faserbetons und seiner Entwicklung in den vergangenen Jahrzehnten. Die einzelnen Kapitel umfassen vorerst den Faserbeton und seinen Eigenschaften generell, danach erfolgt eine Erläuterung des Textilbetons sowie auch des ultrahochfesten Betons. Abschließend werden bereits realisierte Projekte, bestehend aus amorphen Betonbauteilen, genauer vorgestellt.

3.2 Faserbeton_allgemeine Grundlagen

Dieses Kapitel gibt einen allgemeinen Überblick über die Materialien der zu verwendenden Fasern, generell wird die Thematik der Kurzfasern im Speziellen behandelt. Der Werkstoff Textilbeton, welcher aufgrund der beigemengten Fasern auch zu den Faserbetonen zählt, wird in einem nachfolgenden Beitrag genauer erläutert.

3.2.1 Historische Entwicklung

Der Grundgedanke, die Eigenschaften spröder Baumaterialien durch die Beimischung von Fasern zu verbessern, ist nicht neu. Schon in der Antike fand dieses Verfahren seine Anwendung, indem Strohfasern und Tierborsten zu Verstärkung und Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von luftgetrockneten Lehmziegeln eingesetzt wurden.

Auch die Beimischung von Hexel- und Pflanzenfasern konnte bei Lehmbauten aus dem Altertum in den ältesten bisher entdeckten Siedlungen im mesopotamischen - iranischen Grenzgebiet nachgewiesen werden.²

Durch diese Vorgehensweise sollten Risse im Baustoff reduziert werden, bzw. die Tragfähigkeit nach erfolgter Rissbildung dennoch gewährleistet werden.

In der Neuzeit wurde Ende des 19. Jahrhunderts in Kalifornien wie auch in Frankreich Beton mit beigemengten Stahlfasern und Stahlstücken für Forschungszwecke hergestellt.

Im Jahre 1874 wird schließlich das erste Patent im Bezug auf Stahlfaserbeton von A. Berard im US-Bundestaat Kalifornien eingereicht, welches gewissermaßen als Beginn der modernen Entwicklung dieses Baustoffes gelten kann. Das Patent beschäftigt sich mit der Verstärkung des Betons durch die Beimischung von Stahlabfällen.

Prinzipiell war das Ziel der Entwicklung von Faserbeton durch die Zugabe von Fasern das Gefüge des ungerissenen Betons (Zustand I) und die Übertragung der Zugspannungen des gerissenen Betons (Zustand II) zu verbessern.³

¹ Vgl.: Bergmeister,2010,S.459-S.460

² Vgl.: König,2001,S.293

³ Vgl.: Zimmermann,2007,S.58

Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts wurde der Baustoff Faserbeton kontinuierlich weiter entwickelt und diverse Patente im Bezug auf diese Thematik angewendet.

Zu einer Intensivierung der praktischen Anwendung kommt es aber erst Mitte bis Ende des 20. Jahrhunderts.

3.2.2 Allgemeines

Im flüssigen Zustand ist Beton fast beliebig formbar, im festen Zustand weist der Baustoff eine hohe und dauerhafte Druckfestigkeit auf, die Zugfestigkeit ist jedoch ziemlich gering, weshalb entsprechende Maßnahmen bezüglich dieser Tatsache getroffen werden müssen.

Bei herkömmlichem Stahlbeton kann die geringe Zugfestigkeit durch Stabstahleinlagen kompensiert werden.

Beim Baustoff Faserbeton werden dem Beton bei der Herstellung Stahl-, Kunststoff-, oder Glasfasern zugesetzt, welche dann im Verbund mit dem Beton wie eine Bewehrung wirken und das Öffnen von Rissen hemmen. Bei größeren Dehnungen entstehen zwar viele kleine Risse im Beton, welche aber in der Regel unschädlich sind.

Voraussetzung für die Materialwahl der Fasern sind zugfeste und dehnfähige Eigenschaften sowie die Dauer der Haltbarkeit des gewählten Materials im alkalischen Milieu des Betons.

Man unterscheidet beim Faserbeton zwischen langen durchgehenden Fasern (z.B. textilbewehrter Beton) die in Richtung der zu erwartenden Zugbeanspruchung in Form von Gittern oder Matten einzulegen sind und zwischen kurzen Fasern, welche mit dem Beton vermischt werden.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Unterschied zwischen klassischem Stahlbeton und den daraus entstandenen Weiterentwicklungen Faserbeton (kurze Fasern) und Textilbeton.

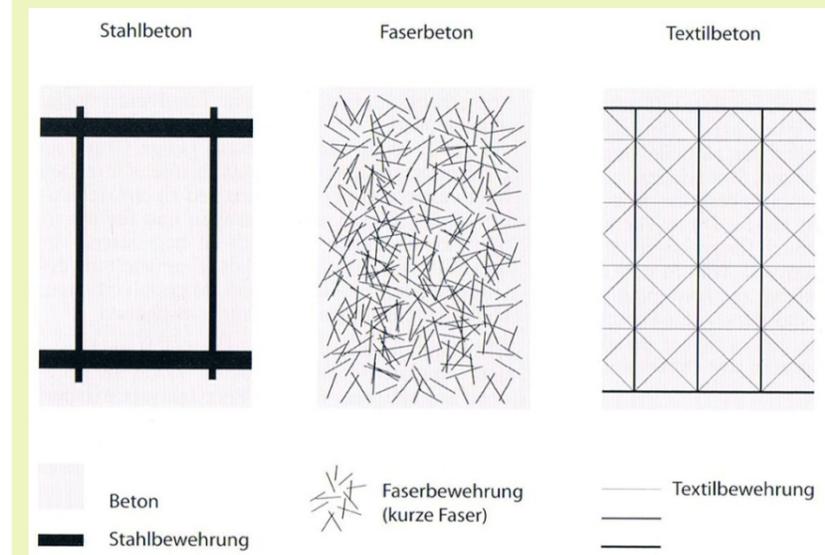


Abbildung 1: Vergleich von verschiedenen Bewehrungssystemen

Wenn man die Thematik des Faserbetons behandelt, ist es wichtig zwischen Kurzfaserbeton und Textilbeton eine Grenze zu ziehen. Beide Betonarten beinhalten in ihrer Matrix Fasern, teilweise bestehend aus gleichen Materialien, weshalb eine Gleichsetzung beider Baustoffe unter der Bezeichnung „Faserbeton“ nahe liegt. Spricht man von den Materialien der Fasern, mag diese gemeinsame Bezeichnung zutreffen, geht es aber um die Eigenschaften und den Herstellungsprozess, wird es nötig zu differenzieren.

3.Recherche - Faserbeton_allgemeine Grundlagen

Das Prinzip des Kurzfaserbetons erklärt sich dadurch, dass dem Beton bei der Herstellung kurze Fasern, bestehend aus verschiedenen Materialien, beigemischt werden. Die häufigste Anwendung in diesem Bereich finden hochfeste Stahldrähte und AR-Glas, eine genauere Erläuterung dieser Thematik findet sich im Kapitel „Fasertypen“. Dadurch, dass die Kurzfasern während dem Herstellungsprozess mit dem Beton vermischt werden, sind sie im vollendeten Bauteil, im Gegensatz zu Textil- und Stahlbeton, wo die Bewehrungen gezielt eingelegt werden, zufällig verteilt. Gewisse Herstellungsverfahren lassen zwar eine gewisse Ausrichtung der Fasern zu, prinzipiell muss die Verteilung aber dennoch als zufällig bezeichnet werden.⁴

Kurzfaserbeton unterscheidet sich von Textilbeton und Stahlbeton auch insbesondere durch seinen Versagensmechanismus. Im Bruchzustand kommt es bei Kurzfaserbeton zu einem so genannten Faserzug, wodurch ein sehr hohes Arbeitsvermögen (= Duktilität) erreicht wird. Hierbei ist es jedoch wichtig zu gewährleisten, dass die Beanspruchung beim Auszug der Faser unterhalb der Faserfestigkeit bleibt, da dies sonst zur Versprödung des Materials führt. Textilbeton und Stahlbeton hingegen versagen, wenn die Materialfestigkeit der Bewehrung erreicht wird.⁵

3.2.2.1 Einsatzgebiete von Faserbeton

- Tresor- und Schutzraumbau
- Spritzbeton (Hangsicherungen, Tunnel- und Stollenbau)
- Industriefußböden /Fahrbahnsanierungen
- Maschinenfundamente
- Fertigteile
- dichte Bauteile
- Bauten in Erdbebengebieten
- hochbeanspruchte Verkehrsflächen

Der Einsatz vom so genannten „modernen“ Stahlfaserbeton ohne konstruktive oder statische Bewehrung ist besonders interessant, da auf kostenintensive Bewehrungsarbeiten verzichtet werden kann. Vor allem im Fertigteilbau ist der Einsatz jener besonders gefragt, da diverse Träger und Elementwände mit einer hohen Tragfähigkeit und geringem Gewicht hergestellt werden können.

3.2.2.2 Wirkungsprinzip von Kurzfasern

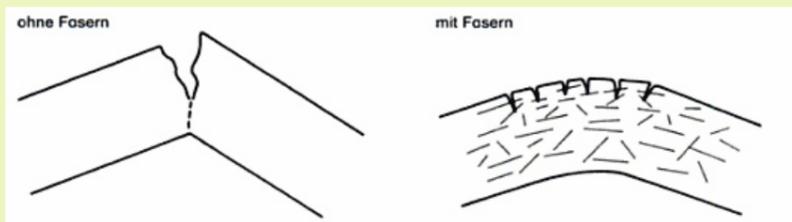


Abbildung 2: Verteilende Wirkung von Kurzfasern im Beton

Bei der Rissbildung des Betons müssen die in die Matrix eingebauten Fasern die beiden Rissufer zugfest miteinander verbinden, sowie die Übertragung von nennenswerten Zugkräften gewährleisten.

⁴ Vgl.: Bergmeister,2010,S.461

⁵ Vgl.: Bergmeister,2010,S.461

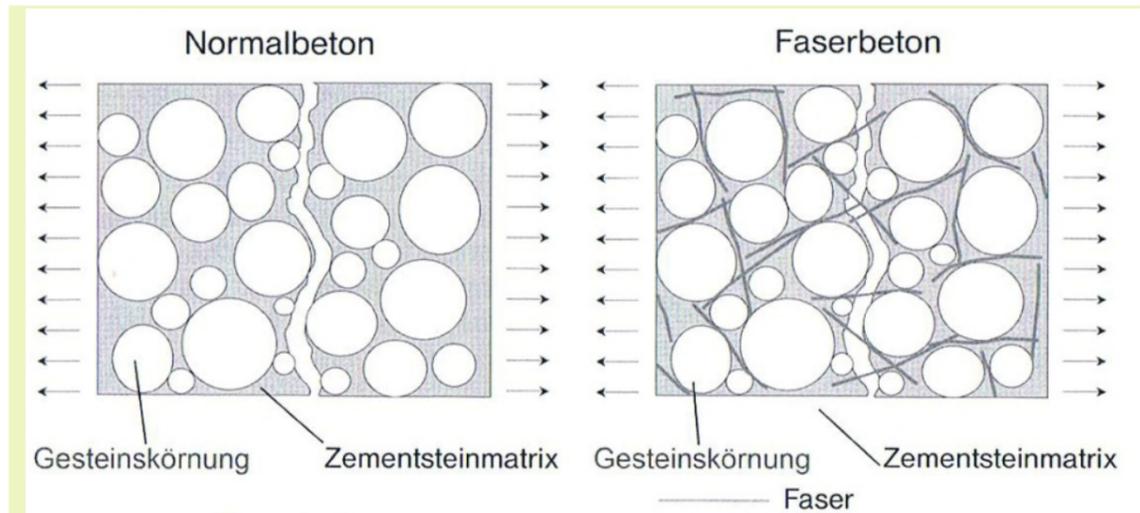


Abbildung 3: Vergleich von unbewehrtem Normalbeton und Faserbeton in gerissenem Zustand

3.2.3 Fasertypen

3.2.3.1 Stahlfasern

Schon seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts werden unterschiedliche Arten von Stahlfasern, welche sich im Produktionsverfahren, in der Geometrie und im Ausgangsmaterial unterscheiden, hergestellt. Stahlfasern sind in dichtem alkalischem Beton ohne Einwirkung von Chloriden gut gegen Korrosion geschützt, nur in feuchten Randzonen kann Rost einigen Fasern einen Schaden zufügen, wodurch jedoch im Normalfall keine großen Schäden der Oberfläche verursacht werden.

Die heutzutage gebräuchlichsten Stahlfasern kann man bezüglich ihres Herstellungsprozesses in folgende Kategorien unterteilen:

3.2.3.1.1 Drahtfasern

Max. Zugfestigkeit: ca. 2000 N/mm²

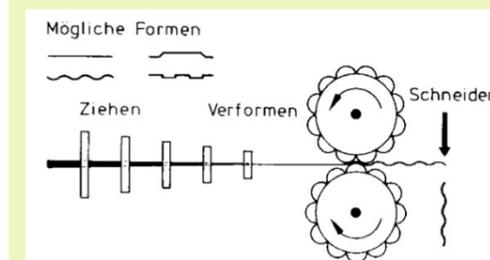


Abbildung 4: Herstellung von Drahtfasern

Diese Faserart, welche am häufigsten zur Anwendung kommt, wird mithilfe des Düsenziehverfahrens produziert. Das Prinzip erklärt sich dadurch, dass zuerst ein Draht durch immer feinere Düsen gezogen wird, um anschließend von zwei gegenläufigen Walzen geformt und anschließend abgeschnitten zu werden. Die Walzen erlauben eine vielfältige Anzahl von Formungsmöglichkeiten, wie diverse Endaufbiegungen und Oberflächenstrukturierungen des Drahts. Ein Korrosionsschutz kann durch Fasern aus Edelstahl bzw. ein nachträgliches Zinkbad der Stahlfasern gewährleistet werden.

3.Recherche - Faserbeton_allgemeine Grundlagen

3.2.3.1.2 Gefräste Stahlfasern

Max. Zugfestigkeit: ca. 800 N/mm²

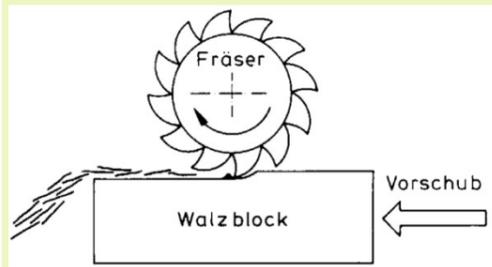


Abbildung 5: Herstellung von gefrästen Stahlfasern

Diese Fasern werden durch fräsen aus stählernen Walzblöcken, auch Brammen genannt, gewonnen. Das Ergebnis sind, bedingt durch das Verfahren, spröde und unregelmäßige gespänte Fasern mit einer glatten Außen- und einer rauen Innenseite, sowie einem sichelförmigen Querschnitt.

3.2.3.1.3 Blechfasern

Zugfestigkeiten: 400 – 800 N/mm² (abhängig von der Materialgüte des Blechs)

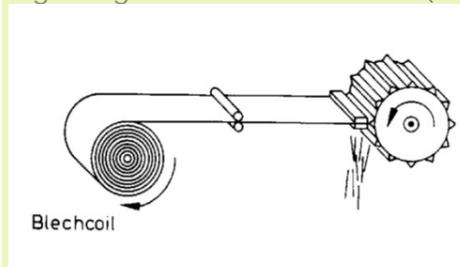


Abbildung 6: Herstellung von Blechfasern

Bei diesem Verfahren werden die Fasern aus einem dünn gewalztem Blech geschnitten. In einem weiteren Arbeitsschritt können die Fasern mithilfe von Druck plastisch verformt werden, wodurch wie bei den Drahtfasern, Endverankerungen und Oberflächenprofilierungen erzeugt werden können.

3.2.3.1.4 Fasern aus der Schmelze

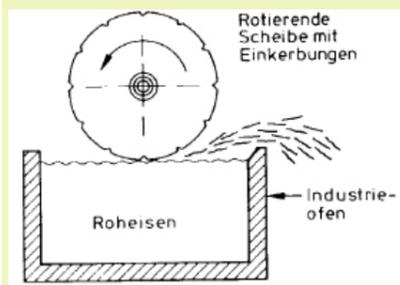


Abbildung 7: Herstellung von Fasern aus der Schmelze

Diese Faserart entsteht, indem eine rotierende Scheibe mit Einkerbungen Material aus der Schmelze entnimmt, welches unmittelbar erstarrt.

Auf dem Markt sind eine Reihe verschiedener Stahlfasern erhältlich, die sich in der Herstellung der beschriebenen Verfahren voneinander unterscheiden und welche in der nachfolgenden Abbildung in einer Übersicht vorgestellt werden.

			Firma	Markenname	Bemerkung
	○	A	Trefil	WIREX	Einzelfasern
	○	A	ARBED	EUROSTEEL	
	□	B	Australian Wire	FIBRESTEEL	
	○	A	Bekaert	DRAMIX	zu Bündeln verklebt
	○	A	National-standard	DUOFORM	
	◐	D	National-standard	MELT-EXTRACTED	
	◐	C	HAREX Stahlfasertechnik	HAREX	sichelförmige Stahlspäne Einzelfasern
	○	A			
	◑	A	Stax		
	○	A	Thibo		
	□	B	US-Steel		Blechfasern

A: aus Wahldraht gezogen
 B: aus Blechstreifen geschnitten
 C: aus Blöcken gefräst
 D: direkt aus der Schmelze hergestellt

Abbildung 8: Verschiedene Stahlfaserprodukte diverser Hersteller

Der Fasergehalt eines Baustoffs wird meist in Vol.-%, bezogen auf das Betonvolumen angegeben.

3.2.3.2 Kunststofffasern

Kunststofffasern bestehen aus Polymeren, ihre Differenzierung erfolgt aufgrund ihrer chemischen Bestandteile. Als Fasermaterial werden vorwiegend Polypropylen, Polyacrylnitril, Polyamid, Polyaramid oder Polyester verwendet, welche sich im alkalischen Milieu des Betons als sehr beständig erwiesen haben. Die Steifigkeit von Kunststofffasern ist jedoch sehr gering, weshalb ihre Wirkung im Beton erst nach der Rissbildung erfolgt.

3.Recherche - Faserbeton_allgemeine Grundlagen

3.2.3.3 Zellulosefasern

Als natürlicher Baustoff der Pflanze zur Bildung ihrer Zellwände ist Zellulose weltweit fast unbegrenzt verfügbar, da die Fasern aus diversen Pflanzen wie z.B. Hanf, Baumwolle, Sisal, Elefantengras, Jute etc. gewonnen werden können, hauptsächlich wird jedoch Holz zur Fasergewinnung herangezogen. Die Verwendung in zementgebundenen Werkstoffen ist wegen der geringen Beständigkeit einer natürlichen Faser im alkalischen Milieu beschränkt, als verflochtene Zellulosematten finden die Fasern jedoch teilweise eine Anwendung in textilbewehrtem Beton.

3.2.3.4 Kohlenstofffasern (bzw. Carbonfasern)

Die Herstellung von Kohlenstofffasern erfolgt durch die Verkohlung von organischen Fasern unter hoher Temperatureinwirkung. Der überwiegende Teil (ca. 90 %) der verwendeten Fasern wird aus Polyacrylnitril (PAN) gewonnen. Prinzipiell gibt es auch die Möglichkeit, Carbonfasern aus Pech (pitch fibres) oder Cellulose zu gewinnen, der Anteil am Markt ist aber hier ziemlich gering.

Carbonfasern zeichnen sich durch ihren hohen E-Modul (doppelt so groß wie der von Stahl) und ihre hohe Festigkeit (entspricht jener von hochfestem Stahl), sowie ihre chemische Resistenz gegenüber Säuren und Basen aus. Nachteilig ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber Oberflächenbeschädigungen, weshalb die Fasern mit einem Kunstharzüberzug geschützt werden. Eine häufige Anwendung finden die Carbonfasern im relativ neuen Anwendungsgebiet des Textilbetons.

3.2.3.5 Glasfasern

Glasfasern werden vorwiegend im Düsenziehverfahren hergestellt, das bedeutet ein Ausziehen von zähviskosen Glasschmelzen aus Platinspindüsen. Die aus den Düsen austretenden Einzelfäden, die sogenannten Filamente, werden mit einer Schlichte besprüht, zu Spinnfäden zusammengeführt und schließlich auf Spulen aufgewickelt. Die Spinnfäden können anschließend zu Rovings (= Bündel/Strang aus Fasern/Filamenten), Vliesen, Glasfasermatten und weiteren Produkten weiter verarbeitet werden.

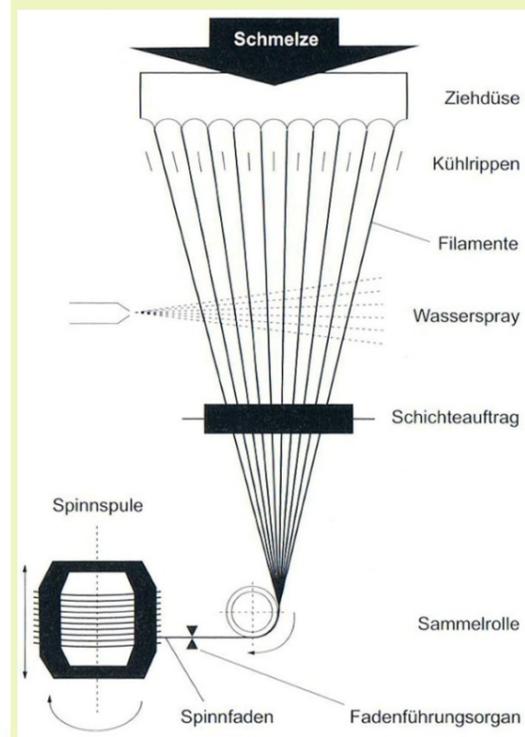


Abbildung 9: Herstellung von Glasfasern /Düsenziehverfahren

Nur wenige Glasfaserarten können in Verbindung mit zementgebundenen Werkstoffen verwendet werden, da sie in der alkalischen Umgebung des Betons unbeständig sind und es an der Glasoberfläche zu lochfraßähnlichen Korrosionen kommt, welche schließlich die Festigkeit des Werkstoffs beeinträchtigen (Silikatgläser wie A- oder E-Glas). Um die Glasfasern in Verbindung mit dem Beton nutzen zu können, müssen sie einer chemischen Modifikation unterzogen werden, wodurch die Alkalibeständigkeit zunimmt. Es handelt sich bei diesem nachbehandelten Endprodukt um das sogenannte AR-Glas (AR-Glas = alkali resistent), ein Soda-Zirkon-Glas, welches erstmalig von der englischen Firma Pilkington entwickelt wurde.

3.2.3.6 Asbestfasern

Asbestfasern sind sehr beständig gegen aggressive Lösungen, haben eine hohe Zugfestigkeit (bis 3.500 N/mm²) und einen hohen E-Modul (160.000 N/mm²), zudem sind sie feuerbeständig. Sie werden jedoch wegen ihrer gesundheitsgefährdenden Wirkung, aufgrund von Staubbildung bei der Herstellung, Verarbeitung und Nutzung nicht mehr eingesetzt.

Tabelle 1: Eigenschaften ausgewählter Fasern verschiedener Materialien

Einstufung der Alkalibeständigkeit : - gering; 0 mäßig; + gut; ++ sehr gut;

Fasertyp	Dichte [kg/dm ³]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Bruch-Dehnung [%]	Alkalibeständigkeit [-]	max. Temperatur [°C]	Dicke [µm]
Stahl	7,80	500 bis 2600	200	5 bis 35	++	1000	100 bis 500
Glas: E-Glas	2,60	2000 bis 4000	75	20 bis 35	-	800	8 bis 15
AR-Glas	2,70	1500 bis 3700	75	20 bis 35	+	800	12 bis 20
Kohlenstoff: Standard-Modul (HT)	1,75 bis 1,91	3000 bis 5000	200 bis 250	12 bis 35 11 bis 20	++	3000	15
Intermediate-Modul (IM)	1,75 bis 1,91	4000 bis 5000	250 bis 350	4 bis 11			
Hoch-Modul (HM)	1,75 bis 1,91	2000 bis 4000	350 bis 450				
Polypropylen	0,98	450 bis 700	7,5 bis 12	60 bis 90	++	150	50
Polyvinylalkohol	1,30	800 bis 900	26 bis 30	50 bis 75	++	240	13 bis 300
Polyester	1,40	800 bis 1100	10 bis 19	8 bis 20	0	240	10 bis 50
Polyacrylnitril	1,20	600 bis 900	15 bis 20	60 bis 90	++	150	13 bis 104
Aramid	1,40	2700 bis 3600	70 bis 130	21 bis 40	0	600	12
Zellulose	1,20 bis 1,50	200 bis 500	5 bis 40	30	-	150	15 bis 60
Asbest	3,40	3500	200	20 bis 30	++	1000	0,02 bis 0,4

3.Recherche - Faserbeton_allgemeine Grundlagen

3.2.4 Eigenschaften

Nachfolgende Ausführungen beschränken sich auf die Thematik des Kurzfaserbetons.

3.2.4.1 Frischbeton

Die Rohdichte des Betons wird durch die Beimischung von Fasern kaum verändert, doch aufgrund der Tatsache, dass sich die Verdichtung des Faserbetons etwas schwieriger als die von Normalbeton gestaltet, kann es zu einer größeren Anzahl von Lufteinschlüssen kommen.

Hinsichtlich der Faserverteilung und der Faserorientierung spielt das Größtkorn des Zuschlags eine wichtige Rolle. Wenn die Zuschlagkörner größer als der mittlere Faserabstand sind, kommt es zu einer Faserkonzentration sowie zu einer unregelmäßigen Faserverteilung. Die maximale Größe der Zuschlagkörner beschränkt sich also auf 1/3 bis 1/2 der Faserlänge, um den oben genannten negativen Effekten entgegen zu wirken. In feinkörnigen Beton lassen sich demzufolge mehr Fasern einmischen als in grobkörnigen, normalerweise 0,4 – bis 3 Vol.-%, bei speziellen Verarbeitungstechniken und Verwendung von Zusatzmitteln sind auch höhere Fasergehalte möglich, bei speziellen Stahlfaserbetonen können sogar Fasergehalte von 10 bis 20 Vol.-% erreicht werden.



Abbildung 10: Einfluss der Korngröße auf Faserorientierung, Faserverteilung und Verarbeitbarkeit

3.2.4.2 Festbeton

3.2.4.2.1 Verhalten bei Druckbeanspruchung

Die Druckfestigkeit des Faserbetons wird vor allem durch seine Zusammensetzung bestimmt. Wenn der Fasergehalt im Beton sehr hoch ist, kann die Druckfestigkeit eines faserbewehrten Betons im Vergleich mit einem nichtbewehrtem Beton der gleichen Zusammensetzung abnehmen. Dies geschieht aufgrund von „Igel“ Bildungen (= Zusammenballen der Fasern) und einer hoher Stahlfaserkonzentration (> 5 Vol.-%), welche zu einer erhöhten Porosität des Baustoffs führen können. Diese Entwicklung konnte vor allem bei Versuchen an hochfesten Faserbetonen festgestellt werden.

3.2.4.2.1 Verhalten bei Zug- und Biegebeanspruchung

Das Bruch- und Verformungsverhalten bei Zug- und Biegebeanspruchung vom Baustoff Faserbeton wird durch die Faktoren E-Modul, Zugfestigkeit und Verbundverhalten der Fasern sowie auch vom Fasergehalt maßgebend beeinflusst.

Bei Fasern, deren E-Modul kleiner ist als der der Betonmatrix, ist keine Einwirkung auf die Risslast und somit keine Steigerung der Festigkeit zu erwarten. Fasern hingegen, deren E-Modul höher ist als der des Betons, bewirken je nach Material eine mehr oder weniger große Risshemmung.

Die nachfolgende Abbildung zeigt Vergleiche von Kraft- und Verformungsdiagrammen von Zug- und Biegeversuchen bei normalem Beton (linke Seite) und Faserbeton (rechte Seite). Das duktile Nachriss-

verhalten lässt sich anhand der Grafik deutlich erkennen, dass heißt, die Kräfte können durch die Stahlfasern über die Risse hinweg übertragen werden.⁶

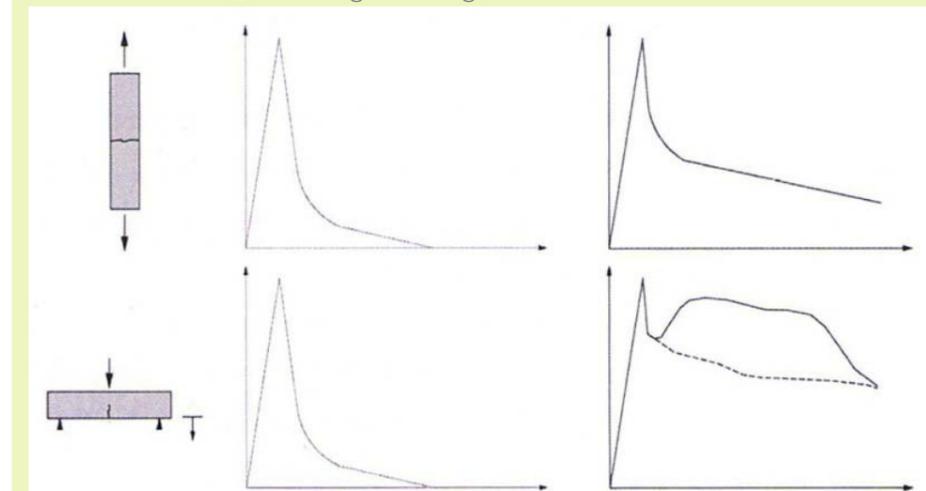


Abbildung 11: Vergleich von Beton und Stahlfaserbeton in gerissenem Zustand

Insbesondere bei einer mehrachsigen Beanspruchung eines Bauteils weisen Faserbewehrungen ein besseres Verhalten auf als Stabbewehrungen. Prinzipiell erreichen Fasern ihre optimale Wirkung, wenn sie wie eine Stabbewehrung auch in Richtung der Zugspannung eingebettet sind. Die Faserorientierung im Raum ist nicht immer gleichmäßig, Einfluss darauf nehmen Einbauvorgänge sowie Verdichtungs Vorgänge. Insbesondere in Rand- und Eckbereichen einer Schalung kann eine dreidimensionale Orientierung aufgrund von physikalischen Ursachen nicht immer gewährleistet werden.

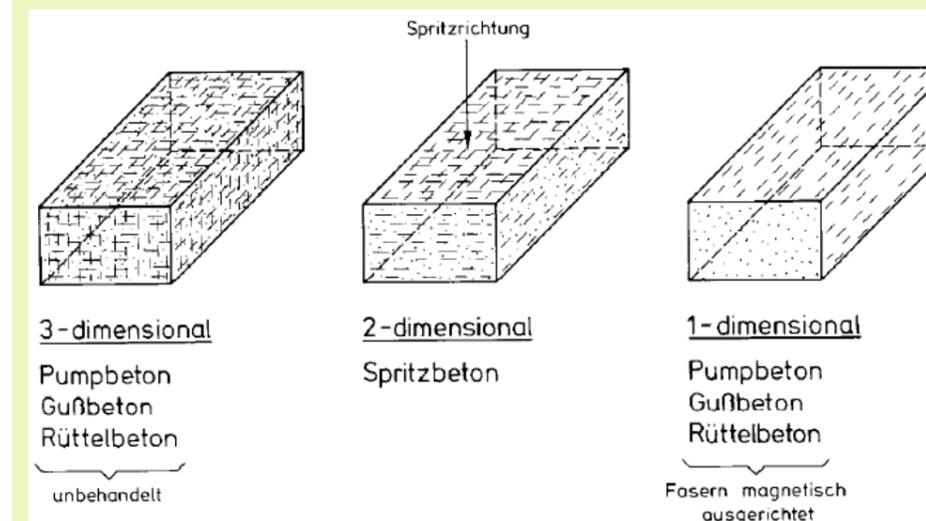


Abbildung 12: Beispiele für mögliche Faserorientierungen

3.2.4.3 Feuerwiderstand

Der Feuerwiderstand eines Bauteils aus Faserbeton wird durch die Zugabe von Fasern positiv beeinflusst, da die Fasern bereits durch die Hitze abgeplatzte Betonteile zusammenhalten, wodurch die darunter liegende Matrix vor der Hitzeeinwirkung des Feuers geschützt wird.

⁶ Vgl.: Zimmermann, 2007, S.60

3.Recherche - Faserbeton_allgemeine Grundlagen - Textilbewehrter Beton

3.2.4.4 Frostwiderstand, Frost- und Taumittelwiderstand

Ein Faserbeton, der durch Frost und Tauwechsel beansprucht wurde, zeigt ein ziemlich ähnliches Verhalten wie ein vergleichbarer Normalbeton. Auf jeden Fall ist es wichtig, den erforderlichen Luftporengehalt für Frost-/Taumittelangriff einzuhalten.

3.2.4.5 Kriechen und Schwinden

Die vorliegenden der Literatur entnommenen Versuchsergebnisse - diese Thematik betreffend - erweisen sich als widersprüchlich. Den größten Einflussfaktor auf das Schwinden und Kriechen nimmt das Betonrezept selbst.

3.3 Textilbewehrter Beton

3.3.1 Grundidee des Werkstoffs

Textilbewehrter Beton kann als neuartiger, innovativer Verbundwerkstoff mit erstaunlichem Leistungspotenzial bezeichnet werden, denn er ist hervorragend dafür geeignet, den Leichtbau im Bereich des Betons zu revolutionieren.

Den Grundstein für diesen Werkstoff legte eine Gruppe von Wissenschaftlern vor über 15 Jahren an den technischen Universitäten Dresden und Aachen in Deutschland.⁷

Das Grundprinzip dieses Baustoffs entstand aus der Idee, extrem schlanke, leistungsfähige sowie gleichzeitig auch dünnwandige Elemente mit einer hohen Zugtragfähigkeit mithilfe des Einsatzes von technischen Textilien, bestehend aus Hochleistungsfasern, herzustellen.

3.3.2 Allgemeines

Generell besteht textilbewehrter Beton aus technischen Textilien und der sie umgebenden Matrix. Genauer gesagt werden mehrere Lagen von Hochleistungstextilien in eine Feinbetonmatrix eingebettet, welche dann als Bewehrung wirken und somit für die Aufnahme der Zugkräfte verantwortlich sind.

Am häufigsten werden Carbon- oder alkaliresistente Glasfasertextilien eingesetzt, welche im Vergleich mit einer klassischen Stahlbewehrung nicht korrosionsanfällig sind. Herkömmlicher Stahlbeton stößt bei Bauteildicken von 60 bis 80 mm aufgrund der erforderlichen Mindestüberdeckung des Betonstahls an seine Grenzen, weshalb eine filigrane Bauweise mit diesem Material sozusagen nicht möglich ist.

Da der Korrosionsschutz der Bewehrung bei Textilbeton entfällt, können die Textilien nur wenige Millimeter unterhalb der Oberfläche angeordnet werden. Aufgrund dieser Tatsache kann das Potenzial des neuen Werkstoffs voll ausgenutzt werden, da mit diesem Baustoff die Realisierung von hochfesten, dünnwandigen Tragwerkstrukturen bei Wandstärken zwischen 10 und 30 mm, welche auch geometrisch komplexe Formen aufweisen können, möglich wird.

⁷ Vgl.: Bergmeister,2010,S.459

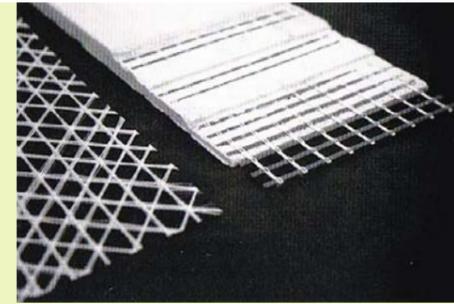


Abbildung 13: Typisches Erscheinungsbild von Textilbeton

3.3.2.1 Einsatzgebiete von Textilbeton

- Verstärkung und Instandsetzung
(*Balken, Platten, Stützen*)
- Neue Bauteile/Bauwerke
(*Fassadenelemente, Schalentragwerke, Dach-und Balkonbauteile, Tragwerkselemente, Lärmschutzwände, dichte Behälter...etc.*)
- Halbfertigteile
(*bauteilintegrierte Schalungen, Schalungselemente*)
- Industrieprodukte
(*Designprodukte, Möbel- und Wohnaccessoires*)
- Kunst
(*Skulpturen, Betonbilder...etc.*)

Prinzipiell kann der Werkstoff für die Herstellung von neuen Bauteilen verwendet werden, eignet sich aber auch zur Verstärkung einer schon vorhandenen Struktur. In Zukunft werden sich für den innovativen Textilbeton sicher noch viele neue Einsatzgebiete finden.

3.3.3 Aufbau des Werkstoffs

Der Verbundwerkstoff Textilbeton besteht im Allgemeinen aus zwei Komponenten, einerseits aus Hochleistungstextilien, welche für die Aufnahme der Zugkräfte verantwortlich sind, andererseits aus einem neu entwickelten Feinbeton mit einer hohen Leistungsfähigkeit, welcher die Druckkräfte aufnimmt.

Normalbeton beinhaltet grobkörnigen Kies, welcher die Maschen der Textilien blockieren würde, dem Feinbeton aber wird feiner Sand zugesetzt, damit dieses Problem nicht zustande kommen kann. Der Werkstoff Feinbeton enthält auch einen höheren Zementanteil als klassischer Normalbeton, um die Maschen der Textilien besser durchdringen zu können. In vollzogenen Bruchtests, durchgeführt an der Universität Dresden, zeigt sich auch die höhere Belastbarkeit von Feinbeton im Gegensatz zu Normalbeton. In der Rezeptur des Feinbetons finden sich auch Flugasche und Mikrosilica, diesen Inhaltsstoffen wird die Aufgabe zuteil, den Verbund der Matrix zu verstärken.

3.Recherche - Textilbewehrter Beton

3.3.3.1 Eigenschaften Feinbeton

Bestandteile:

Zuschlag, Zement, Flugasche, Mikrosilica, Wasser

Festigkeiten:

30.....100 N/mm² (Druck)

2.....8 N/mm² (Zug)

E-Modul:

20.000 35.000 N/mm²

pH-Wert:

11,0.....12,5

Größtkorn:

1,0 mm oder je nach Anwendung bis 4 mm ⁸

Das Textilgewebe wird vorwiegend aus AR-Glasfasern und Carbonfasern gesponnen und anschließend auf einer Textilmaschine zu einem Gelege verarbeitet. Durch Forschung anhand von Versuchsmodellen, beispielgebend in diesem Forschungsbereich muss hier die Uni Dresden genannt werden, wird die ideale Faserbeschichtung ermittelt, um den Textilbeton noch widerstandsfähiger zu machen und die optimale Haftung zwischen Beton und Faser zu erreichen.



Abbildung 14: Einbettung von AR-Glasrovings eines Textils im Beton

Die Belastbarkeit des Textilbetons ergibt sich also aus der Dichte des Zementsteins und dessen optimaler Haftung an die widerstandsfähige, flexible Textilfaser.

3.3.4 Verarbeitungsprozess des Werkstoffs Textilbeton

Textilbeton wird quasi laminiert, das heißt Beton und Textilmatten werden nacheinander Schicht um Schicht aufgetragen. Bei größeren Bauteilen wird der Feinbeton aufgesprüht, bei kleineren Teilen kann der Beton mit einer Handkelle auf die Schalung aufgetragen werden, danach werden die Fasermatten zugeschnitten, angepasst und anschließend in die noch zähe Konsistenz des Betons hineingedrückt. Dieser Prozess wird dann mehrmals wiederholt, bis die erforderliche Schichtdicke erreicht ist.

⁸ Offermann, Vorstellung Deutsches Zentrum Textilbeton, 24.01.2008



Abbildung 15: Herstellung von Textilbeton

3.3.5. Anwendungsbeispiele in der Praxis

3.3.5.1 Textilbetonbrücken der Uni Dresden

Im Jahre 2006 wurde die erste öffentlich zugängliche Textilbetonbrücke für die Landesgartenschau in Oschatz realisiert, geplant von den beiden Diplomingenieuren Silvio Weiland und Dirk Jesse von der Fakultät für Bauingenieurwesen an der TU Dresden. Ein erster Prototyp dieser Brücke wurde bereits im Jahre 2005 gebaut, im Labor ausführlichen Tests unterzogen und anschließend am Gelände der Universität aufgestellt. Da die Werte der diversen Tests alle Erwartungen übertrafen und die Brücke laut den Tragfähigkeitsnachweisen mehr als die geforderte Mindestlast trägt, stand der anschließenden Realisierung nichts mehr im Weg.



Abbildung 16: Belastungstest Prototyp Oschatz (2005)

Die neun Meter lange und drei Meter breite Fußgängerbrücke mit einer Bauteildicke von nur drei Zentimetern besteht aus zehn Segmenten, welche jeweils eine Länge von 90 cm aufweisen. Das Gewicht der Brücke beläuft sich auf 5 Tonnen, eine vergleichbare Brücke aus Stahlbeton würde ca. 25 Tonnen wiegen. Die einzelnen Segmente wurden im Betonwerk vorgefertigt und schließlich vorgespannt. Danach wurde die so im Werk zusammengesetzte Brücke zu ihrem Einsatzort bei der Landesgartenschau transportiert.

3.Recherche - Textilbewehrter Beton



Abbildung 17: Transport und Aufbau der Textilbetonbrücke in Oschatz

Im Jahre 2007 wurde schließlich eine zweite Textilbetonbrücke, eine Fußgängertrasse über die Rollach in Kempten/Deutschland realisiert, sie kann als Weiterentwicklung der Brücke in Oschatz bezeichnet werden, da sie ein noch schlankeres Tragwerk aufweist. Prinzipiell ist sie mit fast 17 Metern länger als ihre Vorgängerin und besteht aus 18 Einzelsegmenten.



Abbildung 18: Fußgängertrasse über die Rollach in Kempten

Im Gegensatz zu Stahl- und Holzbrücken sind Brücken aus textilbewehrtem Beton sehr wartungsarm, da kostenintensive Streifarbeiten entfallen. Auch sanierungsbedürftige, schon bestehende Brücken können durch den Einsatz von Textilbeton kostengünstig verstärkt werden.

3.3.5.2 Sanierung der Dachkonstruktion der FH Schweinfurt

Die Sanierung der doppelt gekrümmten Dachkonstruktion über dem Hörsaal der FH Schweinfurt in Deutschland ist ein gutes Beispiel für den Einsatz von Textilbeton zur Verstärkung von baufälligen Bestandsobjekten.

Bei diesem im Jahre 1962 erbauten, sanierungsbedürftigem Dach aus Stahlbeton, handelt es sich um eine sogenannte Hyperschale, welche im Innenbereich zwischen den vier Mittelstützen lediglich eine Dicke von 8 cm aufweist. Im Laufe der Jahre wurden die Spannungen im Bereich der Hochpunkte so groß, dass es zu starken Verformungen kam.



Abbildung 19: Hyperschale der FH Scheinfurt vor den Sanierungsarbeiten

Für die Rekonstruktion, welche 2007 ihren Anfang nahm, bot sich der Baustoff Textilbeton insbesondere an, da sich der neue leichte Verbundwerkstoff ohne große Veränderungen der Grundstruktur anpasst. Auch seine große Temperaturbeständigkeit gereicht dem textilverstärkten Beton zum Vorteil, das Material ist für Dachkonstruktionen, welche sich in den Sommermonaten stark aufheizen können, sehr gut einsetzbar.

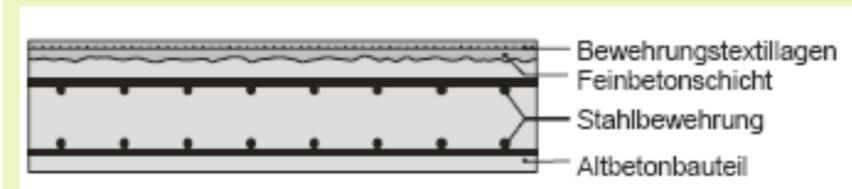


Abbildung 20: Verstärkungsprinzip der Hyperschale

In der obigen Darstellung ist das Prinzip der Verstärkung des Schalentragerwerks gut erkennbar. Die Textil-lagen und der Feinbeton werden Schicht für Schicht auf die bestehende Konstruktion aufgetragen, um die Tragfähigkeit der Hyperschale wieder zu gewährleisten.

3.Recherche - Textilbewehrter Beton

Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen den Sanierungsprozess mit dem neuartigen Werkstoff.



Abbildung 21: Aufbringen der textilen Verstärkungsstruktur auf die bestehende Dachkonstruktion

3.3.5.3 Gebrauchsgüter und Kunstobjekte

Der Werkstoff Textilbeton bietet aufgrund von diversen Faktoren, wie z.B. leichte Verarbeitbarkeit und Formbarkeit, gute Anpassungsfähigkeit, Temperaturunempfindlichkeit ... etc., die besten Voraussetzungen, kreative Vorstellungen im Bereich von Kunst und Design zu realisieren. Nachfolgend werden einige Beispiele, diese Bereiche betreffend, kurz vorgestellt.

3.3.5.3.1 Designobjekte von Martin Kleppe

Martin Kleppe, geboren 1973, studierte von 1993-1999 an der Kunstakademie Düsseldorf (Meisterschüler bei Prof. Tony Cragg) und wurde bekannt durch seine Realisierungen von Designobjekten mithilfe des Werkstoffs Textilbeton. Die für die Herstellung der Kunstobjekte benötigten Materialien, Feinbeton sowie alkaliresistentes Glas- oder Carbonfasergelege, stellt dem Künstler die TU Dresden (Deutschland) zur Verfügung. Aufgrund der Resistenz des Materials können die Objekte im Innen- sowie auch im Außenbereich ihre Anwendung finden.

Für seine Skulptur ohne Namen konnte der Bildhauer schon einen Kunstförderpreis für sich beanspruchen. Die Titulierung der Arbeit erklärt sich dadurch, dass Martin Kleppe folgendes darüber sagt: „Ich gebe nur die Form meiner Skulptur vor. Worum es sich dabei handelt, müssen die Betrachter selbst entscheiden“.



Abbildung 22: Martin Kleppe, Skulptur ohne Namen, 2006

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein weiteres Designstück des Künstlers, ein Tisch in Form einer Halbkugel. Die Wandstärke beträgt nur 3 mm - um einen tiefen Schwerpunkt zu erzielen wurde im unteren Bereich des Objekts ein Gewicht eingebracht.



Abbildung 23: Martin Kleppe, Tisch aus Textilbeton, 2007

3.3.5.3.2 Kunstwerke von Hans Hoge

Der deutsche Künstler Hans Hoge wurde im Jahre 1968 in Dresden geboren und studierte zuerst Physik an der Universität Halle (1988-1991) und danach Bildhauerei an der Kunstakademie Düsseldorf (1994-1999, Meisterschüler bei Prof. Tony Cragg).

Der Künstler schuf schon diverse Skulpturen aus textilbewehrtem Beton, teilweise wurde der Feinbeton, um den Anforderungen des Künstlers gerecht zu werden, sogar eingefärbt.

Besonders bekannt ist seine Skulptur Paul und Paula aus dem Jahre 2003, eine einen Meter hohe Figur mit zwei Köpfen aus rötlich eingefärbtem, textilbewehrtem Beton.



Abbildung 24: Hans Hoge, Paul und Paula, 2003

3.Recherche - Textilbewehrter Beton

3.3.5.4 Fassadenelemente

Aufgrund seines geringen Gewichts und seiner hohen Dauerhaftigkeit erweitert der Verbundwerkstoff Textilbeton das Anwendungsspektrum des Fassadenbaus insbesondere im Bereich der Vorsatzschalen (z.B. Fassadenplatten). Textilbeton ermöglicht die Verwirklichung von schlanken, leichten Fassadenbauteilen, welche aufgrund des geringen Materialverbrauchs auch kostengünstig eingefärbt und strukturiert werden können, was eine architektonisch hochwertige Oberfläche ermöglicht. Aufgrund des Einsatzes von Feinbeton ist zudem eine sehr scharfkantige Ausführung der Bauteile möglich.

Kleinformatige Textilbetonplatten finden schon seit einiger Zeit ihre Anwendung im Fassadenbau, die Befestigung erfolgt meistens anhand von metallischen Unterkonstruktionen (Stud-Frame-Systeme), welche mit Hinterschnittdübeln an den Fassadenplatten befestigt werden. Aufgrund der geringen Fläche der Platten ist meistens eine große Anzahl von Befestigungsmitteln nötig, was gleichzeitig viele Montageschritte voraussetzt.⁹

Nachfolgend wird aufgrund dieser Tatsache ein Pilotprojekt der RWTH Aachen vorgestellt, in welchem großformatige Fassadenelemente aus Textilbeton zum Einsatz kommen, wodurch die Montagezeiten, zwecks Minimierung der Befestigungselemente, reduziert und dadurch ein wirtschaftlicher Vorteil erzielt werden konnte.

3.3.5.4.1 Versuchshalle des Instituts für Massivbau (IMB) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen in Deutschland

In einem Forschungsprojekt der RWTH Aachen wurde eine großformatige Fassadenplatte aus Textilbeton mit einer Elementfläche von 12,2 m² und einer Plattendicke von 30 mm entwickelt, die Praxistauglichkeit der Forschungsergebnisse wurde in einem Pilotprojekt getestet.

Prinzipiell handelt es sich bei diesem Projekt um eine Versuchshalle mit integrierten Büroräumen des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen. Das Entwurfsziel, eine möglichst homogene Hülle zu schaffen, wurde mithilfe von großformatigen Bekleidungselementen aus Textilbeton mit einer Gesamtfläche von 400 m² und einer Maximalfläche des Einzelements von 12,2 m² (2,51 m x 4,88 m) erreicht.



Abbildung 25: Ansicht der Südfassade des Neubaus + Ansicht eines Einzelements (maximale Abmessung)

⁹Vgl.: Hegger, J., Dünnwandige, großformatige Fassadenelemente aus Textilbeton, Dresden, 2009, S.542

Grundsätzlich wurden für die hinterlüftete Fassade zwei Hauptelemente aus Textilbeton verwendet, nur an den Gebäudeecken war der Einsatz von Sonderelementen nötig.

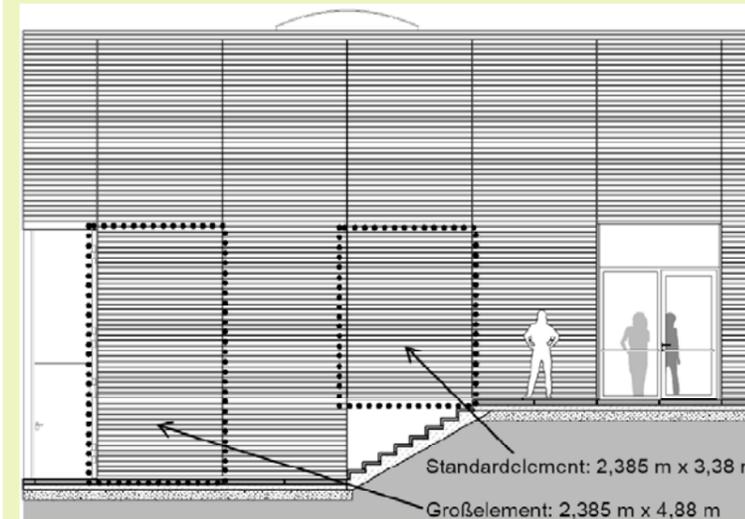


Abbildung 26: Elementtypen - Fassadenausschnitt Nordseite

Das Ziel, die Platten nur an wenigen Punkten aufzuhängen, aber auch die Abmessung der großformatigen Bauteile selber, erforderte eine Aussteifung der Tafeln unter Zuhilfenahme von vertikalen Betonstegen an der Rückseite.

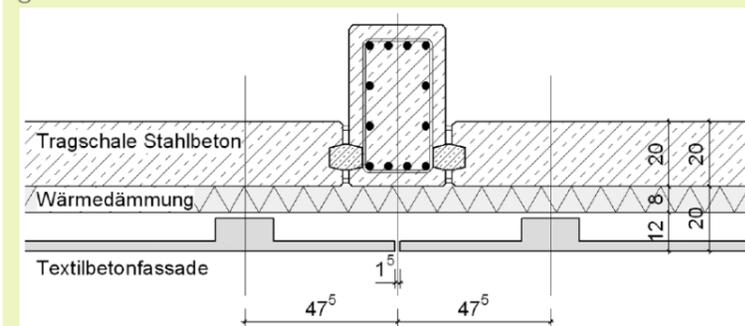


Abbildung 27: Horizontalschnitt Fassade -Tragwerk

Die Textilbetonelemente wurden durch handelsübliche Befestigungsmittel, welche in den Betonstegen angeordnet sind, an der Tragstruktur befestigt.

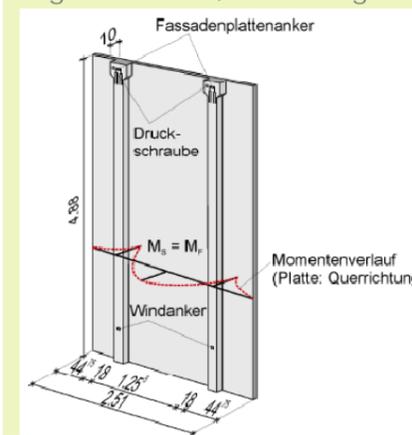


Abbildung 28: Rückansicht einer Fassadenplatte

3.Recherche - Textilbewehrter Beton

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht, dass die Plattenbewehrung anhand von ebenen Textilien erfolgen konnte, bei den Stegen war eine der Form angepasste Bewehrung nötig.

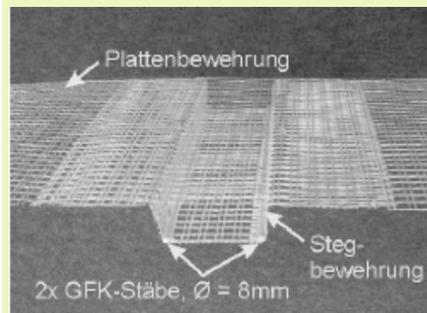


Abbildung 29: Bewehrungsstruktur des Fassadenelements

Bei der Herstellung der Platte konnte das für Textilbeton typische Laminierverfahren angewendet werden. Im Falle des Steges war dieses Verfahren nicht möglich, der Beton wurde aus diesem Grund, wie die unten folgende Abbildung verdeutlicht, durch die Textilbewehrung hindurch gegossen.

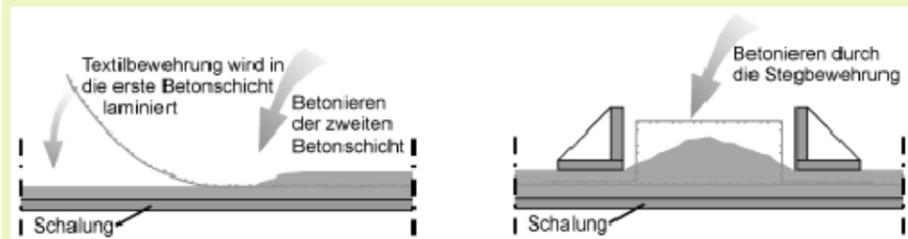


Abbildung 30: Betonierverfahren: links: Laminieren der Platte, rechts: Gießen des Steges

Um die Leistungsfähigkeit der im Beton eingelegten Textilien noch zu verstärken, wurden sie mit Epoxidharz getränkt, die aufnehmbaren Spannungen werden im Vergleich zu unbeschichteten Textilien um das zwei- bis dreifache gesteigert.

3.3.5.5 Fachwerkkonstruktionen

Mit Textilbeton können aufgrund seiner Leichtigkeit sehr filigrane Konstruktionen hergestellt werden. Das nachfolgende Projekt zeigt eine demontierbare Fachwerkstruktur aus rautenförmigen Elementen, welche die Forderung nach einer nachhaltigen Bauweise erfüllt.

3.3.5.5.1 Rautenfachwerk aus Textilbeton

Die Idee, ein Bogentragwerk aus rautenförmigen Gitterstrukturen herzustellen, ist nicht neu. Im Hallenbau wird dieses Konstruktionsprinzip schon seit gut hundert Jahren angewendet. Der Vorteil eine solche Struktur aus Textilbeton herzustellen, liegt in der filigranen Ausführung der Bauteile sowie auch im geringen Eigengewicht.

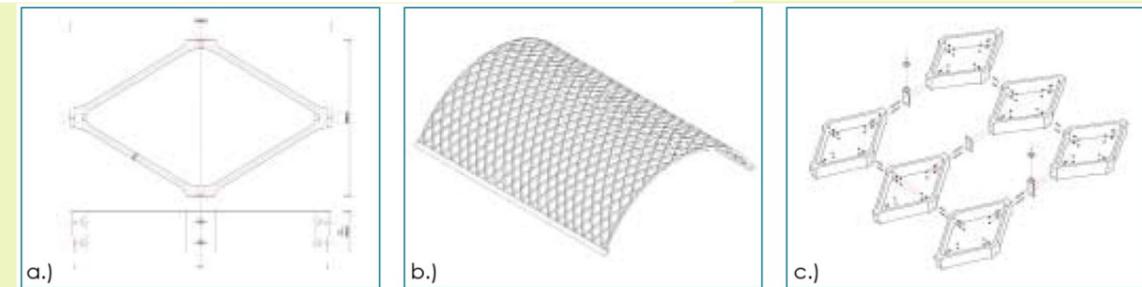


Abbildung 31: a.) Abmessungen Rautenelement

b.) Isometrie der Gesamtstruktur

c.) Isometrie der Bauteilfügung mit integrierten Anschlussbauteilen für Hüllkonstruktionen

Das vorliegende Fertigteilssystem, bestehend aus rautenförmigen Elementen aus Textilbeton, wurde an der RWTH Aachen in Deutschland, im Rahmen eines Forschungsprojektes, entwickelt. Es ermöglicht eine Überspannung im Bereich von acht bis fünfzehn Metern. Ein Grundmodul mit den Außenabmessungen 1000 mm x 600 mm x 160 mm (l x b x h) und einer Wandstärke von 25 mm bildet die Basis der Konstruktion. Die Verbindung der einzelnen Elemente untereinander erfolgt mithilfe von Schraubverbindungen, genauer genommen mit jeweils 2 Schraubbolzen M8, welche in einbetonierten Stahlhülsen geführt werden. An den Eckpunkten sind die Rautenelemente abgeflacht, die so entstandenen Kontaktflächen ermöglichen ein einfaches Fügen der einzelnen Rauten. Um eine stabile Konstruktion und gleichzeitig das Versenken von Schraubköpfen zu gewährleisten, wurden die Einzelsegmente in den Knotenpunkten verstärkt. Schraubbolzen zwischen den stumpfen Stößen der Bauteile sorgen für den Anschluss von Verkleidungen.

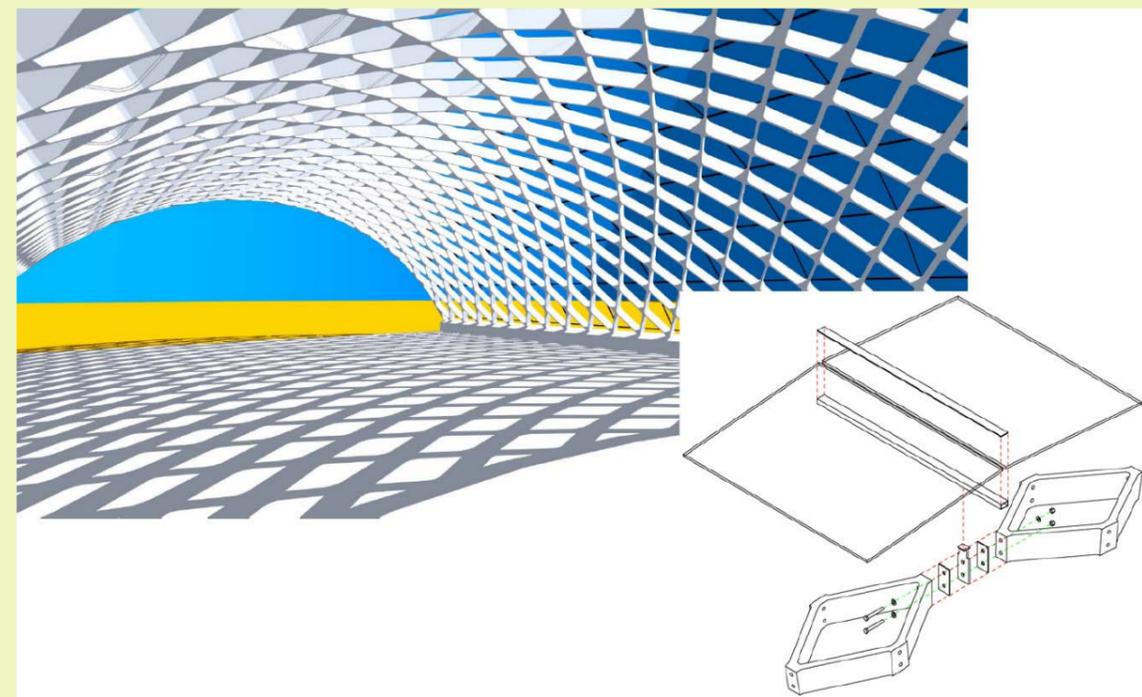


Abbildung 32: Anwendungsbeispiel: Rautenfachwerktonne

3.Recherche - Textilbewehrter Beton - Ultrahochfester Beton (UHFB)

Die Tragfähigkeit der einzelnen Elemente wurde durch verschiedene Bauteilversuche nachgewiesen. Im Bezug auf die Bewehrung des Fertigteilelements wurde mit einem Carbongelege gearbeitet.

Die Schalung des Einzelsegments ist zweiteilig und besteht somit aus einem inneren Kern und äußeren Formteilen, welche beide demontierbar ausgeführt wurden. Als Material kam CNC gefräster Kunststoff aus PVC und PE- Teilen zum Einsatz. Aufgrund der einfachen Geometrie konnte der Schalungsvorgang liegend erfolgen, die hohe Fließfähigkeit des eingebrachten Betons erforderte daraufhin nur einen kurzen Rüttelvorgang, um die gleichmäßige Verteilung in der Schalung zu gewährleisten. Die Ausschalung des Bauteils war schon nach 24 Stunden möglich, danach war ein Schleifen der Oberseite des Elements nötig, damit eine gleichmäßige Oberflächenstruktur erreicht werden konnte. Letztendlich wurden die Textilbetonrauten noch sieben Tage lang im Wasser gelagert.

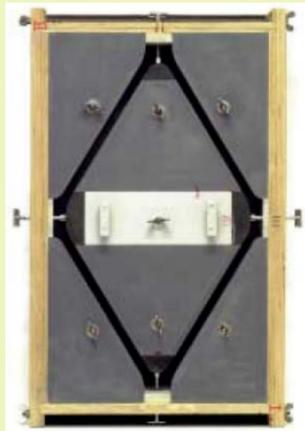


Abbildung 33: Schalung einer Raute

Schließlich konnte ein Prototyp bestehend aus drei parallelen Bogenreihen mit jeweils 12 Rauten realisiert werden.

Gesamtabmessungen des Prototyps:

- Spannweite 10 m
- Stichhöhe 3 m
- Bauwerksbreite 1,8 Meter

Gesamtgewicht: 900 kg

Eigengewicht Einzelelement: 25 kg



Abbildung 34: Prototyp des Rautenfachwerks aus Textilbeton

Der Aufbau der Konstruktion wurde von beiden Auflagern aus gleichzeitig gestartet und aufgrund der hohen Genauigkeit der vorgefertigten Elemente konnten die beiden Bogenteile im Scheitel letztendlich passgenau zusammengefügt werden. Grundsätzlich erfolgte der Aufbau ohne Hilfe von maschinellen Hebwerkzeugen, sondern nur unter Einsatz von Hilfsgerüsten und Stützmaterial. Zur einfacheren Handhabung wurden jeweils 3 Rautenelemente zu einer Gruppe vormontiert. Eine Problematik gab es aber wegen der scharfen Konturen der Bauteile, da mechanische Einwirkungen zu Beschädigungen während des Montagevorgangs führten. Entwicklungsbedarf besteht auch noch im Herstellungsverfahren, welches, um eine Marktreife des Produktes zu erreichen, beschleunigt werden müsste.

3.4 Ultrahochfester Beton (UHFB)

3.4.1 Allgemeines

Der sogenannte ultrahochfeste Faserbeton wurde ab 1990 von der Firma Bouygues in Frankreich entwickelt und das erste Mal unter der Bezeichnung „Béton de poudres réactives“ (BPR), was ins Englische übersetzt Reactive powder concrete (RPC) bedeutet, vorgestellt.

Im deutschen Raum spricht man, wenn die Thematik den ultrahochfesten Beton meint, von UHFB (Ultra-hochfester Beton), aber auch die Bezeichnung UHPC (Ultra High Performance Concrete) erweist sich als geläufig. Doch die Problematik im Bezug auf die Bezeichnungen ist jene, dass es keine klar definierte Trennung zwischen den einzelnen Begriffen gibt, weshalb auch der Überbegriff Hochleistungsbeton gerne verwendet wird.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen grobkörnigen (Größtkorn ab 1mm) und feinkörnigen (Größtkorn bis 1mm) ultrahochfesten Betonen. Genau genommen werden die ultrahochfesten Feinkornbetone als RPC und die ultrahochfesten Grobkornbetone als UHPC bezeichnet. Doch in der Literatur gibt es oftmals Überschneidungen zwischen den Bezeichnungen, weshalb nicht jeder Autor mit demselben Begriff das Gleiche meint. Die nachfolgende Abhandlung verwendet als Überbegriff UHFB, was in diesem Fall alle ultrahochfesten Betone, unabhängig von der Körnung, meint.

Um einen Beton als „ultrahochfest“ klassifizieren zu dürfen, muss er eine Druckfestigkeit von mehr als 150 N/mm² aufweisen.

Ultrahochfester Beton kann quasi als Hightech Werkstoff bezeichnet werden, da sich filigrane und leichte Konstruktionen aus Beton verwirklichen lassen, die vor der Entwicklung dieses Baustoffs nur aus dem Werkstoff Stahl herstellbar waren. Durch sein geringes Eigengewicht gereicht es dem ultrahochfesten Beton zum Vorteil, dass nun auch z.B. im Brückenbau weitere Spannweiten ausführbar werden. Im Vergleich von herkömmlichem Stahlbeton und ultrahochfestem Beton zeigt sich, dass Querschnitte aus UHFB sehr viel kleiner ausfallen können, als bei Normalbeton mit Stahleinlagen, die Tragfähigkeit ist aber dennoch die Gleiche. Zudem können Teile aus ultrahochfestem Faserbeton, einfacher als bei herkömmlichem Stahlbeton, vorgefertigt werden.

Generell kann man feststellen, dass Rohstoffe und Energie eingespart werden können, ein wichtiger Aspekt in der heutigen Zeit, wo dem Thema der Nachhaltigkeit immer mehr Bedeutung beigemessen wird.

Prinzipiell ist aber immer darauf zu achten, dass die Konstruktion sowie ihre Bemessung auf die besonderen Eigenschaften des Werkstoffs abgestimmt wird, um daraufhin das volle Leistungspotenzial dieses Baustoffs ausnutzen zu können.

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

3.4.1.1 Vorteile von UHFB gegenüber Normal- und Hochleistungsbeton

- hohe Zug- und Druckfestigkeit
- Duktilität des ultrahochfesten Betons
- extrem hohe Undurchlässigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen
- UHFB kann wie Stahl geklebt und geschraubt werden
- UHFB ist schleif- fräs- und bohrbar
- schlanke, filigrane Konstruktionen sind möglich → Ästhetik
- einfaches bewehren
- dauerhafte Konstruktionen/geringer Wartungsaufwand → verbesserte Nachhaltigkeit
- geringe Masse → Ersparnis Materialkosten/Transportgewichte
- schnellere Montage → Lohnkostensparnis

3.4.1.2 Kostenvergleich von Normalbeton und ultrahochfestem Beton

Fakt ist, dass ultrahochfester Beton mit und ohne Stahlfasern mehr kostet, als klassischer, beziehungsweise hochfester Beton. Doch darf man nicht nur die Kosten des Baustoffes im Einzelnen betrachten, zieht man nämlich einen Vergleich zwischen einem Bauwerk aus UHFB und einem gleichen aus Normalbeton, wird sich herausstellen, dass aufgrund von diversen Faktoren, wie Einsparung von Material, intelligenter Bemessung, Verringerung der Transportkosten, niedriger Wartungs- und Instandhaltungskosten, sowie dadurch, dass sich die Herstellung von Fertigteilen aus ultrahochfestem Beton einfacher gestaltet und daher eine schnelle und witterungsunabhängige Montage, unter Einsatz von weniger Hub- und Förderkapazitäten, gewährleistet werden kann, die Baukosten des Bauwerks aus ultrahochfestem Beton in Summe niedriger ausfallen werden, als die des Bauwerks aus Normalbeton. Eine Studie, welche im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Massivbau der Universität Kassel (Deutschland) im Jahre 2000 angefertigt wurde, belegt diese Tatsache. Die Arbeit beschäftigt sich mit einem Alternativentwurf aus ultrahochfestem Beton einer schon gebauten Brücke, nämlich der sogenannten Kylltalbrücke (Deutschland) mit einer Spannweite von 223 Metern, gefertigt aus Normalbeton. Die tatsächlich gebaute Brücke ist eine massive Bogenbrücke, der Vorschlag aus ultrahochfestem Beton besteht aus einem filigranen Bogen und Fachwerkstreben.



Abbildung 35: Kylltalbrücke / Normalbeton

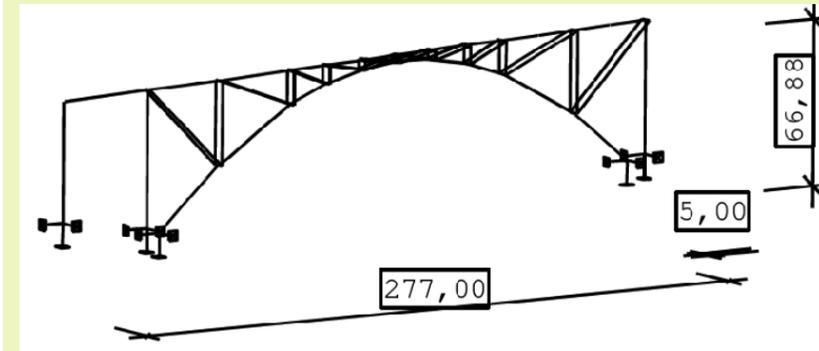


Abbildung 36: Alternativentwurf Kylltalbrücke / UHFB

Die nachfolgende Tabelle zeigt anschaulich den Vergleich der Gesamtkosten beider Versionen.

Tabelle 2: Vergleich von Kosten und Massen einer massiven Brücke aus Normalbeton und einer Alternativmöglichkeit in UHFB / Beispiel Kylltalbrücke

	Ausgeführte Version /Normalbeton	Alternativentwurf/ UHFB
Überbau	400 kN/m	400 kN/m
Bogen	7m*(1,5 – 3,5 m); ca. 400 kN/m	4 Rohre Dm. 609 mm; 40 kN/m
Kosten	Bogen und Ständer: 3,32 Mio. EUR	Bogen, Ständer + Diagonalen 1,78 Mio. EUR

3.4.2 Aufbau und Herstellung des Werkstoffs

Generell besteht ultrahochfester Beton aus Gesteinskörnungen, Wasser, Zement, sowie diversen Zusatzstoffen und Zusatzmitteln. Doch im Vergleich mit konventionellem Beton, weist UHFB einerseits verbesserte mechanische Eigenschaften auf und besitzt andererseits ein viel dichteres Mikrogefüge. Hinsichtlich der Zusammensetzung ist die hohe Packungsdichte des Werkstoffs also das Wichtigste, da nur dadurch Druckfestigkeiten im ultrahochfesten Bereich erreicht werden können. Die hohe Dichte des Gefüges schließt also ein Verbleiben von großen Hohlräumen in der Betonmatrix aus, was durch feine Zusatzstoffe, welche die kleinsten Zwischenräume erreichen können und im besten Fall nicht nur als Mikrofüller, sondern zugleich auch als Bindemittel wirken (z.B. Silicastaube), garantiert werden kann.

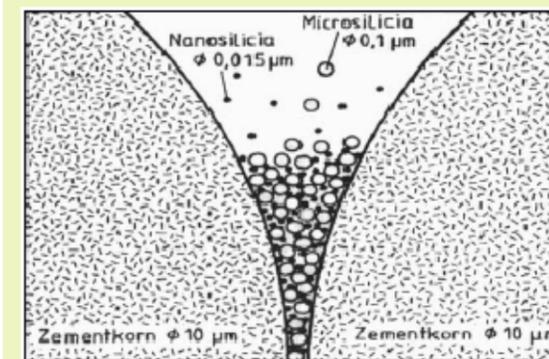


Abbildung 37: Füllereffekt von Silicastaub

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

Ultrahochfeste Betone weisen in ihrer Zusammensetzung meist einen sehr hohen Bindemittelanteil bei einem gleichzeitig sehr geringen Wassergehalt auf, weshalb die Zugabe von Fließmitteln erforderlich ist, ohne die sich dieser Beton nicht verarbeiten lässt und ein optimaler Endzustand nicht gewährleistet werden kann.

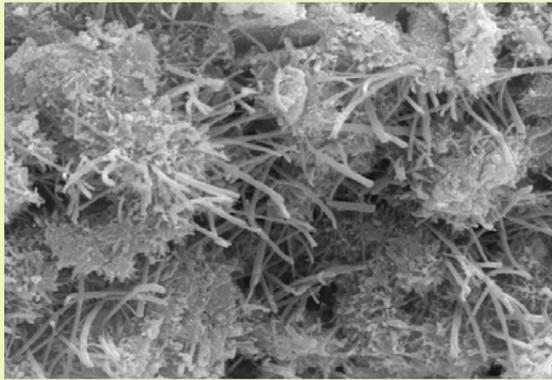


Abbildung 38: Gefüge von Normalbeton; REM Aufnahmen, Bildbreite ca. 20 µm

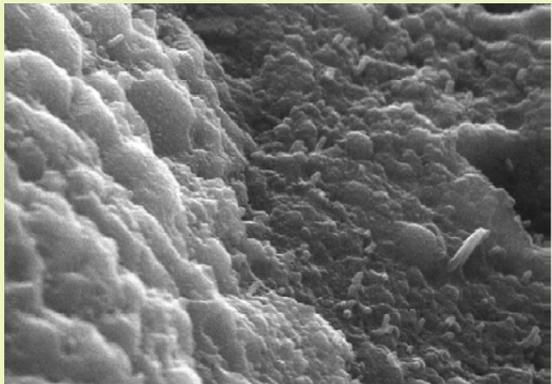


Abbildung 39: Gefüge von ultrahochfestem Beton; REM Aufnahmen, Bildbreite ca. 20 µm

Bezug nehmend auf die Konsistenz gilt es auch zu beachten, dass die meisten Mischungen von ultrahochfesten Betonen in der Regel sehr klebrig sind, d.h. dass für den Einbau eine sehr hohe Verdichtungsenergie erforderlich ist, falls sie nicht durch eine optimale Mischung der Rezeptur selbstverdichtend hergestellt werden. Selbstverdichtende Betone (SVB oder engl. SCC = self compacting concrete) entlüften selbstständig, kurz gesagt können aufwändige Rüttelarbeiten entfallen, wodurch ein wirtschaftlicher Vorteil entsteht.

Im Bereich der ultrahochfesten Feinbetone sind aufgrund des hohen Feinkornanteils, welcher eine Homogenisierung des Frischbetons erschwert, Spezialmischer mit sehr hoher Mischintensität nötig, um ein akkurates Ergebnis zu erzielen. Die nachfolgende Abbildung zeigt solch einen speziellen Mischer, welcher an der TU Graz (Innfeldgründe) für die Mischung von feinkörnigem aber auch grobkörnigem UHFB eingesetzt wird.



Abbildung 40: Mischer für UHFB an der TU Graz

Dem Beton werden, um die Eigenschaften zu verbessern, meistens Stahl- oder hochfeste Kunststofffasern zugegeben, welche den Beton dann gewissermaßen duktil machen. Die ultrahochfesten Betone können durch die Maßnahme der Faserzugabe nun auch Zugkräfte aufnehmen und die klassische Bewehrung wird somit in den meisten Fällen überflüssig.

Im Hinblick auf die Fasern ist noch zu erwähnen, dass bei UHFB der Verbund zwischen der Faser mit dem Zementstein sehr viel fester ist, als bei einem Normalbeton mit eingebetteten Fasern. Bei einem normalen Faserbeton werden die Fasern aus der Matrix heraus gezogen, je mehr sich der Querschnitt verformt. Bei ultrahochfestem Beton ist der Verbund zwischen Betonmatrix und Faser so stark, dass die Fasern teilweise bis zum Bruch beansprucht werden.

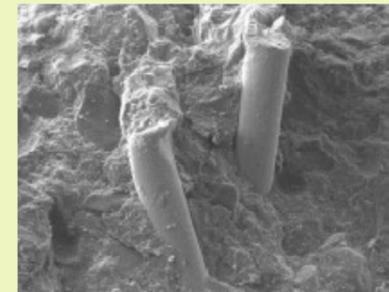


Abbildung 41: Drahtfaser im UHFB – Matrix Bildbreite 1,7 mm



Abbildung 42: Mischungsbestandteile zur Herstellung von UHFB (mit Stahlfasern)

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

3.4.2.1 Produktpalette

Die derzeit am Markt erhältlichen Mischungen zur Herstellung von ultrahochfestem Beton sind aufgrund der nicht sehr hohen Zahl noch relativ überschaubar. Einige ausgewählte Produkte werden nachkom-mend kurz beschrieben.

3.4.2.1.1 DUCTAL®

Das erste erhältliche Produkt war der anfänglich schon genannte BPR (Béton de poudres réactives) der französischen Firma Bouygues, ein ultrahochfester Feinbeton mit Stahlfasern als Bewehrung. Heute kommt diese Mischung nicht mehr zum Einsatz, da die für diesen Beton benötigten Fließmittel mit den neuen Entwicklungen nicht mithalten können. Im Jahre 1992 kam die Weiterentwicklung des BPR unter dem Namen DUCTAL® auf den Markt, ein Produkt mit einer Druckfestigkeit von 160 – 240 N/mm², einer Zugfestigkeit von 10 N/mm² und einer Biegezugfestigkeit von 30 bis 50 N/mm². Die Entwicklung entstand durch eine Zusammenarbeit von der Baufirma Bougyes, dem Chemieunternehmen Rhodia und dem Baustoffhersteller La Farge. Heute werden unter dem Namen DUCTAL® fünf verschiedene Produkte mit unterschiedlicher Zusammensetzung und verschiedenen Fasermaterialien, z.B. Glasfasern, Stahlfasern etc., vertrieben.

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine typische Zusammensetzung eines feinkörnigen ultrahochfesten Betons (DUCTAL® / Firma Lafarge).

Tabelle 3: Typische Zusammensetzung von DUCTAL® in kg/m³

Zement	710
Silikastaub	230
Quarzmehl	210
Sand bis 0,5 mm	1020
Stahlfasern	160
Zusatzmittel	13
Wasser	140
Wasser – Zement – Wert	0,20
Wasser – Bindemittel – Wert	0,15

3.4.2.1.2 CEMTECmultiscale®

Zu erwähnen ist auch noch ein Produkt, welches unter dem Namen CEMTECmultiscale® bekannt ist und von den Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) entwickelt wurde. Für den Hochbau kommt diese Mischung mit Stahlfaserzugabe (bis zu 11 Vol.-%) nicht zum Einsatz, sie ist speziell dem Brückenbau vorbehalten.

3.4.2.1.3 Duracrete® Advanced

Ein relativ neues UHFB – System, unter dem Produktnamen Duracrete® Advanced bekannt, wurde von der Schwenk Zement KG auf dem Markt eingeführt. Abhängig von der Wärmebehandlung können Druckfestigkeiten zwischen 180 N/mm² (20°C) bis ungefähr 280 N/mm² (180°C) erreicht werden.

3.4.2.1.4 BSI®

Ein weiteres, von der Firma Eiffage patentiertes System, welches bei diversen Projekten, erwähnt sei hier die weltweit erste Verkehrsbrücke aus UHFB in Bourg-les-Valece /Frankreich, bei der im Vergleich zu einer konventionellen Ausführung ein Drittel des Eigengewichts eingespart werden konnte, schon erfolgreich zum Einsatz gebracht wurde, ist unter der Bezeichnung Béton Spécial Industriel (BSI®) bekannt. Es handelt sich um einen Beton mit sehr hohem Elastizitätsmodul, der durch die Zugabe von Stahlfasern seine Duktilität erreicht.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Zusammensetzung des BSI®/CERACEM, ein Produkt welches durch die Zusammenarbeit der Firmen SIKA und EIFFAGE entstand.

Tabelle 4: Zusammensetzung des ultrahochfesten Beton BSI®/CERACEM

Bestandteile	Einheit	Menge
Premix: Zement CEM 1, Mikrosilica, gebrochener Zuschlag aus gebranntem Bauxit 0 – 7 mm	kg/m ³	2355
Stahlfasern: lf = 20 mm, dm = 0,3 mm, fs > 1250 MPa	kg/m ³	195
Fließmittel: Polycarboxylat, Marke Sikacret	kg/m ³	44,6
Wasser	kg/m ³	195

In Bezugnahme auf den gebrochenen Zuschlag aus Bauxit ist zu erwähnen, dass jener ein großes E-Modul und eine große Festigkeit aufweist. Die verwendeten Stahlfasern haben keine Endhaken und wurden aus einem hochfesten Stahldraht zugeschnitten, zudem weisen sie eine glatte Oberflächenstruktur auf. Insgesamt handelt es sich aufgrund der großen Zuschläge (bis zu 7 mm) und den relativ dicken Stahlfasern um einen Grobkornbeton, der Faseranteil beläuft sich auf 2,5 Volumenprozent.

Ultrahochfester Beton kann hinsichtlich des Mischprozesses als sehr sensibel eingestuft werden, daher ist darauf zu achten, die vom Hersteller vorgegebene Prozedur zur Herstellung des Produktes genauestens einzuhalten. In der nachfolgenden Tabelle ist die Reihenfolge der Bestandteile, inklusive ihrer Mischungsdauer, das Produkte BSI®/CERACEM betreffend, dargestellt.

Tabelle 5: Mischungsprozedur des BSI®/CERACEM

Bestandteil	Mischungsdauer
Premix	1 Minute
Wasser	3 Minuten
Fließmittel	5 Minuten
Stahlfasern	3 Minuten

Hinsichtlich dieses Baustoffs ist noch darauf hinzuweisen, dass es sich in diesem Fall um ein selbstverdichtendes Produkt handelt, welches ohne Vibrieren oder anderweitigem Verdichten in die Schalung eingebracht werden kann.

Abschließend sind noch einige Produkte aufzuzählen die in dieser Auflistung nicht behandelt werden: Densit®, Contec®, Secutec®

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

3.4.3 Eigenschaften

Druckfestigkeiten: zw. 180 – 280 N/mm²

Zugfestigkeiten (mit Stahlfasern): 15 N/mm²

Biegezugfestigkeiten (mit Stahlfasern) : 50 N/mm²

Ultrahochfester Beton weist aufgrund der Homogenität seiner Matrix sehr spröde Eigenschaften auf, d.h. er verhält sich, vergleichbar mit keramischen Werkstoffen, unter Druck- und Zugbeanspruchung linear elastisch, was im Versagensfall ein schlagartiges Materialversagen bedeutet. Um die hohen Druckfestigkeiten des Baustoffs aber dennoch zu nutzen, ist es vonnöten, die Duktilität durch die Zugabe von Stahlfasern zu erhöhen. Ein duktileres Verhalten eines Baustoffs kann dadurch beschrieben werden, dass eine Umlagerung der Spannungsspitzen von den Lagerstellen in weniger belastete Bereiche ermöglicht wird. Die Zugfestigkeit, die Biegezugfestigkeit, sowie auch die Bruchenergie des Betons können aufgrund dieser Maßnahme deutlich gesteigert werden.

Die Menge der beigemischten Fasern sollte zwischen 2,5 bis 3,5 Vol. % liegen, die Länge bezieht sich, wie im Abschnitt Faserbeton schon erläutert, auf den Größtkorndurchmesser der Gesteinskörnung. Bei den meisten UHFB-Arten kommen Stahlfasern zum Einsatz, welche meistens einen Durchmesser zwischen 0,15 und 0,20 mm aufweisen, die Länge hängt vom Verwendungszweck ab. Im Bezug auf feinkörnigen ultrahochfesten Beton ist zu beachten, dass die Länge der Fasern mindestens zehn Mal dem Größtkorndurchmesser entsprechen sollte.

3.4.3.1 Festigkeits – und Verformungseigenschaften

Die Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton liegt meist bei Werten um die 200 N/mm². Durch die Zugabe von Fasern kann das Tragverhalten nach dem Überschreiten der Druckfestigkeit deutlich verbessert werden, es kommt also zu einer Steigerung der Duktilität. Hier gilt aber zu beachten, dass die Druckfähigkeit selber durch die Zugabe von Fasern nicht erhöht wird, der Einfluss der Fasern beschränkt sich auf die Verbesserung des Nachbruchverhaltens des Betons. Die nachfolgenden Darstellungen von druckbelasteten Prüfcylindern (150 mm x 300 mm) aus ultrahochfestem Beton, getestet an der Uni Kasel, einmal ohne und einmal mit Stahlfasern, verdeutlichen diesen Effekt.



Abbildung 43: Schlagartig gebrochener Prüfcylinder aus UHFB ohne Stahlfasern



Abbildung 44: Prüfcylinder aus UHFB mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern

In den nachfolgenden Abbildungen von typischen Spannungs-Dehnungs-Linien von ultrahochfestem Beton zeigt sich die Verbesserung des Nachbruchverhaltens durch die Zugabe von Fasern nochmals in grafischer Form. Zusätzlich belegt der linear ansteigende Ast die Behauptung, dass keine Steigerung der Druckfestigkeit durch die Zugabe von Fasern zu erwarten ist.

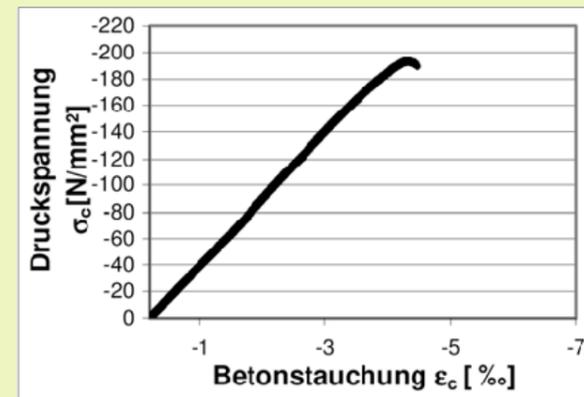


Abbildung 45: Spannungs-Dehnungs-Linie von UHFB ohne Fasern

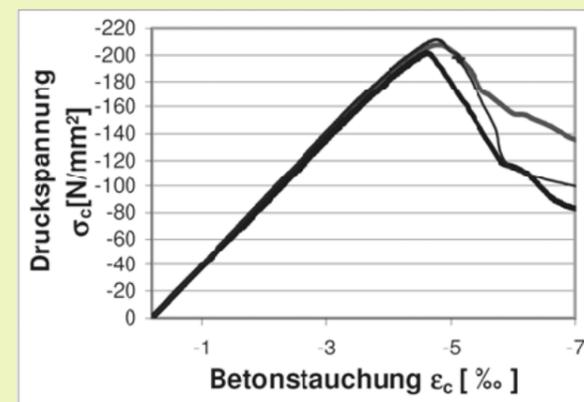


Abbildung 46: Spannungs-Dehnungs-Linien von 3 Probekörpern UHFB mit 2,5 Vol.-% Fasern

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

Die nachfolgende Grafik veranschaulicht den Unterschied der Druckspannungen von normalem Beton (NC= Normal Concrete), über hochfesten Faserbeton (HPC= High Performance Concrete) bis hin zu den ultrahochfesten Faserbetonen (UHPC= Ultra High Performance Concrete, RPC= Reactive Powder Concrete).

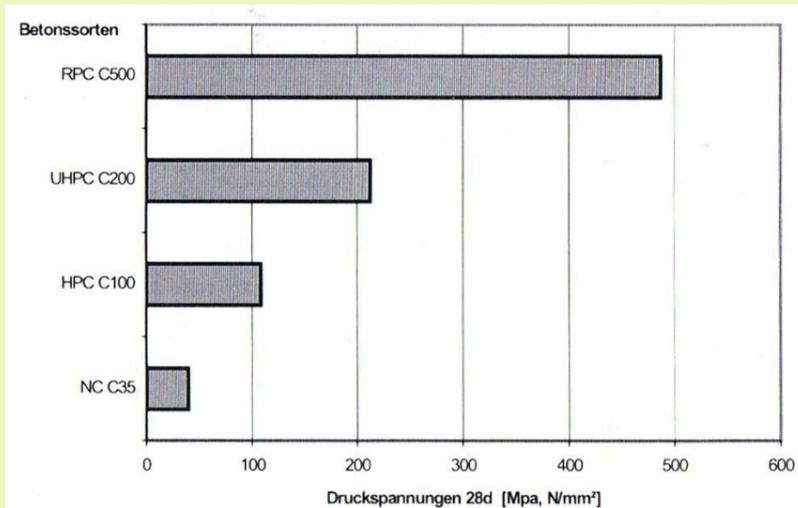


Abbildung 47: Druckspannungen der Faserbetone im Vergleich zu Normalbeton

Durch die Zugabe von Fasern kann man von einer Erhöhung der Zug- und Biegezugfestigkeiten ausgehen. Dies erklärt sich dadurch, dass die Spannungen, welche in den Rissen des Betons entstehen, von den Fasern getragen werden, weshalb eine Verbesserung gegenüber einem Beton ohne Fasern nur logisch erscheint. Die Fasern sorgen also auch unter Zug- und Biegebeanspruchung für ein sicheres duktilen Bruchverhalten mit einem ausgeprägten Nachbruchtragverhalten.

Die Biegezugfestigkeit hängt zudem zu einem großen Teil von der Geometrie und Art der Fasern ab. Durchgeführte Versuche an der Universität Kassel an biegebeanspruchten Balken haben verdeutlicht, dass die Ergebnisse durch die Zugabe von Fasern mit verschiedener Fasergeometrie, verbessert werden konnten. Summa Summarum ließ sich aus diesen erfolgten Versuchen auch ableiten, dass längere Fasern eine höhere Wirksamkeit erzielten, als kürzere mit gleichem Durchmesser.

Generell ist noch anzumerken, dass durch Vorspannung die Zugfestigkeit des ultrahochfesten Betons besonders gut ausgenutzt werden kann, da er sich durch das Überdrücken des Querschnitts äußerst effizient an der Abtragung der Lasten beteiligen kann, daraus folgt, dass die Steifigkeit im Bereich des Gebrauchszustandes erhöht wird und sich im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine große Verformungskapazität ergibt.

Durch die Zugabe von Fasern in den unbewehrten ultrahochfesten Beton kann, abhängig vom Fasergehalt, eine Steigerung des E-Moduls von 10 – 20 % erreicht werden. Generell beläuft sich das Elastizitätsmodul von ultrahochfestem Beton meist um eine Größenordnung von 50.000 N/mm², es sind aber je nach Gesteinskörnung beträchtliche Abweichungen möglich.¹⁰

¹⁰ Vgl.: Bergmeister, 2010 S.420

3.4.3.2 Nachbehandlung des Frisch- und Festbetons

Ultrahochfester Beton läuft nach dem Betoniervorgang aufgrund seines geringen Wassergehalts Gefahr auszutrocknen, Rissbildung an der Oberfläche des Frischbetons, auch „Elefantenhaut“ genannt, ist die Folge. Aus diesem Grund muss der frische Beton entweder durch das Abdecken mit Folien, oder durch das Besprühen mit geeigneten Nachbehandlungsmitteln vor Austrocknung geschützt werden. Eine Steigerung der Druckfestigkeit bis zu 400 N/mm² kann durch eine Druck- oder Wärmebehandlung (bei ca. 90°), bzw. beides in Kombination, nach der Erhärtung erreicht werden.



Abbildung 48: Abdeckung eines geschalteten Bauteils aus UHFB

3.4.3.3 Dauerhaftigkeit

Ultrahochfester Beton ist ein relativ neuer Werkstoff, weshalb es noch keine Langzeitstudien hinsichtlich der Dauerhaftigkeit gibt, prinzipiell ist aber aufgrund seiner Eigenschaften von einer höheren Lebensdauer als bei Normalbeton auszugehen.

Im Vergleich mit dem Normalbeton weist UHFB, wie schon erwähnt, ein sehr viel dichteres Gefüge auf, er kann nahezu als kapillarporenfrei bezeichnet werden. Dies gereicht ihm zum Vorteil, da er aufgrund dieses Faktums nahezu immun gegen das Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen ist und dadurch auch nicht korrodiert. Dieser High-Tech-Beton kann selbst auf Brücken problemlos eingesetzt werden, ohne gegen Chloride und Frost-Tausalz-Schäden geschützt werden zu müssen.

3.4.3.4 Brandwiderstand

Bei sehr starker Hitzeeinwirkung entsteht Dampfdruck im Inneren des Betons, der nach außen hin, oder in die Poren abgebaut werden muss. Aufgrund der sehr dichten Gefügestruktur des ultrahochfesten Faserbetons kann er plötzlich versagen, wenn ihm nur Stahlfasern zugegeben werden, da der entstandene Dampfdruck nicht abgebaut werden kann. Doch Versuche, durchgeführt an der Universität Kassel, haben gezeigt, dass dies verhindert werden kann, indem man dem Beton einen Teil (0,3 – 0,6 Vol.-%) Polypropylenfasern zugibt. Die Begründung dafür ist jene, dass Polypropylenfasern bei Temperaturen über 170°C schmelzen. Dadurch entstehen im Beton Hohlräume, in denen sich der Dampf entspannen kann.

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

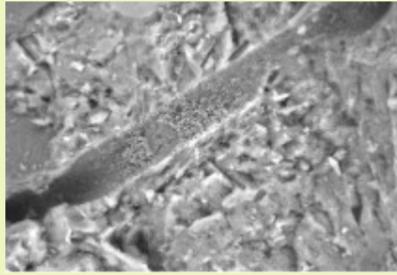


Abbildung 49: Polypropylen – Faserhhlung nach Brandbeanspruchung (1000 – fache Vergrößerung, Bildbreite 120 μm)

Konstruktives Kleben von ultrahochfestem Beton

Das Kleben von Bauteilen aus UHFB bietet eine gute Alternative zu den ansonsten im Betonbau üblichen mechanischen Verbindungsmethoden.

Im Flugzeug- und Automobilbau wird das Kleben als Fugemethode schon seit einigen Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. In Bezug auf die Anwendung des Klebens im Betonbau war diese bisher auf Sanierungsfälle beschränkt, indem beschädigte Betonkonstruktionen mithilfe von CFK-Lamellen, CFK-Gelegen oder Stahllaschenverstrkt wurden.

Im Bereich des ultrahochfesten Betons eignet sich ein Verkleben der Teile miteinander deshalb so gut, da durch die flächige Krafteintragung, in Verbindung mit der gleichmäßigen und zugleich hohen Oberflächenfestigkeit, das Potenzial des Werkstoffs optimal ausgenutzt werden kann. Natürlich muss auch bedacht werden, dass oftmals im Betonbau übliche Verbindungstechniken (z.B. mittels Anschlussbewehrung) zwecks der meist schmalen Bauteilabmessungen nicht ausführbar sind.

Als Klebematerial für die Verbindung von Bauteilen aus UHFB sind mineralisch gefüllte, kalthrtende, zweikomponentige Epoxidharze bestens geeignet. Grundsätzlich kann man feststellen, dass die Fugemethode „Kleben“ angesichts der Zeitersparnis bei der Anwendung eine besonders wirtschaftliche Montagemöglichkeit im Betonbau darstellt, aber da sie in diesem Bereich sehr neu ist, bisher selten zur Anwendung kam.

Ein Referenzprojekt im Bezug auf geklebte Bauteile aus ultrahochfestem Beton stellt die Gärtnerplatzbrücke in Kassel dar, welche im Kapitel „Anwendungsbeispiele in der Praxis“ ausführlich beschrieben wird.

3.4.4 Anwendungsbeispiele in der Praxis

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über bereits realisierte Projekte aus ultrahochfestem Beton geben.

Aufgrund ihrer differenzierten mechanischen Eigenschaften und ihrer außergewöhnlich hohen Dauerhaftigkeit eignen sich die ultrahochfesten Betone insbesondere für den Einsatz von Bauteilen, die hohen Lastbeanspruchungen sowie auch Korrosionen ausgesetzt sind.

Seine erstmalige Anwendung fand der UHFB beim Bau der Sherbrooke Footbridge über den Magong in Quebec/Kanada im Jahre 1997. Auch beim Umbau des Atomkraftwerks in Cattenon in Ardenen/Frankreich konnte der neue Hochleistungswerkstoff teilweise eingesetzt werden. Im Jahre 2002 wurde schließlich in Seoul (Korea) das weltweit erste Großprojekt aus ultrahochfestem Beton realisiert, die Seonyu Footbridge.

Aufsehen in Europa regte der UHFB aber erst, als in Deutschland im Jahre 2004 die erste Fertigteil – Verbundbrücke, die Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel, aus dem Hochleistungswerkstoff realisiert wurde.

3.4.4.1 Seonyu Footbridge

Architekt: Rudy Ricciotti

Standort: Seoul/Korea

Fertigstellung: 2002



Abbildung 50: Seonyu Footbridge, Seoul/Korea, 2002

Die Brücke, deren sehr schlanker Bogen aus sechs vorgefabrizierten Fertigteilen besteht, welche vor Ort montiert und die Vorspannung mit Litzen aufgebracht wurde, hat eine Länge von 430 Metern. Die Spannweite des Hauptbogens beträgt 120 Meter und die Deckplatten weisen eine Stärke von nur 30 mm auf. Im Allgemeinen handelt es sich bei der sehr ästhetischen Konstruktion um eine Fußgängerbrücke, welche als Zugang zu einem Stadion dient. Als Material kamen 220 Tonnen ultrahochfester Beton der Marke Ductal® mit einer Druckfestigkeit von 180 N/mm², verstärkt mit 2 Vol.-% Stahlfasern, zum Einsatz.

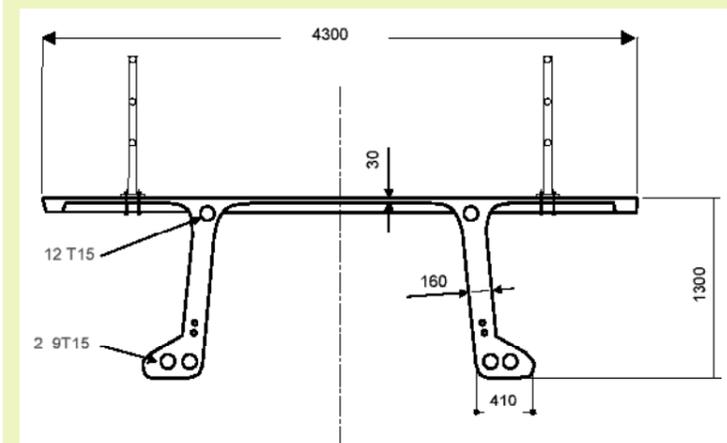


Abbildung 51: Querschnitt der Seonyu Footbridge (Maße in mm)

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)



Abbildung 52: Montage der Seonyu Footbridge , Seoul/Korea, 2002

3.4.4.2 Gärtnerplatzbrücke

Standort: Kassel/Deutschland

Baubeginn: 2005

Eröffnung: 2007



Abbildung 53: Gärtnerplatzbrücke, Kassel, 2007

Die Gärtnerplatzbrücke in Kassel ist in Bezug auf das Bauen mit ultrahochfestem Beton ein besonders interessantes Projekt, da in diesem Falle erstmals weltweit tragende Teile ausschließlich miteinander verklebt wurden.

Generell kann die Brücke als realisiertes Ergebnis einer 10 - jährigen Forschungsarbeit der Universität Kassel im Bereich des ultrahochfesten Betons gesehen werden. Die 133 Meter lange Fußgängerbrücke wurde als Ersatz für eine baufällige Holzbrücke errichtet. Hinsichtlich des guten Zustands blieben die Fundamente der ursprünglichen Brücke aber erhalten, wodurch die Feldteilung schon vorbestimmt war. Im Vorfeld des Baus realisierte die Universität schon einige kleinere Brücken aus ultrahochfestem Beton in der Umgebung von Kassel, gewissermaßen als Testlauf vor dem Bau dieses Projektes. Der für dieses Bauprojekt verwendete UHFB wurde von der Universität Kassel selber entwickelt und getestet.

Die Fertigteil – Verbundkonstruktion besteht zum Einen aus einem dreidimensionalen Raumfachwerk und zum Anderen aus im Werk vorgefertigten Obergurten aus UHFB, deren Querschnitt sich auf nur 30 x 40 cm beläuft. Die Verbindung der beiden Teile miteinander erfolgte mithilfe von Schrauben. Schließlich wurden die Obergurte über die gesamte Brückenlänge vorgespannt. Letztendlich wurde die Konstruktion durch die vorgefertigten und vorgespannten Fahrbahnplatten aus ultrahochfestem Beton vollendet, welche dann mit einem Epoxidharzmörtel auf die Obergurte aufgeklebt wurden.

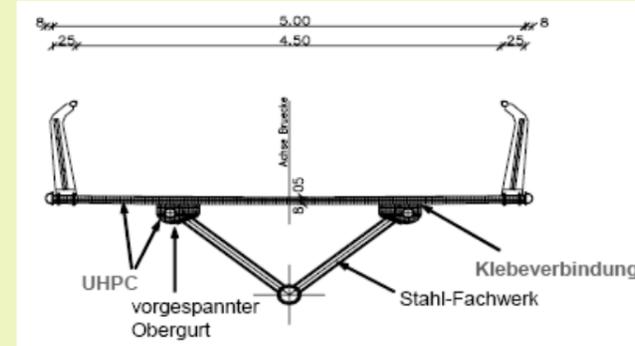


Abbildung 54: Querschnitt der Gärtnerplatzbrücke

Die Übertragung der Vorspannkraft in die Fahrbahnplatten erfolgt also nicht über eine mechanische Verbindung, sondern über die Klebefuge. Das Verkleben der UHFB – Teile ist aufgrund der hohen Oberflächenfestigkeit und dem besonders dichten Gefüge des ultrahochfesten Betons möglich.

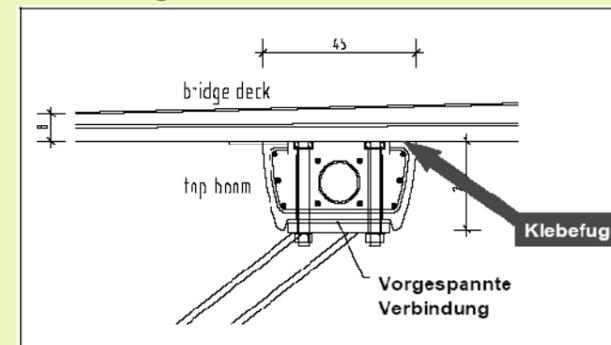


Abbildung 55: Detail mit stahlbaummäßigem Anschluss des Fachwerks an die Obergurte; Klebefuge zwischen dem Obergurt und den Fahrbahnplatten

Die Klebefuge wird mit einer Schubspannung belastet (1 – 1,5 N/mm²), umfangreiche Vorversuche haben aber ergeben, dass dies nur etwa 10 % der statischen Schubfestigkeit der Klebefuge entspricht.



Abbildung 56: Klebemörtel (2 Komponenten Epoxidharz SIKADUR 30) auf den Obergurten und den Stirnseiten der Platten

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)



Abbildung 57: Aufkleben der Fahrbahnplatten auf die Obergurte: Untersicht mit Klebfuge einer frisch aufgelegten Platte im Vordergrund

Anhand des Projekts Gärtnerplatzbrücke konnte die Universität Kassel Studien, bezogen auf das Trag- und Verformungsverhalten des ultrahochfesten Betons starten, um die gewonnenen Erkenntnisse für Nachfolgeprojekte anwenden zu können.

3.4.4.3 Mautstelle des Millau Viadukts

Architekt: Michel Herbert
Standort: Millau/Frankreich
Fertigstellung: 2004



Abbildung 58: Fotograf: Nicolas Janberg, 2005: Mautstation des Millau Viadukts/ Millau/Frankreich

Die Mautstelle des Millau Viadukts aus dem Jahre 2004 ist ein eindrucksvolles Beispiel für das Bauen mit ultrahochfestem Beton. Es handelt sich hierbei um ein aus 2 Meter langen Fertigteilen hergestelltes Schalentragswerk von 98 Metern Länge, 28 Metern Breite und einer Stärke von 20 – 85 cm, welches die Form eines geschwungenen Blattes Papier aufweist. Bezug nehmend auf das Material kam ultrahochfester Beton mit Stahlfaserbewehrung zum Einsatz, genauer genommen das Produkt Ceracem. Die Last der Schale wird von Stahlstützen in das Fundament übertragen.



Abbildung 59: Fotograf: Nicolas Janberg, 2005: Untersicht der Betonschale

3.4.4.4 Shawnessy Light Rail Transit Station (Haltestelle der S-Bahn)

Architekt: Enzo Vicenzino von CPV Group Architects and Engineers Ltd. (Calgary)
Standort: Alberta/Calgary/Canada
Fertigstellung: 2004



Abbildung 60: Shawnessy Light Rail Transit Station in Calgary/Canada

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

Die Überdachung der S-Bahn Haltestelle in Calgary/Canada besteht aus 24 einzelnen, dünnchaligen, gewölbten Überdachungen, es handelt sich genauer genommen um vorgefertigte Elemente aus ultrahochfestem Beton der Marke Ductal®. Eine Einzelschale weist die Maße 5,1 x 6,0 Meter auf, die Stärke beschränkt sich auf 20 mm, weshalb die Elemente als äußerst leicht und filigran bezeichnet werden dürfen.



Abbildung 61: Einzelschalen aus Ductal®

Um das System zu überprüfen, wurde vor Projektbeginn ein Prototyp eines Überdachungselements an das CCIT (Calgary Centre für Innovative Technology) der Universität von Calgary geschickt, um dort anhand von Belastungstests das Tragverhalten zu überprüfen. Die Erwartungen hinsichtlich der Belastungstests wurden nicht nur bestätigt, sondern sogar noch übertroffen, der Ausführung des Projektes stand nun also nichts mehr im Weg.



Abbildung 62: Schalungsprozess einer Halbschale 1



Abbildung 63: Schalungsprozess einer Halbschale 2

Bezüglich der Konstruktion wurde eine gewölbte Überdachung aus zwei Hälften gefertigt, welche dann noch im Werk zusammengefügt und erst danach zum Bestimmungsort transportiert wurde. Da eine hohe Anzahl gleicher Elemente gefertigt werden musste, lag die Verwendung des Materials Stahl wegen seiner Robustheit und Wiederverwendbarkeit für die Schalungskörper nahe. Für die Vorfertigung kamen geschlossene Stahlschalungen, in welche der Beton eingespritzt wurde, zum Einsatz. Der Konstruktionsaufbau erfolgte schrittweise - nachdem die erforderlichen Stützen montiert waren, konnten die vorgefertigten Einzelschalen angebracht werden.

3.4.4.5 Treppen aus ultrahochfestem Beton

Ultrahochfester Beton kann auch in diesem Bereich den Normalbeton als Werkstoff ablösen und einer Stiege eine ästhetische und filigrane Wirkung verleihen. Bisher waren solch filigrane Konstruktionen nur aus anderen Materialien denkbar, doch mit dem faserverstärktem Hochleistungswerkstoff kann auch einer, ansonsten meist aufgrund ihrer Stärke plump wirkenden Betontreppe, eine elegante Note gegeben werden. Einige Beispiele wurden schon realisiert, nachkommend werden zwei davon gezeigt.

Die kommenden Grafiken zeigen sehr zart ausgeführte Treppenelemente aus dem Baustoff Ductal®, welche von einer Stahlunterkonstruktion getragen werden. Die gezeigte Treppe ist im neuen Bürogebäude von LaFarge in Birmingham situiert.



Abbildung 64: Treppenkonstruktion aus UHFB (Ductal®)/Birmingham/England



Abbildung 65: Ausschnitt einer Treppe aus UHFB (Ductal®)/Birmingham

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

Bei den nachfolgenden Abbildungen handelt es sich um Wendelstiegen aus ultrahochfestem Beton, genauer genommen bestehend aus dem Produkt Ductal®. Von der Mittelachse ausgehend werden die Stufen immer dünner, bis sie am Ende nur mehr eine Stärke von 9mm aufweisen, doch selbst an dieser Stelle ist eine hohe Tragfähigkeit gewährleistet. Ein großer Vorteil zeigt sich dadurch, dass die typische Resonanz, welche man von vergleichbaren Treppen aus Stahl oder Holz kennt, entfällt.



Abbildung 66: Wendeltreppe aus UHFB (Ductal®)



Abbildung 67: Ausschnitt einer Wendeltreppe aus UHFB (Ductal®)

3.4.4.6 Flying Carpet, Ungerer Museum

Architekten: Dominique Marrec, Emmanuel Combarel
Standort: Straßburg/Frankreich
Fertigstellung: 2007



Abbildung 68: Flying Carpet beim Ungerer Museum /Straßburg/Frankreich

Der so genannte „Flying Carpet“ befindet sich am Gelände des Ungerer Museums in Straßburg und hat die Aufgabe den Eingang mit dem Hauptgebäude zu verbinden. Die ästhetische, gewundene Konstruktion aus ultrahochfestem Beton (Ductal®/La Farge) weist eine Gesamtlänge von 49 Metern und eine Breite von 1,8 Metern, bei einer Stärke von nur 45 mm, auf.

3.4.4.7 Villa Navarra

Architekt: Rudy Ricciotti
Standort: Le Muy/Frankreich



Abbildung 69: Fotograf: Philip Ruault: Villa Navarra/Le Muy/Frankreich

Die Villa Navarra, im Süden Frankreichs in der Stadt Le Muy im ländlichen Hinterland situiert, wurde von Rudy Ricciotti für den Kunstsammler und -händler Enrico Navarra konzipiert. Der Grundriss der Villa, die quasi in die Natur eingebettet wurde, ist rechteckig (40 m x 10 m) gehalten und hat nur eine Ebene. Ihre Charakterisierung erfolgt vor allem durch ihr 40 Meter langes Dach aus ultrahochfestem Beton, welches 7,80 Meter auskragt. Die Konstruktion besteht aus 17 Paneelen, welche von der Firma La Farge mit dem Produkt Ductal® realisiert wurden. Im Hinblick auf die Ausführung mussten einige Faktoren, wie z.B. das Gewicht der Einzelelemente, die Regendichtheit der Gesamtkonstruktion, sowie die Transportmöglichkeit beachtet werden. Die Region, in welcher die Villa Navarra steht, ist zudem für ihre extremen Hitze- und Windbedingungen bekannt, weshalb ein besonderer Fokus bezüglich der Abstimmung der Konstruktion auf diese Gesichtspunkte gelegt werden musste.

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)



Abbildung 70: Draufsicht der überkragenden Dachkonstruktion der Villa Navarra

Die Einzelpaneele haben eine Abmessung von 9,25 x 2,35 Meter, das Gewicht beträgt je Element 3 Tonnen. Jedes Segment besteht aus einer 3 cm starken Platte, welche auf der Längsseite von jeweils einer Betonrippe begrenzt wird. Ab dem 2/3 der Platte verjüngen sich die Rippen zur Spitze hin, bis sie am Ende sozusagen optisch in die Platte übergehen. Zusätzlich wurden in diesem vorderen Teil des Panels Öffnungen eingebracht, einerseits aus konstruktiven Gründen, nämlich um Gewicht zu sparen und andererseits aus dem ästhetischen Gedanken heraus, Licht durchströmen zu lassen und somit die Massivität des auskragenden Daches zu brechen und der Konstruktion eine optische Leichtigkeit zu verleihen.



Abbildung 71: Dachkonstruktion der Villa Navarra

Abschließend muss noch erwähnt werden, dass es sich bei der auskragenden Dachkonstruktion der Villa Navarra um einen Prototyp handelt, da diese Ausführung weltweit als die Erste ihrer Form betrachtet werden kann.

3.4.4.8 Fassadengestaltung – ZAC Paris Gauche

Architekten: Marie – Hélène Badia / Didier Berger

Standort: Paris

Fertigstellung: 2008



Abbildung 72: Fassade mit Paneelen /ZAC Paris Gauche/Paris

Für die Renovierung der ZAC Paris Gauche haben die französischen Architektinnen Marie – Hélène Badia und Didier Berger mehrere Fassaden gestaltet. Grüne eingefärbte Paneele aus dem ultrahochfesten Beton Ductal® wurden auf der Fassade im Bereich der Balkone befestigt und erschaffen eine vertikale Landschaft. Insgesamt wurden für die Gestaltung 44 Fassadenelemente angefertigt, wobei ein einzelnes Paneel, bei einem Gewicht von 1,8 Tonnen, 6,60 m Höhe und 2,30 m Breite aufweist. Die Elemente haben nicht nur einen dekorativen Effekt, sie dienen auch als Rankengitter für Kletterpflanzen.

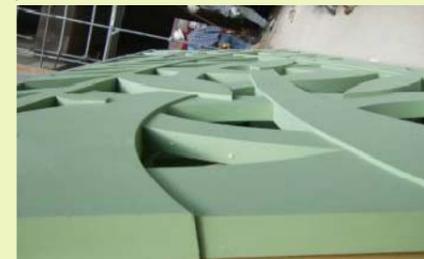


Abbildung 73: Fassadenpaneel 6,60 m x 2,30 m



Abbildung 74: Befestigung eines Fassadenelements

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB)

3.4.4.9 Verwaltungsgebäude und Busgarage der RATP in Thiais

Architekten: ECDM Architects (Dominique Marrec, Emmanuel Combarel)

Standort: Thiais/Paris/Frankreich

Fertigstellung: 2007



Abbildung 75: Verwaltungsgebäude und Busgarage der RATP in Thiais/Paris

Die Architekten Dominique Marrec und Emmanuel Combarel wurden per Auswahlverfahren für das Projekt, ein neues Gebäude für Verwaltung und Verkehrsleitung des öffentlichen Nahverkehrsverbundes von Paris, dem RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) zu entwickeln, ausgewählt. Das RATP ist verantwortlich für das Verkehrsmanagement von 300 Bussen, sowie auch für die Bereitstellung von 24-Stunden Einrichtungen für die 800 Fahrer.

Das Gelände auf dem sich das Gebäude befindet, ist in einem Außenbezirk von Paris situiert, man kann hier von einer Vorstadtlandschaft sprechen. Das Bauwerk wurde rechteckig mit einer Kantenlänge von 35 Metern konzipiert und enthält auf zwei Ebenen verteilt, Büro-, Besprechungs-, Umkleide-, und Aufenthaltsräume, sowie ein Erschließungssystem mit fünf Ein- und Ausgängen.



Abbildung 76: Gebäude der RATP in der Bauphase

Der Monolith mit den abgerundeten Kanten schiebt sich optisch aus der Grundfläche in die Höhe, der Asphalt des Parkplatzes scheint sich, aufgrund der gewölbten Übergänge, wie eine Haut über den Baukörper zu legen. Diese sogenannte Außenhaut besteht aus 3 cm dicken, ultrahochfesten, faserbewehrten und anthrazitfarben (RAL 7024) eingefärbten Betonfertigteilen mit einer Noppenstruktur, realisiert mit dem Produkt Ductal® von LaFarge. Die Noppen haben einen Durchmesser von 24 mm und treten 7 mm aus der Oberfläche hervor.



Abbildung 77: Fassadendetails RATP

Die Architekten haben in Zusammenarbeit mit den Schalungstechnikern ein wirtschaftlich funktionierendes Schalungssystem entwickelt, indem die ganze Oberfläche mit dem gleichmäßigen Noppensystem aus insgesamt nur 5 Formteilen hergestellt werden konnte. Dadurch war es möglich die Schalungen wiederholt einzusetzen, was eine Ersparnis hinsichtlich der Kosten brachte. Die vorgefertigten grau lasierten Paneele konnten für alle sichtbaren Fassadenflächen eingesetzt werden, selbst über den verglasten Einschnitten kamen genoppte Betonleisten zum Einsatz. Aus diesem Grund konnte die einheitliche monolithische Form gewährleistet werden.

3.4.5 Zukunftsperspektiven

Versuche haben gezeigt, dass es möglich ist, unter Einsatz von Druck ultrahochfesten Beton so hoch zu verdichten, dass die Druckfestigkeit auf Werte um die 500 bis sogar 1000 N/mm² steigt, also jenseits denen von Stahl, d.h. dass die Dichte des Gefüges der von Keramik entspricht. Diese Werte wurden aber bisher nur im Labor erreicht, am Markt ist ein solches Produkt noch nicht erhältlich. Man beachte diesbezüglich, dass ein Normalbeton nur eine Druckfestigkeit zwischen 35 und 40 N/mm² aufweist, die Unterschiede sind demnach enorm.

Vorerst findet ultrahochfester Beton vor allem Anwendung im Brückenbau, doch auch im Hochbau wird der Werkstoff in absehbarer Zeit Aufsehen erregen. Vor allem der Hochhausbau stellt ein bevorzugtes Anwendungsgebiet des ultrahochfesten Betons dar, da wegen der großen Höhe auf den unteren Geschossen dieser Gebäude enorme Lasten einwirken. Wegen seiner hervorragenden Eigenschaften Druckkräfte abzutragen, ist der UHFB geradezu für einen Einsatz in diesem Bereich prädestiniert. Heutzutage werden bei den höchsten Gebäuden der Welt hochfeste Betone eingesetzt, als Beispiel können hier die Petronas Towers, der Taipei 101, sowie das mit 828 Metern Finalhöhe, höchste Gebäude der Welt, der Burj Chalifa, vormals Burj Dubai, genannt werden. Daraus ergibt sich also klar, dass der UHFB die schon erlangten Höhen, mit dem zusätzlichen Vorteil eines schlankeren Tragwerks, nochmal revolutionieren könnte.

3.Recherche - Ultrahochfester Beton (UHFB) - Amorphe Betonarchitektur

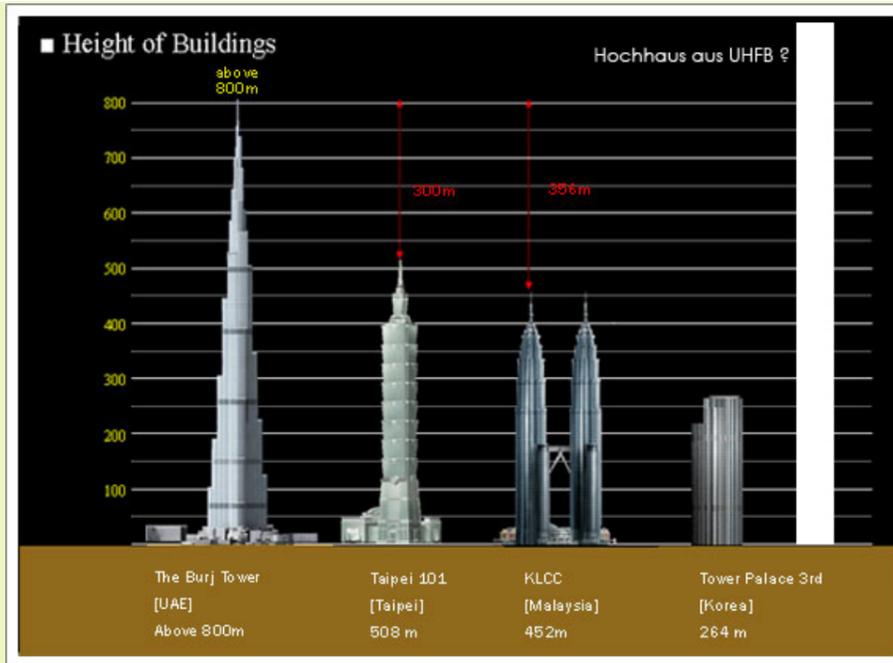


Abbildung 78: Perspektiven im Hochhausbau

Ultrahochfester Beton kann geschliffen, geätzt, gebohrt, geklebt und geschraubt werden, wodurch sich ein enormes Spektrum im Bereich der Formfindung- und Bearbeitung eröffnet. Fertigteile aus UHFB können in automatisierten Prozessen hergestellt und montiert werden, was eine enorme Einsparung in Bezug auf die Kosten ergibt. Die Optimierung des Werkstoffs erfolgt laufend, um die generelle Anwendung zu erleichtern und die sogenannten veralteten Baustoffe abzulösen und neue Wege zu beschreiben.

Aufgrund der nanotechnischen Verfahren in den Baustoff einzudringen und um Reaktionsvorgänge im atomaren Bereich aufzuklären, wird die Leistung des Werkstoffs Beton in Zukunft noch stark gesteigert werden können.

3.5 Amorphe Betonarchitektur

In der Architektur und im Bereich des Designs kann das Bauen von Freiformflächen aus Beton als relativ neues Gebiet bezeichnet werden, denn erst durch die Entwicklung von Hochleistungsbetonen, sei es Textilbeton, SCC oder UHFB, wurde es möglich, erste Schritte in die Richtung der amorphen Betonarchitektur zu gehen. Bauteile, die in mehreren Achsen gekrümmt sind, stellen eine besondere Herausforderung dar, weil die erforderlichen Prozesse genau aufeinander abgestimmt werden müssen. Die Aufgabengebiete können als sehr viel komplexer bezeichnet werden, als sonst bei herkömmlichen Projekten üblich, da den Beteiligten meist die Erfahrung und das Repertoire bezüglich dieser Thematik fehlt und oftmals neue Wege beschritten werden müssen. Der nachfolgende Beitrag zeigt nun einige Projekte auf, die den Weg amorphe Betonarchitektur zu realisieren, gegangen sind.

Diesen Beitrag betreffend möchten wir vor allem dem Planungsbüro Convex aus Graz und insbesondere Hr. DI Schwarzl danken, der uns die Probleme, Lösungen und Fragestellungen im Hinblick auf den Twist des Mumuths anschaulich erklärt und dargestellt hat. Angesichts der zur Verfügung gestellten Planunterlagen und Bilder des Büros Convex konnten wir den Bau des amorphen Twists gut nachvollziehen und anschaulich dokumentarisch wiedergeben.

3.5.1 Museum MARTa, Herford

3.5.1.1 Allgemein

M ART a
M.....Möbel
ART....Kunst
A.....Architektur und Ambiente

3.5.1.1.1 Kenndaten:

Architekt: Frank Gehry & Associates Inc., Santa Monica
in Kooperation mit der Archimedes GmbH
Standort: Herford/Deutschland
Auftraggeber: Gemeinnützige Gesellschaft für Möbel, Kultur und Kunst GmbH
Nutzung: Museum für zeitgenössische Kunst und Design
Planung: 1998 – 2001
Ausführung: 2001 – 2005
Bebaute Fläche: 3 200 m²
Geschossfläche: 7 000 m²
Nutzfläche: 6 000 m²
Verkehrsfläche: 400 m²
Ausstellungsfläche: 2 500 m²
Umbauter Raum: 37 900 m³ (BRI)

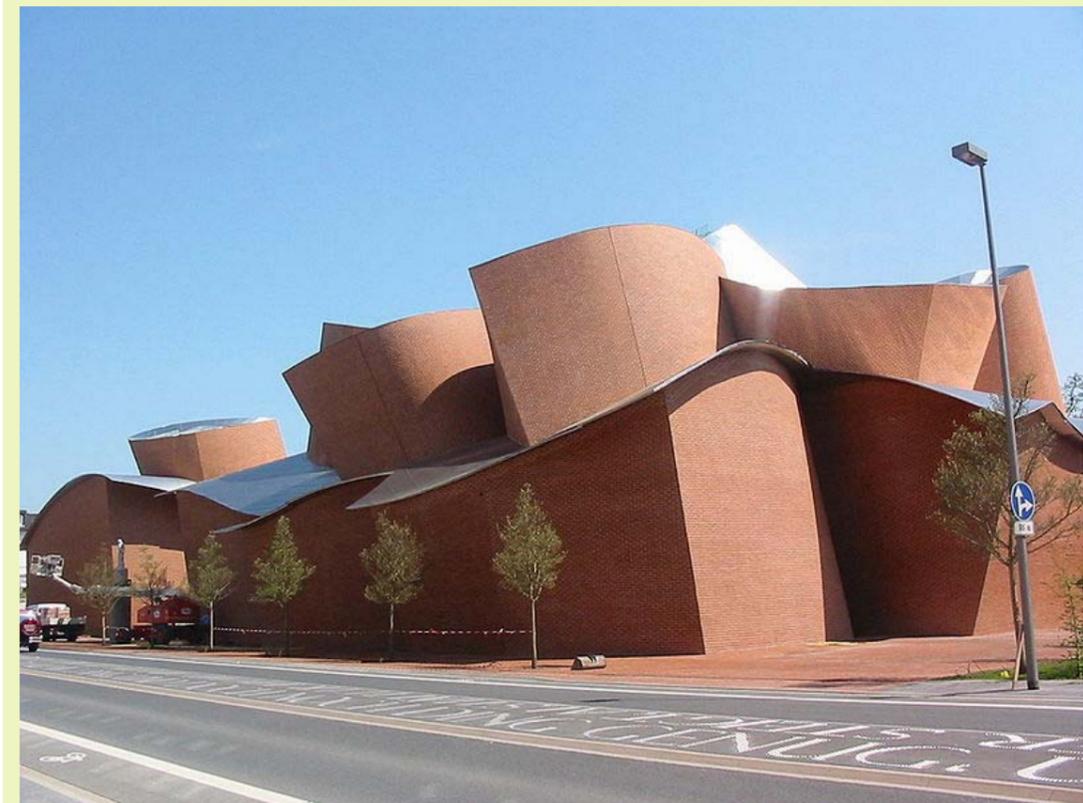


Abbildung 79: Fotograf: Oliver S. Wittekind: MARTa/Herford/Deutschland

3.Recherche - Amorphe Betonarchitektur

3.5.1.2 Aufbau (räumlich)

Das Gebäude, geplant von dem amerikanischen Architekten Frank Gehry, wurde auf einem 8.000 Quadratmeter großen, ehemaligen Firmengelände eines Bekleidungs Herstellers errichtet und beherbergt ein Museum für Möbel, Kunst und Kultur. Der gesamte Komplex teilt sich gewissermaßen in vier Teile auf. Es gibt den Ausstellungsbereich, mit seinen 1200 m² der größte Neubau, zwei Neubaukomplexe, welche die Verwaltungs- und Konferenzräume sowie eine Cafeteria beherbergen und letztlich das ehemalige Betriebsgebäude der vormalig dort situierten Firma, welches als Verbindungsglied fungiert. Es handelt sich also nicht um einen kompletten Neubau, erhaltenswerte und gleichsam stadtbildprägende Substanz wurde in den neuen Gebäudekomplex integriert. Der Gesamtkomplex wurde im Entwurfsgedanken auf die Umgebung bezogen, die organische und gleichzeitig wellenartige Formensprache spiegelt einerseits die Bewegung des Verkehrs auf der Vorderseite und andererseits den Flusslauf der Aa auf der Rückseite wieder.

3.5.1.3 Aufbau (konstruktiv)

3.5.1.3.1 Materialien:

Edelstahl: ca. 5000m²

Klinkerwände: ca. 3120 m² (ca 180000 Klinkersteine)

Gipskarton: ca. 6050 m²

Rüttelstopfsäulen: 4000 m²

Stahl: 400 t

Baustahl: 280 t

Stahlbeton: 500 m³

Die gekrümmten Betonwände wurden auf Basis von CAD- Daten aus einer zweigeteilten Schalung errichtet, dieses Vorgehen wird im nebenstehenden Kapitel „Schalungsprozess“ noch genauer erläutert. Danach konnte außen eine Wärmedämmung aufgebracht werden, welche dann wiederum mit der finalen Oberfläche, der Klinkerschicht, verkleidet wurde. Im Innenbereich wurden die amorphen Flächen weiß verputzt. Die nötigen Stahlbauteile für die Überdachung wurden CNC gefertigt, Grundlage hierfür waren wiederum exakte 3D Daten. Auf die doppelt gekrümmte Gitterschale als Sekundärträger wurden letztendlich Edelstahlpaneele aufgeschraubt.



Abbildung 80: Innenansicht der amorphen Betonelemente

3.5.1.4 Umsetzung

Die Formfindung des Museums erfolgte mithilfe eines klassischen Modells. Doch alle weiteren Schritte konnten nur durch den Einsatz von CAD Software incl. der entsprechenden Hardware ausgeführt werden, da die räumlich gekrümmten Flächen ohne diese Werkzeuge praktisch nicht exakt umsetzbar gewesen wären. Doch hier war es auch insbesondere wichtig Firmen für die Ausführung, Planung und Fertigung auszuwählen, welche einerseits die Bereitschaft und andererseits das Wissen, in Bezug auf den Umgang mit 3D- Daten und Programmen, mitbrachten.

3.5.1.5 Schalungsprozess

Anfangs ging es vor allem darum, ein Schalungssystem für die Ortbetonwände zu finden, sowie auch eine Person, die aus den Unterlagen des Architekturbüros, welche aus einem 3D Modell, einigen Entwurfsskizzen und der Massenermittlung bestanden, Pläne für die Fertigung herstellen konnte. Schließlich wurde Tim Dressler, ein freiberuflicher DI Architekt für diese Aufgabe ausgewählt, da er ein schlüssiges Konzept für das Schalungssystem vorstellen konnte. In einem Interview mit der Deutschen Bauzeitung im Mai 2005, welches anschließend zusammengefasst wiedergegeben wird, erklärte Tim Dressler anschaulich seinen Umgang mit dem Schalungsbau der amorphen Betonarchitektur des Museums MARTa.

3.5.1.5.1 Schalungsbau der amorphen Betonarchitektur des MARTas

Die Ausgangsbasis für die Arbeit bildete ein 3D – Modell des Büros Frank Gehry & Associates Inc., welches durch den 3D – Scan des real gebauten Modells und einem nachfolgenden Einlesen der Daten in ein CAD – Programm, nämlich CATIA, wo schließlich ein Flächenmodell entstand, erzeugt wurde. Es galt nun eine geeignete Software zu finden, welche die Daten des CATIA Flächenmodells einlesen konnte, um die Informationen die jenes enthielt, nämlich die inneren und äußeren Wandflächen, weiterbearbeiten zu können. Die einzige Software, welche diese Forderung erfüllen konnte, war das Programm MC Neel Rhinoceros, kurz Rhino, welches vor allem als 3D Modeller bekannt ist. Für die Erstellung von Werkplänen ist es jedoch nicht optimal ausgelegt. Doch da kein anderes Programm die Weiterbearbeitung der NURBS Freiformflächen garantieren konnte, hatte Tim Dressler keine andere Option als mit Rhino zu arbeiten. Die 3D – Bearbeitung erfolgte nun also mit Rhinoceros, hier war es von Vorteil, dass diese Software die Daten für die CNC Fertigung der Schalkörper liefern kann. Die nötigen zweidimensionalen Plandarstellungen wurden im Autocad, ein CAD – Programm, gefertigt, da Rhino hinsichtlich Schraffuren, Bemaßungen und Beschriftungen nur bedingt geeignet ist. Diese Schnittzeichnungen waren im Falle des Museums Marta vor allem an Stellen nötig, wo die Schalelemente gestoßen waren, beziehungsweise auch, da mit Ortbeton gearbeitet wurde, um die erforderlichen Betonierabschnitte in einem zweidimensionalen Plan zu kennzeichnen, sowie auch das Arbeiten auf der Baustelle, durch Erkennen und Kontrollieren der Position der Schalelemente, zu erleichtern. Die Schnittstelle zwischen Rhino und Autocad erfolgte durch das dxf- oder dwg- Format. Rhinoceros kann diese Formate problemlos exportieren und da bei Autocad dxf- und dwg- Dateien die Grundlage bilden, war der Datentransfer in diesem Falle problemlos durchführbar.¹¹

¹¹ Vgl.: Deutsche Bauzeitung 9/05

3.Recherche - Amorphe Betonarchitektur

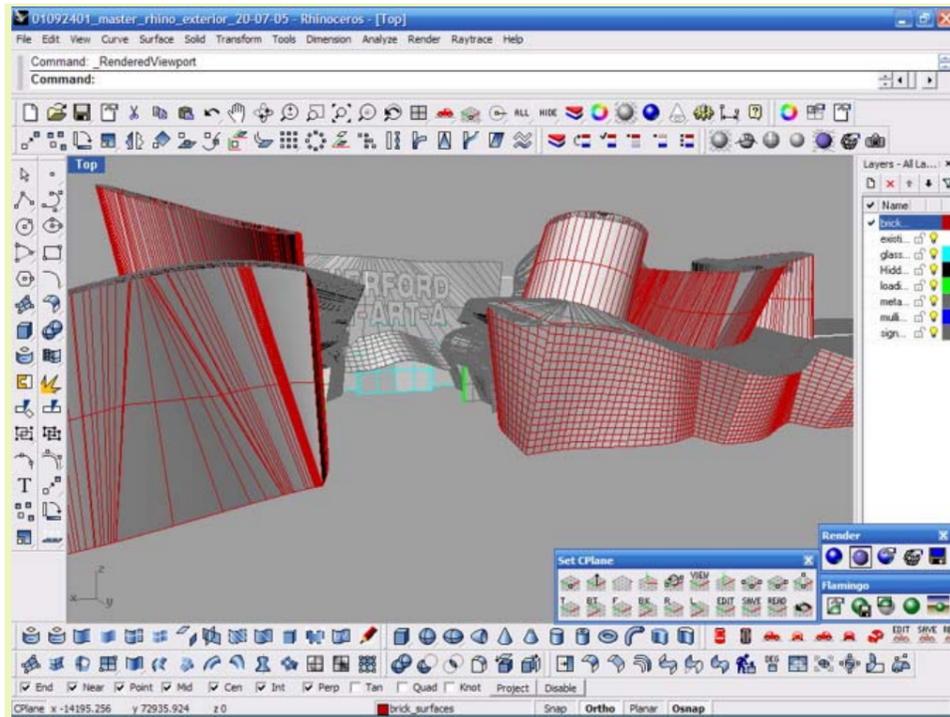


Abbildung 81: 3d Modell des Museums im Mc Neel Rhinoceros

Die Transferarbeit hier kann aber, wie aus eigener Erfahrung bekannt, als sehr aufwändig bezeichnet werden, der Grund hierfür wird nun kurz erläutert:

Um z.B. einen Schnitt, eines in mehreren Achsen im Raum gekrümmten Objektes, zu erzeugen, muss in Rhino eine so genannte Schnittfläche erzeugt werden, kurz gesagt eine plane Ebene wird an der gewünschten Stelle eingefügt. Die Seite des Objekts die quasi „weggeschnitten“ wird, bei einem klassischen Schnitt eines quadratischen Grundrisses auch als so genannte „hintere Seite“ bekannt, muss daraufhin mithilfe der erzeugten Schnittfläche weggetrimmt werden. Der genaue Befehl in Rhinoceros dafür lautet „trimmen“. Dann erst kommt die klassische Schnittfläche zum Vorschein, welche dann nach Eingabe der Befehle „Kurve aus Objekten“ und „Kante duplizieren“ als dwg- oder dxf- File exportiert werden kann. Die nachfolgende Grafik verdeutlicht den Prozess, eine Schnittkurve aus Rhinoceros zu exportieren.

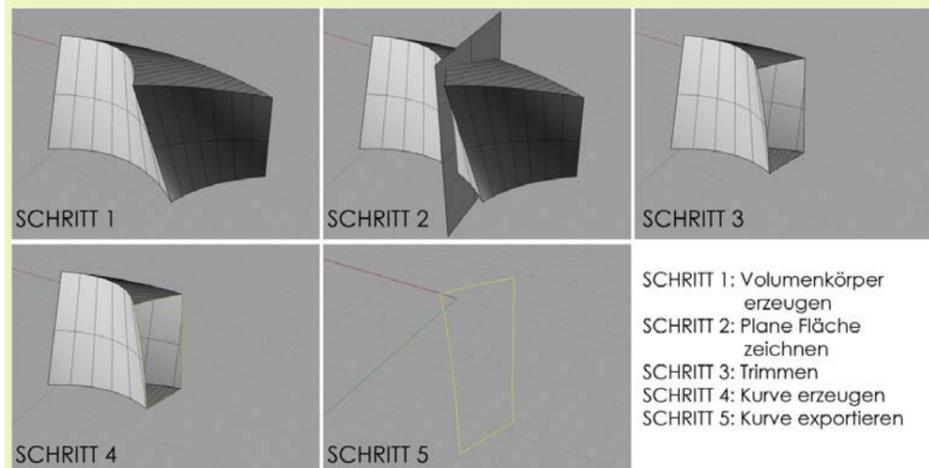


Abbildung 82: Schnittflächenerzeugung im Mc Neel Rhinoceros

Das von Tim Dressler konzipierte Schalungssystem war zweiteilig angelegt. Der erste Teil, an der Außenseite situiert, war eine konventionelle, senkrechte Schalung. Der zweite Teil bestand aus so genannten Füllkörpern, die vor den senkrechten Elementen situiert wurden. Die Innenseite des Füllkörpers war gekrümmt, quasi ein Negativabdruck der amorphen Wand. Die Außenseite des Füllkörpers aber war gerade konzipiert. Dieses Schalungssystem war vor allem auf der Baustelle von Vorteil, da aufgrund der planen Elemente die Geometrie einfach hergestellt werden konnte und somit auch das Arbeiten erleichtert wurde.¹²

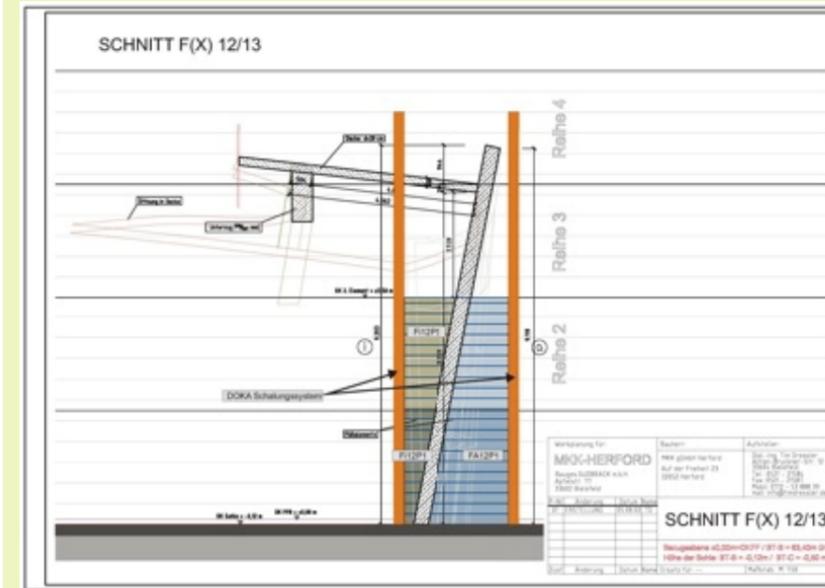


Abbildung 83: Schnittzeichnung der Schalungselemente

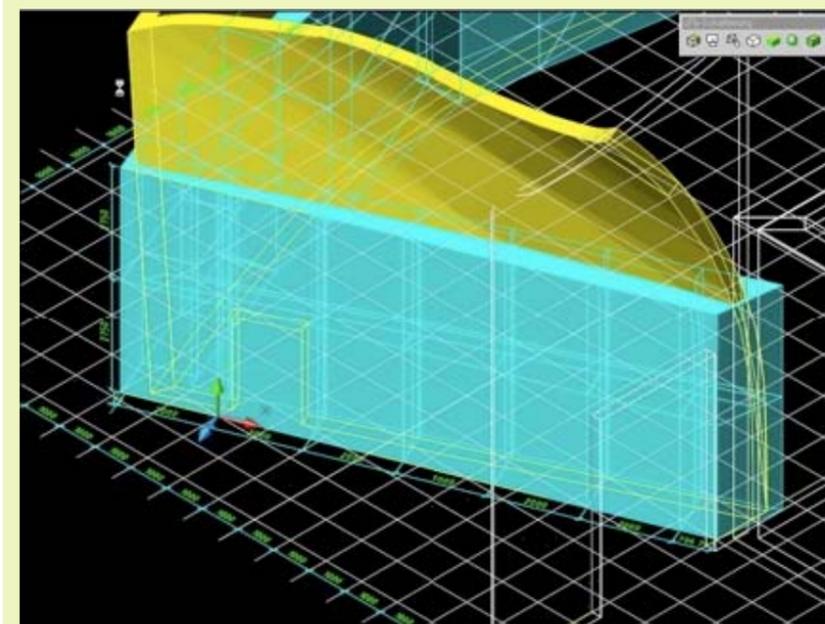


Abbildung 84: Füllelemente (blau) + amorphe Betonfläche

¹² Vgl.: Deutsche Bauzeitung 9/05

3.Recherche - Amorphe Betonarchitektur

Die nachfolgende Abbildung stellt den inneren und äußeren Polygonzug für die senkrecht angeordneten ebenen Elemente dar. Einerseits war es hier wichtig, dass die Schalung nicht in zu viele kurze Abschnitte unterteilt wird, dass bedeutet, möglichst wenig Ecken in den Polygonzug einzubauen. Andererseits war aber gleichzeitig zu beachten, dass längere Abschnitte bedeuten, dass der Abstand zwischen dem senkrechten Schalungselement und der zu betonierenden Wand wächst, kurz gesagt, die Füllkörper müssten große Abstände überbrücken und daraus folgt, dass mehr Material benötigt wird, wodurch wiederum eine Kostensteigerung hervorgerufen wird. Die Aufgabe lag nun also darin, unter Beachtung der genannten Punkte eine optimale Lösung zu finden, was schließlich auch gelang.¹³

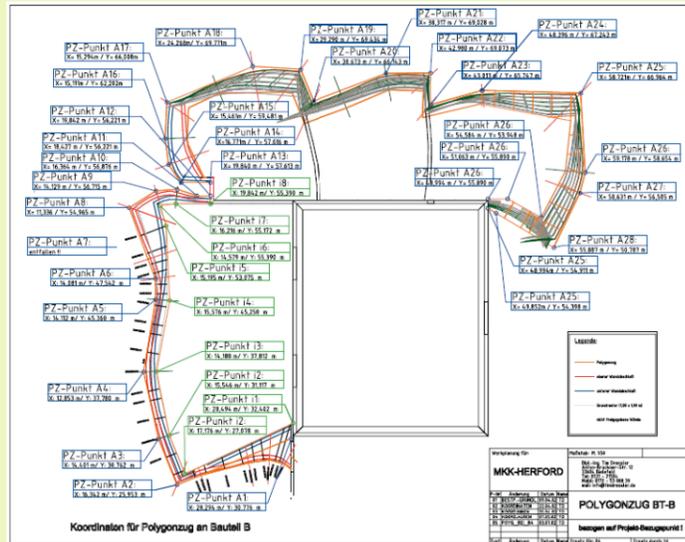


Abbildung 85: Darstellung des Polygonzugs/Koordinatenplan

Bezug nehmend auf die Positionierung der Elemente auf der Baustelle war die zweiteilige Schalung äußerst hilfreich, da das Aufstellen von senkrechten Schalungskörpern normalerweise keine Probleme darstellt. Nach diesem Schritt mussten die Füllkörper nur mehr vor den senkrechten Schalungselementen an ihrem Bestimmungsort positioniert werden, welcher zwecks klar ersichtlicher Aufstellungspläne definiert war.¹⁴



Abbildung 86: Baustelle in Herford beim Aufstellen der Schalung

¹³ Vgl.: Deutsche Bauzeitung 9/05

¹⁴ Vgl.: Deutsche Bauzeitung 9/05

Die auf einer Seite gekrümmten Schalungskörper wurden von Tim Dressler, wie schon gesagt, als Negativform der Wände konzipiert und natürlich mit den zusätzlichen planen Flächen, welche nötig waren, um einen Volumenkörper zu generieren, versehen. Die Höhe dieser Elemente betrug bei allen Teilen 2,75 Meter, die Breite bewegte sich bei den meisten Körpern um die 2 Meter, manchmal auch aufgrund der Tiefe, welche zu viel Materialkosten verursacht hätte, weniger. Da der Fall einer zu großen Tiefe einige Male eintrat, gab es noch eine Variante, trotz eines längeren Baukörpers, die Tiefe zu überbrücken, nämlich durch das Anbringen von zusätzlichen Abstandhaltern zwischen dem ersten und dem zweiten Teil der Schalung. Die insgesamt 500 Füllkörper wurden von einer Tischlerei gefertigt, genauer genommen eigentlich gefräst. Jedes Element für eine Schalung wurde aus dem Rhinoceros als IGES – Datei exportiert, welche dann für die Fräse in der Tischlerei verwendet werden konnte. Nachdem der Betoniervorgang abgeschlossen war, wurden die Wandaußenflächen mittels eines Laserscans vermessen, um etwaige Abweichungen zu den Ursprungsplänen zu ermitteln. Dies war nötig, um diese Ungleichheiten, mithilfe der Ankerlängen von der Vorsatzschale aus Ziegeln, zu korrigieren. Tim Dressler hatte nun also die Aufgabe, aus den Messdaten des Laserscans, es handelt sich hier um eine Punktwolke, ein 3D – Modell des Ist- Zustands zu generieren und mit dem Ursprungsmodell zu vergleichen. Dies geschah durch eine Überlagerung der beiden Modelle in dem Programm Rhinoceros.¹⁵



Abbildung 87: Schalelemente aus Holz vor ihrem Einsatz



Abbildung 88: Freiformwandflächen aus Ortbeton nach dem Ausschalen

¹⁵ Deutsche Bauzeitung 9/05

3.Recherche - Amorphe Betonarchitektur

3.5.2 MUMUTH, Graz

3.5.2.1 Allgemein:

3.5.2.1.1 Kenndaten:

Architekten: UN Studio/Ben van Berkel, Caroline Bos mit Hannes Pfau, Amsterdam

Nutzung: Haus für Musik und Musiktheater der Kunstuniversität Graz(KUG)

Tragwerksplanung: Arup, London

Ausführung: 2006 – 2009

Standort: Graz/Österreich

Errichtungskosten: ca. 22 Mio. Euro

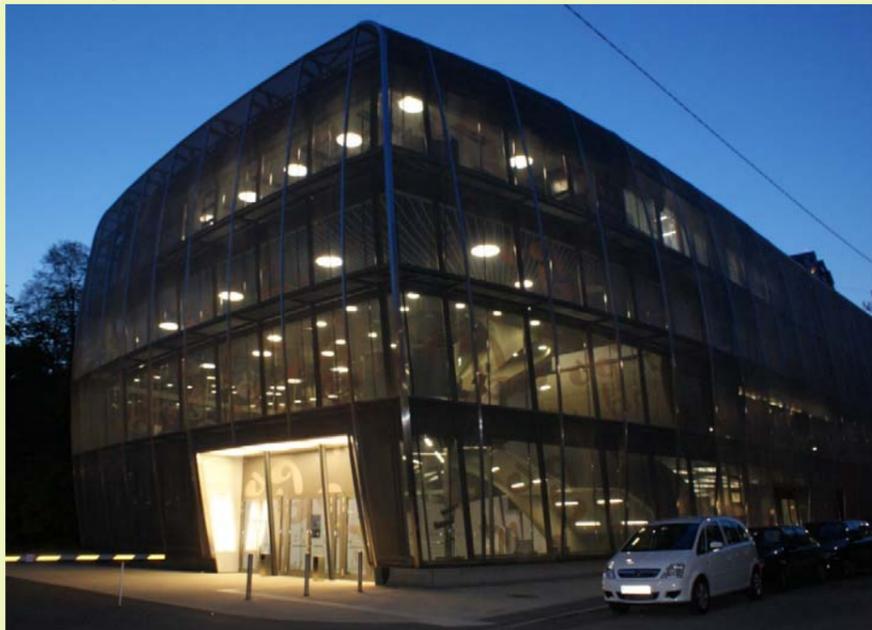


Abbildung 89: Mumuth/Graz/Österreich

3.5.2.2 Aufbau (räumlich)

Im Jahre 1999 gewann das holländische Architekturbüro UN Studio gemeinsam mit dem Tragwerksplaner Ove Arup den vom Land Steiermark ausgeschriebenen Wettbewerb für den Neubau eines „Hauses für Musik und Musiktheater“. Die Ausführungsplanung vor Ort übernahmen schließlich die beiden Grazer Planungsbüros convex/Grabner – Szyszkowitz ZT GmbH und Zenker – Handel Consulting Engineers. Insgesamt betrug die Planungszeit fast zehn Jahre, da es immer wieder zu Verzögerungen kam, im Jahre 2006 konnte aber schließlich endlich mit dem Bau begonnen werden.

Von der Außenseite zeigt sich das Mumuth als kompakter und gleichzeitig schlichter Baukörper, der in ein Edelmetallgitternetz, dem sogenannten „Mesh“ eingehüllt wurde. Tagsüber kann man das Innenleben nur erahnen, da die Fassade das Tageslicht reflektiert und somit ein Sichtschutz gegeben ist. Der Universitätsbetrieb kann also ungestört seinen Lauf nehmen. In der Nacht wird der Innenraum jedoch Teil des öffentlichen Raumes und erlaubt aufgrund der Beleuchtung Einblicke. In der Außenhaut sind zudem LED – Balken installiert, welche das Gebäude nachts in diverse Farben tauchen und die Fassade bespielen. Dem Betrachter zeigt sich nun das dreigeschossige Foyer, in dem sich der Twist, eine dreidimensionale Stahlbetonspirale, die als eigentliches Highlight des Entwurfs bezeichnet werden kann, empor windet.

3.5.2.2.1 Abmessungen des Baukörpers:

Länge: 72 m

Breite: 23 m

Höhe: 17 m

Das Mumuth kann im Bezug auf die Nutzung in 3 Abschnitte unterteilt werden:

- 1.) Foyer + Proberäume
- 2.) Konzert- und Bühnenraum incl. darunter liegenden Nebenräumen + Haustechnikräume
- 3.) Büroabteilung und zugehörige Nebenräume + Liftanlagen + Stiegenhaus

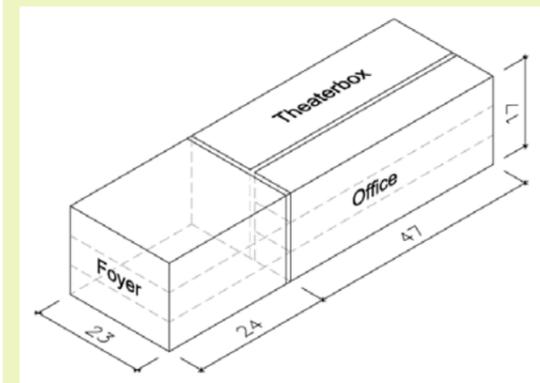


Abbildung 90: Nutzungsschema des Mumuths

3.5.2.3 Der „Twist“

3.5.2.3.1 Entstehung der Twistgeometrie

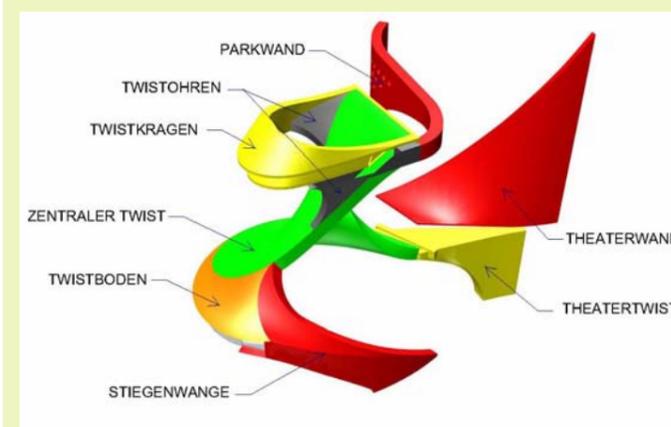


Abbildung 91: Grafik: Convex; Aufbau Twist

Die Grundidee wird von den Architekten wie folgt beschrieben: „from box to blob and back again“. Der Begriff „Twist“ kommt aus dem Englischen und kennzeichnet eine Verdrehung. Das Theater des Mumuths ist geometrisch gesehen eine Box, aus ihr heraus entwickelte sich schließlich die organische

3.Recherche - Amorphe Betonarchitektur

Freiform des Twists. Die Decke des 3. Obergeschosses entsteht durch ein Verdrehen der parkseitigen Theaterlängswand in die Horizontale. Die straßenseitige Theaterlängswand verwandelt sich nach dem gleichen Prinzip und wird zur Decke des Erdgeschosses. Zusätzlich gibt es eine Treppe, die sich an der räumlichen Struktur empor windet und die Geschosse miteinander verbindet. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht diesen Formfindungsprozess.

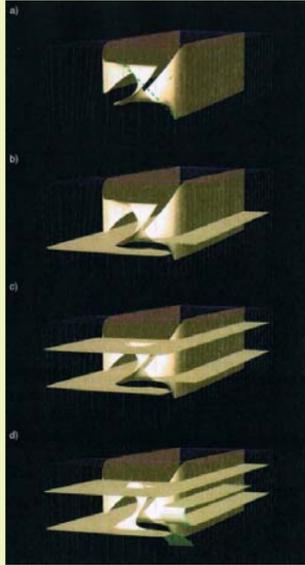


Abbildung 92: Entwicklung der Twistgeometrie und des Foyerbereiches

3.5.2.3.2 Aufbau (konstruktiv)

Im Hinblick auf die Konstruktion stellt vor allem die frei geformte räumliche Tragstruktur des Twists eine Besonderheit dar. Der Twist wurde als Verbundkonstruktion ausgeführt, der Querschnitt dieses Verbunds besteht also aus einer innen liegenden Stahlkonstruktion aus Stahlhohlprofilen und einer oberen und unteren vor Ort betonierten Stahlbetonschale, jeweils ca. 15 cm stark, die Dicke der gesamten Verbundkonstruktion beläuft sich auf ca. 64 cm. Die Betonschalung und der Stahl sind über Kopfbolzen, welche für die Kraftübertragung zuständig sind, miteinander verbunden.

Die Stahlkonstruktion kann als primäre Tragstruktur des Twists bezeichnet werden, die außen liegenden Hauptrohre sind mit den inneren Rohren durch Pfosten und Diagonalen verbunden, es handelt sich also um eine fachwerkartige Ausbildung. Sie wurde im Werk komplett vorgefertigt, um sie aber zu transportieren, musste die Konstruktion im nächsten Schritt in Transporteinheiten zerschnitten werden. Auf der Baustelle wurden die Einzelteile dann wieder zusammenschweißt. Danach konnte die Bewehrung angebracht werden, sowie auch leichte Füllkörper aus expandiertem Polystyrol, situiert zwischen den Stahlrohren, um das Eigengewicht des Twists zu minimieren. Die Bewehrung wurde anhand von genau konstruierten Bewehrungsplänen an dem Stahlgerüst angebracht.



Abbildung 93: Foto: Convex; Stahlkonstruktion des Twists

Um die Treppenlöcher herum wurden radial verlaufende I – Träger an einem umlaufenden geschweißten Hohlkasten angebracht. Diese Ausbildung ist nötig, um eine Verbundtragwirkung der Decken und des Twistes zu erreichen. Zusätzlich wird es in Bezug auf das Tragwerk durch diesen Eingriff möglich, einen Großteil der Lasten aus dem Foyer über den Twist abzutragen, der verbleibende Teil kann durch die Randstützen aufgenommen werden.



Abbildung 94: Bau des Twists - Radial verlaufende I-Träger

3.Recherche - Amorphe Betonarchitektur

3.5.2.3.3 Datentransfer/Planung

Der Datentransfer zwischen dem Architekturbüro und den Ausführungsplaner gestaltete sich aufgrund der Verwendung von unterschiedlichen Programmsystemen als schwierig. Der Entwurf wurde auf digitaler Ebene seitens des Architekturbüros im Mc Neel Rhinoceros realisiert, die Konstruktionsplanung sollte aber im dafür spezialisierten CAD-Programm Nemetschek – Allplan erfolgen. Das Problem lag auf der einen Seite darin, dass in Rhino nur Oberflächen ohne zugehörige Stärke, also Volumenkörper gezeichnet wurden. Andererseits ergab sich eine zusätzliche Problematik dadurch, dass Rhino und Allplan nicht kompatibel sind, weshalb ein reibungsloser Transfer des 3d Modells mithilfe keines exportierten Dateiformats durchführbar war. Prinzipiell gab es zwar die Möglichkeit, dass Rhino 3D – Modell in Allplan zu importieren, eine Weiterbearbeitung der Flächen gestaltete sich aber als unmöglich. Vor allem die Darstellung der Bewehrungsführung konnte aber nur in Allplan erfolgen, weshalb eine Lösung gefunden werden musste.

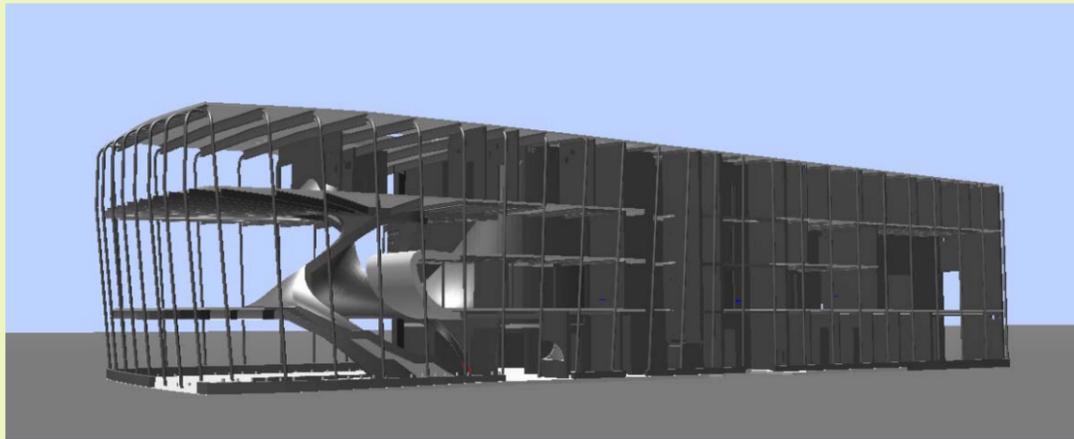


Abbildung 95: Rendering: Convex; 3d Modell des Mumuths im Allplan

Die Aufgabe der ausführenden Planer war es nun, in mühseliger Arbeit die Geometrie in Allplan zu rekonstruieren. Bei einem rechteckigem Gebäude mit klar definierten Koordinaten mag dies einfach erscheinen, bei einer frei im Raum gekrümmten Fläche bedeutet das aber einen äußerst hohen zeitlichen Aufwand, sowie auch eine äußerst gute Kenntnis bezüglich der verwendeten Software. Zusätzlich musste auch noch das Problem, der Konstruktion eine Stärke zu geben, gelöst werden. Durch diesen Eingriff verändert sich bei einer Gesamtstärke des Aufbaus von ca. 64 cm natürlich Einiges bezüglich der Form. Hier war eine enge Zusammenarbeit zwischen den Ausführungsplanern und dem Architekturbüro nötig, um letztendlich ein für beide Seiten zufriedenstellendes Ergebnis zu erreichen.

3.5.2.3.4 Schalungsprozess

Auch die Schalung dieser freigeformten Schraubfläche kann aufgrund der engen Radien des Twists als Herausforderung bezeichnet werden. Man entschied sich dafür, die Schalung aus individuell gefrästen Elementen, bestehend aus Claroporon, ein styroporartiger Baustoff ähnlich wie XPS (Extrudierter Polystrol Hartschaum), nur härter, anzufertigen. Grundlage für solch einen Vorgang bilden exakte, dreidimensional konstruierte Körper der Schalungselemente, welche geometriebedingt von einer meist fünfschigen Fräse verarbeitet werden können.



Abbildung 96: Foto: Convex; Schalungselemente aus Claroporon mit Holzkonstruktion

Die insgesamt ca. 50 gefrästen Körper wurden mit Epoxidharz beschichtet, um eine glatte Oberfläche zu gewährleisten. Die Schalung des Mumuths kann eigentlich als zweigeteilt bezeichnet werden, da es einerseits die Claroporonelemente gibt und andererseits eine konventionelle, senkrechte Schalung mit planer Ebene, an welche die gefrästen Schalungselemente kraftschlüssig andocken. Zwischen den auf einer Seite ebenen Claroporon – Körpern und der senkrechten Schalung wurden größere Abstände mittels einer Holzkonstruktion überbrückt, so konnten Kosten gespart, Ungenauigkeiten überbrückt und auch die gefrästen Elemente unterstützt werden. Aufgrund des hohen Schalungsdrucks kam es nämlich bei einigen zu dünn ausgeführten Claroporon – Elementen zu starken Ausbeulungen, wodurch in diesen Bereichen kostenintensive Nachbearbeitungen nötig wurden. Hier zeigt sich, dass das Arbeiten mit diesem Prinzip im Bauwesen noch Neuland ist, wodurch auch zwecks der nicht vorhandenen Erfahrung in diesem Bereich Fehler passieren. Für weitere Projekte kann man also feststellen, dass weniger Material zwar anfänglich die Kosten senkt, dass aber zu viele Einsparungsmaßnahmen, wegen hohen nachträglichen „Renovierungskosten“, im Endeffekt teurer werden können, als wenn man gleich etwas großzügiger mit dem Material umgeht und dadurch solche Fehler verhindert.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die geschalte Wand neben der Stiege nach dem Schalungsprozess, die zweiteilige Schalung ist gut erkennbar.



Abbildung 97: Foto: Convex; links: Betonwand mit Schalung; rechts: Betonwand ausgeschalt

3.Recherche - Amorphe Betonarchitektur

Nach den abgeschlossenen Schalungsvorgängen der Stiegenwange und des Theatertwists wurde auf einer Plattform in 3,75 Höhe, genauer genommen am Twistboden, eine zehn Meter hohe Hilfskonstruktion rund um den Twist errichtet. Diese hatte die Funktion, nachdem die Netzbewehrung verlegt worden war, die Claropron – Schalungselemente, welche an der Unterseite des Twists eingebaut wurden, abzustützen.

Um sich Verdichtungsarbeiten zu sparen, wurde mit selbstverdichtendem Beton gearbeitet, der von unten in die Schalung gepumpt wurde. Die für dieses Prinzip nötigen Öffnungen wurden schon in der Planung berücksichtigt, um nachträgliche Probleme zu verhindern. Der Twist war in mehrere Betonierabschnitte unterteilt, um den Schalungsdruck möglichst gering zu halten.



Abbildung 98: Hilfsgerüst/Ansicht von oben

Hier muss angemerkt werden, dass eine entsprechende Oberfläche, vor allem ohne größere Luftporeneinschlüsse, an den meisten Stellen gelang. Lediglich an einigen Punkten musste aufgrund von Ausbeulungen bzw. zu vielen Luftbläschen nachgearbeitet werden.



Abbildung 99: Foto: Convex; fertig ausgeschalteter Twist

Der Schalungsaufbau kann mit jenem des Museums MARTa, welches auf den vorigen Seiten beschrieben wurde, verglichen werden. In beiden Fällen wurde mit einer horizontalen Standardschalung einerseits und mit individuell hergestellten amorphen Schalungskörpern andererseits gearbeitet, der Unter-

schied liegt nur im Material der dreidimensional gekrümmten Schalungskörper. Bei beiden Projekten kam Ortbeton zur Anwendung, allerdings wurde beim Museum MARTa die Oberfläche im Außenbereich noch mit einer Verkleidung versehen und im Innenbereich verputzt, weshalb der Oberflächenqualität des Betons keine große Bedeutung beigemessen wurde. Beim Haus für Musik und Musiktheater mussten die betonierten Oberflächen aber Sichtbetonqualität aufweisen, da keine Verkleidung etwaige Ungenauigkeiten verdeckt.



Abbildung 100: Endzustand des Twists

3.Recherche - Quellenangaben

3.6 Quellenangaben

3.6.1 Abbildungsverzeichnis

3.6.1.1 Abbildungsverzeichnis Faserbeton

Abbildung 1: Vergleich von verschiedenen Bewehrungssystemen

Quelle:
Bergmeister, K.: Betonkalender 2010, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2010, S.460

Abbildung 2: Verteilende Wirkung von Kurzfasern im Beton

Quelle:
Grübl, P.: Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2001, S.615

Abbildung 3: Vergleich von unbewehrtem Normalbeton und Faserbeton in gerissenem Zustand

Quelle:
Bergmeister, K.: Betonkalender 2010, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2010, S.400

Abbildung 4: Herstellung von Drahtfasern

Quelle:
Dehn, F.: Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2003, S.410

Abbildung 5: Herstellung von Stahlfasern

Quelle:
Dehn, F.: Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2003, S.411

Abbildung 6: Herstellung von Blechfasern

Quelle:
Dehn, F.: Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2003, S.411

Abbildung 7: Herstellung von Fasern aus der Schmelze

Quelle:
Stengel, T. : Betontechnologie II – Faserbeton, München, 2005, S.5
Abrufbar auf:
<http://www.cbm.bv.tum.de/cbm/images/Lehre/Skripten/BauingenieurwesenMaster/faserbeton.pdf>
Zugriff: 22.02.2010

Abbildung 8: Verschiedene Stahlfaserprodukte diverser Hersteller

Quelle:
Grübl, P.: Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2001, S.621

Abbildung 9: Herstellung von Glasfasern/Düsenziehverfahren

Quelle:
Bergmeister, K.: Betonkalender 2010, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2010, S.470

Abbildung 10: Einfluss der Korngröße auf Faserorientierung, Faserverteilung und Verarbeitbarkeit

Quelle:
Stengel, T. : Betontechnologie II – Faserbeton, München, 2005, S.8
Abrufbar auf:
<http://www.cbm.bv.tum.de/cbm/images/Lehre/Skripten/BauingenieurwesenMaster/faserbeton.pdf>
Zugriff: 22.02.2010

Abbildung 11: Vergleich von Beton und Stahlfaserbeton in gerissenem Zustand

Quelle:
Zimmermann, G.: Membran Beton Gitterschalen Tragwerke, Norderstedt, 2007, S.60

Abbildung 12: Beispiele für mögliche Faserorientierungen

Quelle:
Stengel, T. : Betontechnologie II – Faserbeton, München, 2005, S.11
Abrufbar auf:
<http://www.cbm.bv.tum.de/cbm/images/Lehre/Skripten/BauingenieurwesenMaster/faserbeton.pdf>
Zugriff: 22.02.2010

Tabelle1: Eigenschaften ausgewählter Fasern verschiedener Materialien

Quelle:
Bergmeister, K.: Betonkalender 2009, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2008, S.122

3.6.1.2 Abbildungsverzeichnis Textilbeton

Abbildung 13: Typisches Erscheinungsbild von Textilbeton

Quelle:
Bergmeister, K.: Betonkalender 2010, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2010, S.460

Abbildung 14: Einbettung von AR- Glasrovings eines Textils im Beton

Quelle:
Raupach, M: Textilbeton - ein neuer Verbundwerkstoff, S.3

Abbildung 15: Herstellung von Textilbeton

Quelle:
<http://www.textil-beton.de/uploads/pics/textilbeton-2.jpg>
Zugriff:23.03.2010

Abbildung 16: Belastungstest Prototyp Oschatz

Quelle: Offermann, P: Vorstellung deutsches Zentrum Textilbeton, 2008, S.8
Abrufbar auf:
http://www.invest-in-saxony.de/set/157/Workshop2_Weiland-Textilbeton.pdf
Zugriff: 21.03.2010

Abbildung 17: Transport und Aufbau der Textilbetonbrücke in Oschatz

Quelle:
http://baublog.tu-dresden.de/bilder/1024_bruecke_oschatz.jpg
Zugriff: 22.03.2010

Abbildung 18: Fußgängertrasse über die Rollach in Kempton

Quelle:
Offermann, P.: Vorstellung deutsches Zentrum Textilbeton, 2008, S.9
Abrufbar auf:
http://www.invest-in-saxony.de/set/157/Workshop2_Weiland-Textilbeton.pdf
Zugriff: 21.03.2010

Abbildung 19: Hyperschale der FH Schweinfurt vor den Sanierungsarbeiten

Quelle:
Offermann, P.: Vorstellung deutsches Zentrum Textilbeton, 2008, S.15
Abrufbar auf:
http://www.invest-in-saxony.de/set/157/Workshop2_Weiland-Textilbeton.pdf
Zugriff: 21.03.2010

Abbildung 20: Verstärkungsprinzip der Hyperschale

Quelle:
Offermann, P.: Vorstellung deutsches Zentrum Textilbeton, 2008, S.16
Abrufbar auf:
http://www.invest-in-saxony.de/set/157/Workshop2_Weiland-Textilbeton.pdf
Zugriff: 21.03.2010

Abbildung 21: Aufbringen der textilen Verstärkungsstruktur auf die bestehende Dachkonstruktion

Quelle:
Offermann, P: Vorstellung deutsches Zentrum Textilbeton, 2008, S.16 - S.17
Abrufbar auf:
http://www.invest-in-saxony.de/set/157/Workshop2_Weiland-Textilbeton.pdf
Zugriff: 21.03.2010

Abbildung 22: Martin Kleppe, Skulptur ohne Namen, 2006

Quelle:
Kleppe, M.: Skulpturen, Experimentelle Architektur,S.3
Abrufbar auf:
http://www.izbach.de/martin/techtexil07/download/martinkleppe_p200701.pdf
Zugriff: 29.03.2010

Abbildung 23: Martin Kleppe, Tisch aus Textilbeton, 2007

Quelle:
Kleppe, M.: Skulpturen, Experimentelle Architektur,S.4
Abrufbar auf:
http://www.izbach.de/martin/techtexil07/download/martinkleppe_p200701.pdf
Zugriff: 29.03.2010

Abbildung 24: Hans Hoge, Paul und Paula, 2003

Quelle:
http://www.ag-bild-bau.de/html/paul&paula_2003.html
Zugriff: 29.03.2010

Abbildung 25: Ansicht der Südfassade des Neubaus + Ansicht eines Einzelelements (maximale Abmessung)

Quelle:
Textilbeton – Theorie und Praxis : Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6. - 5.6.2009. - Dresden, 2009, S.543

3.Recherche - Quellenangaben

Abbildung 26: Fassadenausschnitt Nordseite

Quelle:

Textilbeton – Theorie und Praxis : Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6. - 5.6.2009. - Dresden, 2009, S.544

Abbildung 27: Horizontalschnitt Fassade - Tragwerk

Quelle:

Textilbeton – Theorie und Praxis : Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6. - 5.6.2009. - Dresden, 2009, S.545

Abbildung 28: Rückansicht einer Fassadenplatte

Quelle:

Textilbeton – Theorie und Praxis : Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6. - 5.6.2009. - Dresden, 2009, S.548

Abbildung 29: Bewehrungsstruktur des Fassadenelements

Quelle:

Textilbeton – Theorie und Praxis : Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6. - 5.6.2009. - Dresden, 2009, S.549

Abbildung 30: Betonierverfahren: links: Laminieren der Platte_ rechts: Gießen des Steges

Quelle:

Textilbeton – Theorie und Praxis : Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6. - 5.6.2009. - Dresden, 2009, S.551

Abbildung 31: a.) Abmessungen Rautenelement

b.) Isometrie der Gesamtstruktur

c.) Isometrie der Bauteilfüugung mit integrierten Anschlussbauteilen für Hüllkonstruktionen

Quelle:

Schneider, H.: BFT (Betonwerk, Fertigteil, Technik), Gütersloh, 03/2006, S.36

Abbildung 32: Anwendungsbeispiel: Rautenfachwerktonne

Quelle:

Innovationen in der Betonbautechnik: 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 15. März 2006, S.50

Abbildung 33: Schalung einer Raute

Quelle:

Schneider, H.: BFT (Betonwerk, Fertigteil, Technik), Gütersloh, 03/2006, S.38

Abbildung 34: Prototyp des Rautenfachwerks aus Textilbeton

Quelle:

Innovationen in der Betonbautechnik: 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 15. März 2006, S.50

3.6.1.3 Abbildungsverzeichnis Ultrahochfester Beton

Abbildung 35: Kylltalbrücke / Normalbeton

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 224

Abbildung 36: Alternativentwurf Kylltalbrücke /UHFB

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 224

Abbildung 37: Füllereffekt von Silicastaub

Quelle:

Schießl,P.: Ultrahochfester Beton; Skriptum zu Vertiefervorlesung, Grundfachvorlesung des Fachs Baustoffkunde, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU München, München, 2005, S.10

Abrufbar auf:

<http://www.cbm.bv.tum.de/cbm/images/Lehre/Skripten/BauingenieurwesenMaster/hochfester-ultrahochfesterbeton.pdf>

Zugriff:15.04.1010

Abbildung 38: Gefüge von Normalbeton; REM Aufnahmen; Bildbreite ca. 20 µm

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 71

Abbildung 39: Gefüge von ultrahochfestem Beton; REM Aufnahmen; Bildbreite ca. 20 µm

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 71

Abbildung 40: Mischer für UHFB an der TU Graz

Quelle:

eigenes Bild

Abbildung 41: Drahtfaser im UHFB – Matrix Bildbreite 1,7 mm

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 340

Abbildung 42: Mischungsbestandteile zur Herstellung von UHFB (mit Stahlfasern)

Quelle:

Schießl,P.: Ultrahochfester Beton; Skriptum zu Vertiefervorlesung, Grundfachvorlesung des Fachs Baustoffkunde, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU München, München, 2005, S.8

Abrufbar auf:

<http://www.cbm.bv.tum.de/cbm/images/Lehre/Skripten/BauingenieurwesenMaster/hochfester-ultrahochfesterbeton.pdf>

Zugriff:15.04.1010

Abbildung 43: Schlagartig gebrochener Prüfzylinder aus UHFB ohne Stahlasern

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 316

Abbildung 44: Prüfzylinder aus UHFB mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 316

Abbildung 45: Spannungs-Dehnungs-Linie von UHFB ohne Fasern

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 316

Abbildung 46: Spannungs-Dehnungs-Linie von 3 Probekörpern aus UHFB mit 2,5 Vol.% Fasern

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 316

Abbildung 47: Druckspannungen der Faserbetone im Vergleich zu Normalbeton

Quelle:

Zimmermann, G.: Membran Beton Gitterschalen Tragwerke, Entwicklung und Vorbemessung, Books on Demand GmbH, Nordstedt, 2007, S.61

Abbildung 48: Abdeckung eines geschalteten Bauteils aus UHFB

Quelle:

eigenes Bild

Abbildung 49: Polypropylen – Faserhohlraum nach Brandbeanspruchung (1000-fache Vergrößerung, Bildbreite 120 µm)

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 370

Abbildung 50: Seonyu Footbridge, Seoul/Korea, 2002

Deutsches Baublatt Nr. 296, Oktober 2002, S.7

Abrufbar auf:

http://www.baublatt.de/archiv/2002_5/7.pdf

Zugriff: 15.04.2010

Abbildung 51: Querschnitt der Seonyu Footbridge (Maße in mm)

Quelle:

Ultra-Hochfester Beton, Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa, Tagungsbeiträge zu den 3. Kassler Baustoff- und Massivbautagen, Schriftenreihe Baustoff und Massivbau, Heft 2, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2003, S.65

Abbildung 52: Montage der Seonyu Footbridge, Seoul/Korea, 2002

Quelle:

Arconis Spezial: „Reactive Powder Concrete“ - Reaktionspulverbeton; Ultrahochfester Beton; Forschungsergebnisse; Entwicklung, Projekte; Band 2, Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004, Titelbild

Abbildung 53: Gärtnerplatzbrücke, Kassel, 2007

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 19

Abbildung 54: Querschnitt der Gärtnerplatzbrücke

Quelle:

Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 80

3.Recherche - Quellenangaben

Abbildung 55: Detail mit stahlbaummäßigem Anschluss des Fachwerks an die Obergurte; Klebefuge zwischen dem Obergurt und den Fahrbahnplatten

Quelle:
Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 109

Abbildung 56:Klebemörtle (2 Komponenten Epoxidharz SIKADUR 30) auf den Obergurten und den Stirnseiten der Platten

Quelle:
Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 17

Abbildung 57: Aufkleben der Fahrbahnplatten auf die Obergurte: Untersicht mit Klebefuge einer frisch aufgelegten Platte im Vordergrund

Quelle:
Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 16

Abbildung 58: Fotograf: Nicolas Janberg, 2005: Mautstation des Millau Viadukts/ Millau/Frankreich

Quelle:
<http://de.structurae.de/photos/index.cfm?JS=43063>
Zugriff: 16.04.2010

Abbildung 59: Fotograf: Nicolas Janberg, 2005: Untersicht der Betonschale

Quelle:
<http://de.structurae.de/photos/index.cfm?JS=45872>
Zugriff: 16.04.2010

Abbildung 60: Shawnessy Light Rail Transit Station in Calgary/Canada

Quelle:
<http://www.cpci.ca/?sc=potm&pn=monthly122003>
Zugriff: 17.04.2010

Abbildung 61: Einzelschalen aus Ductal®

Quelle:
<http://www.cpci.ca/?sc=potm&pn=monthly122003>
Zugriff: 17.04.2010

Abbildung62: Schalungsprozess einer Halbschale 1

Quelle:
<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>
Zugriff: 18.04.2010

Abbildung63: Schalungsprozess einer Halbschale 2

Quelle:
<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>
Zugriff: 18.04.2010

Abbildung 64: Treppenkonstruktion aus UHFB (Ductal®)/Birmingham/England

Quelle:
http://www.ductal-lafarge.fr/lafarge_DUCTAL/Newsletters/Ductal6FR-2711.pdf
Zugriff: 16.04.2010

Abbildung 65: Ausschnitt einer Treppe aus UHFB (Ductal®)/Birmingham

Quelle:
http://www.ductal-lafarge.fr/lafarge_DUCTAL/Newsletters/Ductal6FR-2711.pdf
Zugriff: 16.04.2010

Abbildung 66: Wendeltreppe aus UHFB (Ductal®)

Quelle:
http://www.ductal-lafarge.fr/lafarge_DUCTAL/CONTENT_SHEET/20071024/Homepage-Site_Ductal_1-fr.pdf
Zugriff: 16.04.2010

Abbildung 67: Ausschnitt einer Wendeltreppe aus UHFB (Ductal®)

Quelle:
http://www.ductal-lafarge.fr/lafarge_DUCTAL/CONTENT_SHEET/20071024/Homepage-Site_Ductal_1-fr.pdf
Zugriff: 16.04.2010

Abbildung 68: Flying Carpet beim Ungerer Museum/Straßburg/Frankreich

Quelle: http://www.ductal-lafarge.fr/lafarge_DUCTAL/Newsletters/Ductal6FR-2711.pdf
Zugriff: 16.04.2010

Abbildung 69: Fotograf: Philip Ruault: Villa Navarra/Le Muy/Frankreich

Quelle:
http://www.archpaper.com/e-board_rev.asp?News_ID=2939
Zugriff: 17.04.2010

Abbildung 70: Draufsicht der überkragenden Dachkonstruktion der Villa Navarra

Quelle:
Opus C, Concrete Architecture and Design, 05/2008, S.27

Abbildung 71: Dachkonstruktion der Villa Navarra

Quelle:
Opus C, Concrete Architecture and Design, 05/2008, S.26

Abbildung 72: Fassade mit Paneelen /ZAC Paris Gauche/Paris

Quelle:
<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>
Zugriff: 18.04.2010

Abbildung 73: Fassadenpaneel 6,60 m x 2,30 m

Quelle:
<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>
Zugriff: 18.04.2010

Abbildung 74: Befestigung eines Fassadenelements

Quelle:
<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>
Zugriff: 18.04.2010

Abbildung 75: Verwaltungsgebäude und Busgarage der RATP in Thiais/Paris

Quelle:
<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>
Zugriff: 18.04.2010

Abbildung 76: Gebäude der RATP in der Bauphase

Quelle:
<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>
Zugriff: 18.04.2010

Abbildung 77: Fassadendetails

Quelle:
<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>
Zugriff: 18.04.2010

Abbildung 78: Perspektiven im Hochhausbau

Quelle:
<http://www.futurebytes.ch/images/stories//2006/12/dubai-asia-towers-great.jpg>
Zugriff:14.04.2010

Tabelle 2: Vergleich von Kosten und Massen einer massiven Brücke aus Normalbeton und einer Alternativmöglichkeit in UHFB / Beispiel Kylltalbrücke

Quelle:
Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau , Heft 7, S. 333

Tabelle 3: Typische Zusammensetzung von Ductal® in kg/m³

Quelle:
Bergmeister, K.: Betonbauatlas 2010, S.418

Tabelle 4: Zusammensetzung des ultrahochfesten Betons BSI®/CERACEM

Quelle:
Jungwirth, J.: Versuche zum Tragverhalten von ultrahochfestem Beton, 2005, S.5
Abrufbar auf:
<http://ibeton.epfl.ch/Publications/2005/Jungwirth05a.pdf>
Zugriff: 17.10.2009

Tabelle 5: Mischungsprozedur von BSI®/CERACEM

Quelle:
Jungwirth, J.: Versuche zum Tragverhalten von ultrahochfestem Beton, 2005, S.5
Abrufbar auf:
<http://ibeton.epfl.ch/Publications/2005/Jungwirth05a.pdf>
Zugriff: 17.10.2009

3.6.1.4 Abbildungsverzeichnis Amorphe Betonarchitektur

Abbildung 79: Fotograf: Oliver S. Wittekind: MARTa/Herford/Deutschland

Quelle:
http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Herford_MARTa_88.jpg
Zugriff: 20.04.2010

3.Recherche - Quellenangaben

Abbildung 80: Innenansicht der amorphen Betonelemente

Deutsche Bauzeitung, Zeitschrift für Architekten und Bauingenieure, 05/2009

Abrufbar auf:

http://www.3dbeton.de/page7/files/page7_5.pdf

Zugriff: 13.10.2009

Abbildung 81: 3d Modell des Museums im Mc Neel Rhinocerus

Quelle:

<http://www.jdarchitekten.de/page3/page8/page38/page38.html>

Zugriff: 13.10.2009

Abbildung 82: Schnittflächenerzeugung im Mc Neel Rhinocerus

Quelle:

Eigene Grafik/2010

Abbildung 83: Schnittzeichnung der Schalungselemente

<http://www.jdarchitekten.de/page3/page8/page38/page38.html>

Zugriff: 13.10.2009

Abbildung 84: Füllelemente (blau) + amorphe Betonfläche

<http://www.jdarchitekten.de/page3/page8/page38/page38.html>

Zugriff: 13.10.2009

Abbildung 85: Darstellung des Polygonzugs/Koordinatenplan

Deutsche Bauzeitung, Zeitschrift für Architekten und Bauingenieure, 05/2009

Abrufbar auf:

http://www.3dbeton.de/page7/files/page7_5.pdf

Zugriff: 13.10.2009

Abbildung 86: Baustelle in Herford beim Aufstellen der Schalung

Deutsche Bauzeitung, Zeitschrift für Architekten und Bauingenieure, 05/2009

Abrufbar auf:

http://www.3dbeton.de/page7/files/page7_5.pdf

Zugriff: 13.10.2009

Abbildung 87: Schalelemente aus Holz vor ihrem Einsatz

Quelle:

<http://www.jdarchitekten.de/page3/page8/page38/page38.html>

Zugriff: 13.10.2009

Abbildung 88: Freiformwandflächen aus Ortbeton nach dem Ausschalen

Quelle:

<http://www.jdarchitekten.de/page3/page8/page38/page38.html>

Zugriff: 13.10.2009

Abbildung 89: Mumuth/Graz/Österreich

Quelle:

eigenes Bild

Abbildung 90: Nutzungsschema des Mumuths

Quelle:

Bauingenieur, Band 84, April 2009, S.197

Abbildung 91: Grafik: Convex; Aufbau Twist

Quelle:

convex/Grabner – Szyszkowitz ZT GmbH

Abbildung 92: Entwicklung der Twistgeometrie und des Foyerbereiches

Quelle:

Stahlbau, 78. Jahrgang, August 2009, S.525

Abbildung 93: Foto: Convex; Stahlkonstruktion des Twists

Quelle:

convex/Grabner – Szyszkowitz ZT GmbH

Abbildung 94: Bau des Twists - Radial verlaufende I-Träger

Quelle:

<http://www.steinerbau.at/images/MUMUTH%20Graz.pdf>

Zugriff: 21.04.2010

Abbildung 95: Rendering: Convex; 3d Modell des Mumuths im Allplan

Quelle:

convex/Grabner – Szyszkowitz ZT GmbH

Abbildung 96: Foto: Foto: Convex; Schalungselemente aus Claroporon mit Holzkonstruktion

Quelle:

convex/Grabner – Szyszkowitz ZT GmbH

Abbildung 97: Foto: Convex; links: Betonwand mit Schalung; rechts: Betonwand ausgeschalt

Quelle:

convex/Grabner – Szyszkowitz ZT GmbH

Abbildung 98: Hilfsgerüst/Ansicht von oben

Quelle:

<http://www.steinerbau.at/images/MUMUTH%20Graz.pdf>

Abbildung 99: Foto: Convex; fertig ausgeschalteter Twist

Quelle:

convex/Grabner – Szyszkowitz ZT GmbH

Abbildung 100: Endzustand des Twists

Quelle:

eigenes Bild

3.6.2 Literaturangaben

3.6.2.1 Literaturangaben_Faserbeton

3.6.2.1.1 Bücher

Bergmeister, Konrad, Fingerloos, Frank, Wörner, Johann – Dietrich: Betonkalender 2010, Brücken – Betonbau im Wasser, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2010

Dehn, Frank, König, Gert, Marzahn, Gero: Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2003

Grübl, Peter, Weigler, Helmut, Sieghart, Karl: Beton: Arten, Herstellung, Eigenschaften Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2001

Zimmermann, Gregor: Membran, Beton, Gitterschalen, Tragwerke: Entwicklung und Vorbemessung, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2007

3.6.2.1.2 Buchauszüge

Wesche, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile 2 - Beton, Mauerwerk, Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 1993, S. 326

Nachzulesen auf:

http://books.google.at/books?id=enKdVbPu20EC&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false

Zugriff: 10.03.2010

Bergmeister, Konrad, Wörner, Johann – Dietrich, Fingerloos, Frank: Betonkalender 2009, Konstruktiver Hochbau – Aktuelle Massivbaunormen, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2008, S.11 – 124, S.128 – 131

Nachzulesen auf:

<http://books.google.at/books?id=hUkeH7T8TUC&printsec=frontcover&dq=betonkalender+2009&cd=1#v=onepage&q=betonkalender%202009&f=false>

Zugriff: 02.03.2010

König, Gert, Nguyen, Viet Tue, Zink, Martin: Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2001, S. 293 – 297

Nachzulesen auf:

http://books.google.at/books?id=H6slmZ5r5hsC&pg=PA293&lpg=PA293&dq=entwicklung+faserbeton+berard&source=bl&ots=eRajdGWO-3&sig=6SfenCVcFgDr-1zey0qGo1htQgU&hl=de&ei=04-CS8GnB8GA_QajsujkBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=10&ved=0CCsQ6AEwCQ#v=onepage&q=&f=false

Zugriff: 22.02.2010

3.6.2.1.3 Internetressourcen

3.6.2.1.3.1 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel/Skripten

Geschichte des Stahlfaserbetons, Cemex Deutschland AG, 2005

Nachzulesen auf:

<http://www.cemex.de/stahlfaserbeton-geschichte.htm>

Zugriff: 22.02.2010

3.Recherche - Quellenangaben

Stahlfaserbeton, Heidelberg Cement

Nachzulesen auf:

http://www.betontechnische-daten.de/12/12_6.htm

Zugriff: 01.03.2010

Röck, Rudolf: Grundlagen über die Wirkung von Fasern im Beton, in: Faserbeton – Beiträge zum 11. Vilsener Baustofftag 2007, Vils, 2007, S. 3 – 7

Nachzulesen auf:

http://www.zementindustrie.at/file_upl/faserbeton_web.pdf

Zugriff: 16.02.2010

Schadde, Markus: Stahlfasern – Bewehrung im Hochbau, in: Faserbeton – Beiträge zum 11. Vilsener Baustofftag 2007, Vils, 2007, S. 15 – 19

Nachzulesen auf:

http://www.zementindustrie.at/file_upl/faserbeton_web.pdf

Zugriff: 16.02.2010

Schulz, Markus: Faserbewehrung aus der Sicht des Tragwerksplaners, in: Faserbeton – Beiträge zum 11. Vilsener Baustofftag 2007, Vils, 2007, S. 36 – 41

Nachzulesen auf:

http://www.zementindustrie.at/file_upl/faserbeton_web.pdf

Zugriff: 16.02.2010

Schulz, Markus: Anwendung von Fasern – Normen und Richtlinien, in: Faserbeton – Beiträge zum 11. Vilsener Baustofftag 2007, Vils, 2007, S. 42 – 44

Nachzulesen auf:

http://www.zementindustrie.at/file_upl/faserbeton_web.pdf

Zugriff: 16.02.2010

Stengel, T.: Betontechnologie II – Faserbeton, Skriptum zur Vertiefervorlesung WS 2006/2007, München, Juni 2005

Nachzulesen auf:

<http://www.cbm.bv.tum.de/cbm/images/Lehre/Skripten/BauingenieurwesenMaster/faserbeton.pdf>

Zugriff: 22.02.2010

Jacobs, Frank: Stahlfaserbeton, Frischbeton Gränichen AG, 21.10.2009

Nachzulesen auf:

http://www.graenichen.ch/de/dok/auto/kieswerk/02-Stahlfaserbeton_Vortrag_TFB_21-10-09.pdf

Zugriff: 22.02.2010

Richter, Thomas: Faserbeton, gestern, heute, morgen, Dresdner Betontag, 20.04.2005

Nachzulesen auf:

<http://www.betonzentrum-dresden.de/web/dokument/richter.pdf>

Zugriff: 22.02.2010

Krüger, Markus: Vorgespannter textilbewehrter Beton, Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2004

Nachzulesen auf:

http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/1985/pdf/Dissertation_Krueger.pdf

Zugriff: 09.03.2010

3.6.2.2 Literaturangaben_Textilbeton

3.6.2.2.1 Bücher

Bergmeister, Konrad, Fingerloos, Frank, Wörner, Johann – Dietrich: Betonkalender 2010, Brücken – Betonbau im Wasser, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2010

3.6.2.2.2 Zeitschriftenartikel

Textilbewehrung macht Beton salonfähig, Möbel aus textilbewehrtem Beton von Martin Kleppe, in: Kettenwirk – Praxis, 03/2008, S. 10

3.6.2.2.3 Internetquellen

3.6.2.2.3.1 Homepages

<http://martinkleppe.net/>

Zugriff: 29.03.2010

http://www.malkasten.org/archives/2008/11/martin_kleppe.php

Zugriff: 29.03.2010

<http://www.ag-bild-bau.de/>

Zugriff: 29.03.2010

3.6.2.2.3.2 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel

Leichter textilbewehrter Beton jetzt im alltäglichen Einsatz

Entwicklung Dresdner Forscher hat Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erhalten, Dresden, 16.08.2004

Nachzulesen auf:

<http://www.tu-dresden.de/biw/news/2004/zulassung.htm>

Zugriff: 22.03.2010

Multi – und Biaxialgelege – sichere Bankeinlagen, eine Bank aus textilbewehrtem Beton von Martin Kleppe, in: Kettenwirk – Praxis, 03/2009, S. 11

Nachzulesen auf:

http://www.karlmayer.com.cn/internet/docs/KWP_3_2009_DE.pdf;jsessionid=26A9DB7A29C8530D4D21A60FC6CF4BFF.kamosprod2

Zugriff: 07.04.2010

Textilbeton: innovativ, leicht, formbar

Nachzulesen auf:

http://www.beton.org/uploads/tx_ffbmevents/Flyer_DZT.pdf

Zugriff: 21.03.2010

Weltneuheit vorgestellt: Brücke aus textilbewehrtem Beton, Dresden, 12.April 2005

Nachzulesen auf:

<http://www.tu-dresden.de/biw/news/2005/textilbruecke.htm>

Zugriff: 22.03.2010

Brameshuber, Wolfgang: Textilbewehrter Beton – ein neuer Verbundwerkstoff, in: 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung „Innovationen in der Betonbautechnik“, Universität Karlsruhe (TH), Müller, H. S. et al. (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, S.45 – 52

Nachzulesen auf:

<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000004248>

Zugriff: 09.03.2010

Brameshuber, Wolfgang: Nanotechnologie – Innovationen für Betonwerkstoffe, Präsentation, Nanotecture 2006, VDI, Düsseldorf

Nachzulesen auf:

http://www.zukunftigetechnologien.de/nanotecture/brameshuber_praesentation.pdf

Zugriff: 06.04.2010

Hegger, Josef, Schneider, Hartwig N., Kulas, Christian, Schätzke, Christian: Dünnwandige, großformatige Fassadenelemente aus Textilbeton, in: Textilbeton – Theorie und Praxis : Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6. - 5.6.2009. - Dresden, 2009, S. 541 – 552

Nachzulesen auf:

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244051201638-96201>

Zugriff: 21.03.2010

3.Recherche - Quellenangaben

Hegger, Josef, Voss, Stefan, Schneider, Hartwig N.: Textilbewehrter Beton – Anwendungen eines neuen Werkstoffs, in: Arconis, Stuttgart, 03/2004, S.8 – 10
Nachzulesen auf:
http://sfb532.rwth-aachen.de/download/Textilbewehrter_Beton_Anwendungen_eines_neuen_Werkstoffes.pdf?class=HOArticle&SID=272&attrib=Download
Zugriff: 06.04.2010

Kleppe, Martin: Skulpturen, Experimentelle Architektur
Nachzulesen auf:
http://www.izbach.de/martin/techtexil07/download/martinkleppe_p200701.pdf
Zugriff: 29.03.2010

Offermann, Peter, Schön, Kerstin, Weiland, Silvio: Vorstellung deutsches Zentrum Textilbeton, Textilbewehrter Beton – eine Dresdner Innovation, Präsentation, 24.01.2008
Nachzulesen auf:
http://www.invest-in-saxony.de/set/157/Workshop2_Weiland-Textilbeton.pdf
Zugriff: 21.03.2010

Raupach, M., Orlovsky, J.: Textilbeton – ein neuer Verbundwerkstoff
Nachzulesen auf:
http://sfb532.rwth-aachen.de/download/Textilbeton_Ein_neuer_Verbundwerkstoff.pdf?class=HOConfArticle&SID=424&attrib=Download
Zugriff: 21.03.2010

Rosenbaum, Linda: Nachwuchskunst: Fliegenklatschen und Textilbeton, 25.10.2008
Nachzulesen auf:
<http://www.volksfreund.de/totallokal/region/Region-Trier-Kunstfoerderpreis-Trier-Saarburg-Kunst-Kultur-Kuenstler-Nachwuchskunst-Fliegenklatschen-und-Textilbeton;art1129,1865463>
Zugriff: 29.03.2010

Schneider, Hartwig N., Schätzke, Christian, Hegger, Josef, Stefan, Voss: Tragwerkskonstruktionen/Rautenförmige Gitterstrukturen, Stabnetze aus Textilbeton, in: Betonwerk, Fertigteil, Technik (BFT), Gütersloh, 03/2006, S.34 – 40
Nachzulesen auf:
http://six4.bauverlag.de/sixcms_4/sixcms_upload/media/1232/schaetzke_0306.pdf
Zugriff: 30.03.2010

3.6.2.2.3.3 Videoclips

Textilbeton Folge 1 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=bKtdgbn1FJQ>
eingestellt am 03.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 2 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=lxHjOysriY&NR=1>
eingestellt am 05.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 3 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=Cxjra2aiQYs&feature=related>
eingestellt am 05.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 4 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=kXd--kiPI5w&feature=related>
eingestellt am 04.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 5 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=Fmj6m6menqc&NR=1>
eingestellt am 04.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 6 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=Nt8f3iTS3TA&NR=1>
eingestellt am 05.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 7 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=4J38rP63zSk&feature=related>
eingestellt am 05.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 8 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
http://www.youtube.com/watch?v=96Fgd_urwbU&feature=related
eingestellt am 11.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 9 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=CLeL1iO4fpl&feature=related>
eingestellt am 17.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 10 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=8WOj7r9464U&NR=1>
eingestellt am 21.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 11 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=jUEmYUWRz0U&NR=1>
eingestellt am 27.06.2008
Zugriff: 22.03.2010

Textilbeton Folge 12 Beton Light von DFG Science TV
Quelle:
<http://www.youtube.com/watch?v=jUEmYUWRz0U&NR=1>
eingestellt am 06.07.2008
Zugriff: 22.03.2010

3.6.2.3 Literaturangaben UHFB

3.6.2.3.1 Bücher

Bergmeister, Konrad, Fingerloos, Frank, Wörner, Johann – Dietrich: Betonkalender 2010, Brücken – Betonbau im Wasser, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2010

Dehn, Frank, König, Gert, Marzahn, Gero: Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2003

Zimmermann, Gregor: Membran, Beton, Gitterschalen, Tragwerke; Entwicklung und Vorbemessung, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2007

3.Recherche - Quellenangaben

3.6.2.3.2 Internetquellen

3.6.2.3.2.1 Homepages

<http://www.buildadelaide.com.au/articlesideas/index.html?aai=1216101751>
Zugriff: 18.04.2010

3.6.2.3.2.2 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel/Skripten

A world first for the Villa Navarra by Rudy Ricciotti, LaFarge, Mai 2008
Nachzulesen auf:
http://www.lafarge.com/05142008-journalists-press_kit_Navarra-uk.pdf
Zugriff: 18.04.2010

Betonfassade mit Noppenstruktur, 16.04.2008
Nachzulesen auf:
<http://www.beton.org/sixcms/detail.php?id=44794>
Zugriff: 19.04.2010

Die Gärtnerplatzbrücke in Kassel – Praktisches Ergebnis von 10 Jahren Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Ultra-Hochfesten Betons an der Universität Kassel, in: Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 9 - 20
Nachzulesen auf:
<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>
Zugriff: 18.10.2009

Gelungene Premiere für den „Beton der Zukunft“, in: Deutsches Baublatt Nr.296, Oktober 2002, S.7
Nachzulesen auf:
http://www.baublatt.de/archiv/2002_5/7.pdf
Zugriff:14.04.2010

Lafarge Ductal® Newsletter –N°7, Juli 2008
Nachzulesen auf:
<http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:COM7-kCu7aEJ:www.ductal-lafarge.com/Newsletters/Ductal%25207ANG.pdf+badia+berger+ZAC+paris+rive+gauche&hl=de&gl=at&pid=bl&srcid=ADGEEsgm0NZ85hH2N0ZuEzTpvRYHRBhWyNLBVw2rONGI8trV6oPL1GQ8tRMMi58SOc4ZTr50Arke6kSEY77yViicL86rwjUqyaf1r8H6bRU-FsPylUVQRpKxeV4cb6zSY1wPddSe&sig=AHIEtbRO0OSvz0FSfMA8MUvAC0rgPnKIGg>
Zugriff: 18.04.2010

Mautstation des Millau – Viadukts
Nachzulesen auf:
<http://de.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0012224>
Zugriff: 16.04.2010

Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton (UHPC) zur Leistungssteigerung, Umweltentlastung und Kostensenkung im Betonbau, Ausschreibung DFG – Schwerpunkt, Kassel, 2004
Nachzulesen auf:
<http://www.uni-kassel.de/fb14/baustoffkunde/spp/SPP-UHPC-Ausschreibung.pdf>
Zugriff: 18.10.2009

Shawnessy Light Rail Transit Station
Nachzulesen auf:
<http://www.cpci.ca/?sc=potm&pn=monthly122003>
Zugriff: 17.04.2010

Step right up to a Ductal® Staircase, 23.10.2007
http://www.ductal-lafarge.fr/lafarge_DUCTAL/CONTENT_SHEET/20071024/Homepage-Site_Ductal_1-fr.pdf
Zugriff: 16.04.2010

The Vizor of War, in: Opus C, Concrete Architecture and Design, 5/2008, S.22 – 28
Nachzulesen auf:
http://www.lamoureux-ricciotti.com/pdf/opus_c_villa_navarra.pdf
Zugriff: 17.04.2010

Ultrahochfester Beton mit duktilem Verhalten, hipo (Hessische Intellectual Property Offensive)
Nachzulesen auf:
http://www.hipo-online.de/files/expo_Ultrahochfester_Beton_hipo_1_140108.pdf
Zugriff: 18.10.2009

Behloul, Mouloud, Batoz, Jean-Francois: Ductal® applications over the last Olympiad, in: Ultra High Performance Concrete (UHPC), Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.10, Heft 10, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2008, S. 855 - 862
Nachzulesen auf:
<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-376-2.volltext.frei.pdf>
Zugriff: 16.04.2010

Behloul, Mouloud, Ricciotti, Rudy, Ricciotti, Romain, Fabio, Pallot, Pierre, Lebouef, Jacky: Ductal® Pont du Diable footbridge, France, 2008
Nachzulesen auf:
<http://www.abece.com.br/web/restrito/restrito/Pdf/CH048.pdf>
Zugriff: 17.04.2010

Bornemann, Roland, Schmidt, Michael, Vellmer, Carsten: Brandverhalten ultra-hochfester Betone, in: beton 52, Heft 9, 2002, S.418 – 422
Nachzulesen auf:
<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>
(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 387 – 398)
Zugriff: 18.10.2009

Bornemann, Roland, Schmidt, Michael, Fehling, Ekkehard, Middendorf, Bernhard: Ultra-Hochleistungs-beton UHPC – Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten, in: Beton- und Stahlbetonbau 96, Heft 7, 2001, S.458 – 467
Nachzulesen auf:
<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>
(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 432 – 451)
Zugriff: 18.10.2009

Durukal, Agah, Batoz, Jean-Francois: Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Footbridges, in: Ultra-Hochfester Beton, Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa, Tagungsbeiträge zu den 3. Kassler Baustoff- und Massivbautagen, Schriftenreihe Baustoff und Massivbau, Heft 2, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2003, S.59 – 67
Nachzulesen auf:
<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-518-6.volltext.frei.pdf>
Zugriff: 13.10.2009

Fehling, Ekkehard, Leutenbecher, Torsten: Ultrahochfester Beton – Bemessungsgrundlagen und Anwendungsmöglichkeiten, in: Braunschweiger Bauseminar 2004 „Qualität im Bauwesen“, Heft 181, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig, 2004, S.93 – 102
Nachzulesen auf:
<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>
(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 287 – 299)
Zugriff: 18.10.2009

Fehling, Ekkehard, Bunje Kai, Leutenbecher, Torsten: Bemessung für Biegung und Querkraft bei Bauteilen aus UHFB, in: Beiträge aus Praxis und Wissenschaft, Bauwerk-Verlag, 2003, S.183 – 198
Nachzulesen auf:
<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>
(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 315 – 330)
Zugriff: 18.10.2009

3.Recherche - Quellenangaben

Fehling, Ekkehard, Leutbecher Torsten: Ultrahochfester Beton – Bemessung und Konstruktion: Fachtagung des DafStb „Neue Entwicklungen im Betonbau“ (2007), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN e. V., Berlin, 2007, S.A39-A51

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 25 – 39)

Zugriff: 18.10.2009

Fehling, Ekkehard, Leutbecher, Torsten: Ultra High Performance Concrete (UHPC) – a challenge for structural design, in: *fib Symposium "keep Concrete Attractive"*, Publishing Company of Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2005, Proc. Vol. 1, pp 251-256

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 184 – 191)

Zugriff: 18.10.2009

Fehling, Ekkehard, Leutenbecher, Torsten: UHPC – Eine Herausforderung, in: *Massivbau in ganzer Breite, Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof.Dr.-Ing. Konrad Zilch*, (Hrsg.: Förderverein Massivbau der TU München e.V.), Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 220 – 226)

Zugriff: 18.10.2009

Haist, Michael, Müller, Harald S.: Selbstverdichtender Beton, in: 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung „Innovationen in der Betonbautechnik“, Universität Karlsruhe (TH), Müller, H. S. et al. (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, S.9 - 21

Nachzulesen auf:

<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000004248>

Zugriff: 09.03.2010

Hart, Sara: Concrete is forever, The Architekt Newspaper, 11.05.2008

Nachzulesen auf:

Quelle:

http://www.archpaper.com/e-board_rev.asp?News_ID=2939

Zugriff: 17.04.2010

Hermann, Rainer: Höchster Wolkenkratzer der Welt eröffnet, in: *Frankfurter Allgemeine Zeitung für Deutschland*, 25.01.2010

Nachzulesen auf:

<http://www.alternative-capital-invest.com/fileadmin/media/pdfs/pressemeldungen/Burj.pdf>

Zugriff: 14.04.2010

Hillemeier, Bernd: Hochleistungsbeton – Internationale Entwicklungen, in: *ZEMENT + BETON*, 1/2004

Nachzulesen auf:

http://www.zement.at/Service/literatur/fileupl/HLBeton_IntEntw_01_04.pdf

Zugriff: 13.01.2010

Jungwirth, Jörg, Muttoni, Aurelio: Versuche zum Tragverhalten von ultrahochfestem Beton, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut de structures – Construction en béton*, 2005

Nachzulesen auf:

<http://ibeton.epfl.ch/Publications/2005/Jungwirth05a.pdf>

Zugriff: 17.10.2009

Müller, Harald S.: Betonbautechnik – neue Entwicklungen im Überblick, in: 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung „Innovationen in der Betonbautechnik“, Universität Karlsruhe (TH), Müller, H. S. et al. (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, S.1 – 7

Nachzulesen auf:

<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000004248>

Zugriff: 09.03.2010

Perry, V.H., Zakariasen D.: First Use of Ultra-High Performance Concrete for Innovative Train Station Canopy

Nachzulesen auf:

http://www.cement.org/tech/cct_con_design_uhpc.asp

Zugriff: 16.04.2010

Perry, V.: Ultra-High Performance Ductile Concrete, *Construct* 2009, Indianapolis, 16. – 19. Juni 2009

Nachzulesen auf:

<http://www.constructshow.com/Assets/Content/doc/TH17%20-%20Ultra-High%20Performance%20Ductal%20Concrete.pdf>

Zugriff: 18.04.2010

Racky, Peter: Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von UHPC, in: *Ultra-Hochfester Beton, Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa*, Tagungsbeiträge zu den 3. Kassler Baustoff- und Massivbautagen, Schriftenreihe Baustoff und Massivbau, Heft 2, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2003, S.59 – 67

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-518-6.volltext.frei.pdf>

Zugriff: 13.10.2009

Rübner, Katrin, Klobes, Peter, Prinz, Carsten, Hempel, Simone: Charakterisierung der Porenstruktur von ultrahochfestem Beton, Fachgruppe Baustoffe und Fachgruppe Strukturanalytik, Polymeranalytik, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Institut für Baustoffe, technische Universität Dresden

Nachzulesen auf:

http://www.bam.de/de/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_7/fg71/fg71_medien/fg71_porenstruktur_uhpc.pdf

Zugriff: 17.10.2009

Rümmelin, Andreas, Timo: Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen, Diplomarbeit, Fakultät Bauingenieurwesen der Fachhochschule Stuttgart, 2005

Nachzulesen auf:

<http://www.ruemmelin.info/Beruf/Diplomarbeit/Diplomarbeit.pdf>

Zugriff: 14.04.2010

Scheydt, Jennifer C., Herold, Gunther, Müller, Harald S.: Ultrahochfester Beton, in: 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung „Innovationen in der Betonbautechnik“, Universität Karlsruhe (TH), Müller, H. S. et al. (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, S.33 – 44

Nachzulesen auf:

<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000004248>

Zugriff: 09.03.2010

Schießl, P.: Ultrahochfester Beton: Skriptum zu Vertiefervorlesung, Grundfachvorlesung des Fachs Baustoffkunde, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU München, München, 2005

Nachzulesen auf:

<http://www.cbm.bv.tum.de/cbm/images/Lehre/Skripten/BauingenieurwesenMaster/hochfester-ultrahochfesterbeton.pdf>

Zugriff: 15.04.2010

Schmidt, Michael, Fehling, Ekkehard: Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe, in: 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength- and High-Performance-Concrete, ACI Washington, 2005, SP. 228-4 pp 51-78

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 192 – 219)

Zugriff: 18.10.2009

Schmidt, Michael, Fehling, Ekkehard, Bornemann, Roland, Bunje, Kai, Teichmann, Thomas: Ultra-Hochfester Beton: Perspektive für die Betonfertigteilindustrie, in: *Betonwerk u. Fertigteile – Technik BFT*, Heft 3, 2003, S.16 – 29

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 353 – 374)

Zugriff: 18.10.2009

3.Recherche - Quellenangaben

Schmidt, Michael, Fehling, Ekkehard, Teichmann, Thomas, Bunje Kai, Bornemann, Roland, Geisenhanslüke, Carsten: Ultra-Hochleistungsbeton: Neue Dimensionen im Betonbau, in: VDI-Jahrbuch 2003 – Bautechnik 15. Jahrgang, VDI-Gesellschaft Bautechnik, Düsseldorf, 2003, S.53 – 77

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 331 – 352)

Zugriff: 18.10.2009

Schmidt, Michael: Beton – Ein High-Tech-Baustoff; Stand und zukünftige Entwicklungen im Betonbau, in: Kasseler Wasserbau – Mitteilungen, Heft 12, 2001, S.391 – 403

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 452 – 463)

Zugriff: 18.10.2009

Schmidt, Michael, Bornemann, Roland: Möglichkeiten und Grenzen von Hoch- und Ultra-Hochfestem Beton, in: ibausil – 14. Internationale Baustofftagung, Weimar, 2000, Tagungsband S. 1-1083 – 1-1091

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 465 – 473)

Zugriff: 18.10.2009

Schmidt, Michael, Herget, Elmar: Bauen mit UHPC – Aktueller Stand und Ausblick aus der Sicht der Wissenschaften und der Praxis, 51. BetonTage, Neu-Ulm, 2007, in: Betonwerk und Fertigteil Technik BFT, 73. Jahrgang, Heft 2, 2007

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 21 – 24)

Zugriff: 18.10.2009

Schmidt, Michael, Fehling, Ekkehard: Grundlagen der Betontechnologie von Hoch- und Ultra – Hochleistungsbeton und Anwendung von UHPC im Brückenbau, : VSVI Hessen, Vortragsveranstaltung Straßenbautechnik, Friedberg, 2006

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 70 – 81)

Zugriff: 18.10.2009

Schmidt, Michael, Bunje, Kai, Fehling, Ekkehard, Teichmann, Thomas: Brückenfamilie aus Ultra-Hochfestem Beton in Niestetal und Kassel, in: Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 3, 2006, S. 198 – 204

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 82 – 97)

Zugriff: 18.10.2009

Schmidt, Michael: Von der Nanotechnologie zum Ultra-Hochfesten Beton, in: ibausil, Tagungsband, Weimar, 2006 S. 2-1405 – 2-1416

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 98 – 110)

Zugriff: 18.10.2009

Schmidt, Michael: Beton auf dem Weg zum High-Tech-Werkstoff - Leistungsfähiger als Stahl? 49. BetonTage, Neu-Ulm, 2005, in: Betonwerk und Fertigteil Technik BFT, 71. Jahrgang, Heft 2, 2007, S.14 – 16

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 126 – 129)

Zugriff: 18.10.2009

Schwenker, Björn: Beton zum Biegen, 18.04.2007

Nachzulesen auf:

<http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/616421/>

Zugriff: 18.10.2009

Teichmann, Thomas, Krealaus, Ralf: Konstruktives Kleben von ultrahochfestem Beton – Laboruntersuchungen und praktische Anwendung, 51. BetonTage, Neu-Ulm, 2007, in: Betonwerk und Fertigteil Technik BFT, 73. Jahrgang, Heft 2, 2007, S.22 – 23

Nachzulesen auf:

<http://www.upress.uni-kassel.de/online/frei/978-3-89958-347-2.volltext.frei.pdf>

(10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No.7, Heft 7, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007, S. 41 – 43)

Zugriff: 18.10.2009

Walraven, Joost C.: From Conventional to HIGH Performance Steel Fibre Concrete, in: 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung „Innovationen in der Betonbautechnik“, Universität Karlsruhe (TH), Müller, H. S. et al. (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, S.23 – 33

Nachzulesen auf:

<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000004248>

Zugriff: 09.03.2010

3.6.2.4 Literaturangaben Amorphe Betonarchitektur

3.6.2.4.1 MARTa

3.6.2.4.1.1 Internetquellen

3.6.2.4.1.1.1 Homepages

<http://www.3dbeton.de/>

Zugriff: 13.10.2009

<http://www.martaherford.de>

Zugriff: 20.04.2010

<http://www.jmberlin.de/main/DE/04-Rund-ums-Museum/01-Architektur/04-architekturreisen.php>

Zugriff: 20.04.2010

3.6.2.4.1.1.2 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel/Skripten

3D Schalungsplan für das Museum MARTa, Herford von Frank Ghery

Quelle:

<http://www.jdarchitekten.de/page3/page8/page38/page38.html>

Zugriff: 13.10.2009

Schalplanung für das MARTa in Herford, in: Deutsche Bauzeitung, Zeitschrift für Architekten und Bauingenieure, 05/2009

http://www.3dbeton.de/page7/files/page7_5.pdf

Zugriff: 13.10.2009

3.6.2.4.2 MUMUTH

3.6.2.4.2.1 Zeitschriftenartikel

Alles dreht sich um den Twister – Das Mumuth in Graz, in: Deutsche Bauzeitung, 5/2009, S. 26 – 32

Haus für Musik und Musiktheater der Kunstuniversität Graz (KUG), in: Detail, 06/2009, S. 606 – 612

Monolith mit filigraner, metallischer Gebäudehülle, in: Detail, 07/08/2009, S. 792

3.Recherche - Quellenangaben

Mumuth – Haus für Musik und Musiktheater der Kunstuniversität Graz, in: zement + beton, 3/09, S.13 - 15

Mumuth Graz - Architektonisches Crescendo, in: Bauzeitung, 13/09, S36 – 38

Schmid, Volker, Mandl, Peter, Winter, Paul: Hybride Strukturen frei geformt – Das Haus für Musik und Musiktheater in Graz, in: Stahlbau, 78. Jahrgang, August 2009, S.523 - 530

Wiesflecker Johannes: UNStudio, in: architektur aktuell, No. 350, 05/2009, S.117 – 127

Wojciech, Czaja: Let's Twist, in: Baumeister, B4/2009, S. 14 - 15

3.6.2.4.2.1 Internetquellen

3.6.2.4.2.1.1 Homepages

<http://www.convex.at>

Zugriff: 14.01.2009

3.6.2.4.2.1.1 Zeitschriftenartikel/Veröffentlichungen/Präsentationen/Onlineartikel/Skripten

Grazer Mumuth lässt Wiener Oper alt aussehen, in: BIG Business, Nr.4, 12/2008, S. 32 – 38

Nachzulesen auf:

http://www.big.at/fileadmin/user_upload/Content/Media/08-Press/BIG_Business_IV.pdf

Zugriff: 28.09.2009

Graz Music Theatre goes Futuristic

Nachzulesen auf:

<http://www.tuvie.com/graz-music-theater-goes-futuristic/>

Zugriff: 13.01.2010

Haus für Musik und Musiktheater in Graz

Nachzulesen auf:

http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Beton-Haus-fuer-Musik-und-Musiktheater-in-Graz-A_775168.html

Zugriff: 14.01.2010

Mumuth

Nachzulesen auf:

<http://architekturblog.wordpress.com/category/wettbewerb/page/2/>

Zugriff: 16.01.2009

Mumuth, House for Music and Music Theatre, Graz Austria, in: The Plan, N.032, 03/2009, S.50 – 62

Nachzulesen auf:

<http://www.unstudio.com/nl/unstudio/media/articles-for-download/date/0>

Zugriff: 16.01.2010

Mumuth – Neubau Haus für Musik und Musiktheater Graz, Referenzprojekt Steiner Bau GesmbH

Nachzulesen auf:

<http://www.steinerbau.at/images/MUMUTH%20Graz.pdf>

Zugriff: 21.04.2010

The Mumuth, Graz Music Theatre by UNStudio in Austria, 19. Februar 2009

Nachzulesen auf:

<http://www.nikiomahe.com/architecture-design/the-mumuth-graz-music-theatre-by-unstudio-in-austria/>

Zugriff: 28.09.2009

Briegleb, Till: Toller Twist in trüber Kiste, in: Art, 05/2009, Seite 123

Nachzulesen auf:

<http://www.art-magazin.de/div/heftarchiv/2009/5/OGOWTEGWPPPTSPPOGETSRHGAAASSGRSPWSPW/Toller-Twist-in-tr%FCber-Kiste>

Zugriff: 15.01.2010

Mandl, Peter, Schmid, Volker: Haus für Musik und Musiktheater „Mumuth“ der Universität für Musik und darstellende Kunst

Nachzulesen auf:

<http://www.petermandl.eu/projekte/MUMUTH%20Kurztext%20deutsch.pdf>

Zugriff: 14.01.2010

Szyszkowitz, T., Zenker, G., Handel, E.: MUMUTH – Frei geformtes Raumtragwerk, in: Bauingenieur, Band 84, April 2009, S.197 – 183

Nachzulesen auf:

<http://www.convex.at/index.php?pageid=100&l=1>

Zugriff: 21.04.2010

Tschavgova, Karin: Mumuth, Haus für Musik und Musiktheater

Nachzulesen auf:

http://www.nextroom.at/building_pdf.php?building_id=1864&article_id=31206

Zugriff: 28.09.2009

UNstudio: Graz Music Theatre, in: Concept, Vol 119, 03/2009, S.50 – 55

Nachzulesen auf:

<http://www.unstudio.com/nl/unstudio/media/articles-for-download/date/0>

Zugriff: 16.01.2010

4. Erkenntnis

Im Zuge der Recherche, welche das Projekt immer parallel begleitet hat, konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Bestehende Verfahren wurden analysiert und daraufhin eigene Ideen überprüft und verbessert.

Thematik: Betontechnologie

Der Baustoff Beton hat sich in den letzten Jahrzehnten aufgrund von neuen Forschungen und den daraus folgenden Ergebnissen von einem normalen Werkstoff zu einem Hochleistungsbaustoff entwickelt.

Vor allem der High-Tech Werkstoff UHFB findet in der Praxis immer mehr Anwendung und spielt auch im Rahmen unseres Projektes eine große Rolle. Dadurch, dass die herkömmliche Bewehrung entfallen kann, sind individuellere Formungsmöglichkeiten realisierbar. Doch auch dem Textilbeton muss eine Rolle im „neuen Bauen“, hier ist das Entwerfen und Konstruieren der nächsten Jahrzehnte gemeint, zugesprochen werden. Seine Anwendungen lassen sich bisher quasi an einer Hand abzählen, ein gewisses Zukunftspotenzial hat sich aber definitiv herauskristallisiert.

Thematik: amorphes (formloses) Bauen

Die Idee, amorphe Formen zu verwirklichen, gibt es schon seit einigen Jahrzehnten. Bezüglich diverser Materialien, sei es z.B. im Designbereich mittels diverser Kunststoffe, ist dies schon seit längerem möglich. Im Bereich des Betonbaus betritt man hier aber noch Neuland, da bisher sehr wenige Erfahrungen anhand von Referenzprojekten vorliegen.

Doch jene Projekte, deren Teile schon aus dreidimensionalen, frei im Raum gekrümmten Betonbauteilen bestehen, gelten als Vorreiter in dieser Branche. Natürlich gab es noch Fehler, gepaart mit einigen Problemen, doch die Tatsache, dass diese Projekte dennoch gebaut werden konnten, beweist, dass Lösungen gefunden wurden, wenn auch manchmal mit Umwegen. Die Ergebnisse können sich letztendlich sehen lassen und der Mut, neue Wege zu beschreiten, wurde belohnt.

5. Machbarkeit

Anhand von zwei Referenzprojekten im größeren Rahmen konnte nachgewiesen werden, dass die Baubarkeit von amorpher Architektur aus Beton möglich ist. Doch auch diverse kleinere, amorph geformte Projekte konnten schon aus Beton ausgeführt werden. Aufgrund dessen, dass die Information bezüglich dieser Entwürfe meist nur im Ergebnis besteht, wurden sie im Zuge der Recherche nicht aufgeführt.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass ein frei geformtes Betonobjekt, wegen der technischen Möglichkeiten, hier sind moderne Hard- u. Software gemeint, insofern man diese beherrscht, am Computer im ersten Schritt der digitalen Entwurfsrealisierung herstellbar ist. Doch vom PC auf die Baustelle ist es noch ein weiter Weg.

Schon während der digitalen Prozesse gibt es, wie anhand des Mummuths und des Martas nachgewiesen werden konnte, diverse Fragestellungen, die eine Lösung erfordern. Dies liegt vor allem daran, dass es keine geeigneten Schnittstellen zwischen den verschiedenen Programmen, welche nötig sind, die Schritte von Entwurf, Konstruktion und Tragwerk zu verbinden, gibt. Jede Software ist auf eine gewisse Thematik spezialisiert, doch die Kompatibilität untereinander ist nicht gegeben.

An dieser Stelle müssen nun die Prozesse, welche bei den beiden Referenzprojekten zu einem Ergebnis geführt haben, bewertet werden. Daraufhin können gewisse Teile abgeleitet und andere durch bessere Lösungen ersetzt werden. Dieser Ablauf kann aber im Vorhinein nicht komplett festgelegt werden, sondern ergibt sich aufgrund von diversen Versuchen und dem Ausloten verschiedener Möglichkeiten während dem Projektlauf.

Den Baustoff Beton betreffend muss natürlich eine Entscheidung vorliegen, welche im Falle unseres Projektes auf ultrahochfesten Beton festgelegt ist. Doch die Materialentscheidung alleine ist noch wenig aussagekräftig, hier gilt es einerseits, sich eine gewisse Kenntnis bezüglich des Werkstoffs anzueignen und andererseits zu überlegen, wie dieser daraufhin seine Anwendung finden soll. Hier steht vor allem die Frage von Ortbeton oder Fertigteil im Raum.

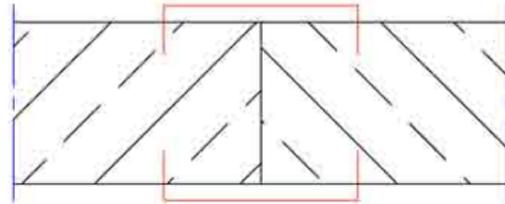
Die vorliegenden Projekte Mummuth und Marta haben Ortbeton gewählt, es gilt nun zu bewerten, ob dies in unserem Falle auch zutreffen soll, oder ob die Entscheidung für Fertigteile näher liegt.

Diverse Projekte, welche im Zuge von Beispielbauten aus UHFB näher betrachtet wurden, haben gezeigt, dass die Praktikabilität von Fertigteilen außer Frage steht. Von wirtschaftlichen Vorteilen und der Möglichkeit einer rascheren Projektabwicklung ausgehend, liegt die Entscheidung für Fertigteile näher als für Ortbeton.

Schließlich muss noch der Punkt der Schalung abgeklärt werden. Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten amorphe Betonelemente praktikabel zu schalen, in den Referenzprojekten werden beide vorgestellt. Auch hier gilt es nun wieder jene zu betrachten, abzuwiegen und dann zu entscheiden, ob für uns eine dieser Möglichkeiten, in gleicher oder verbesserter Form, zum Einsatz kommen kann. Da diese Entscheidung vom noch zu entwickelnden Verbindungsdetail der einzelnen Betonfertigteile abhängen könnte, kann zu diesem Zeitpunkt noch keine getroffen werden. Die konkrete Erläuterung im Hinblick auf diesen Punkt erfolgt nach den zuerst erforderlichen Schritten.

6. Verbindungsarten - Auflistung, Bewertung und Entscheidung

Schematische Möglichkeiten der mechanischen Verbindung zweier Betonfertigteile:



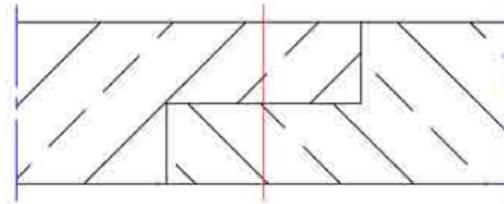
Zwei Stahlplatten werden mit den Betonelementen verschraubt.

Vorteil:

- schnell montiert
- geringer Planungsaufwand
- keine Veränderung der Endausbildungen des Betons nötig

Nachteil:

- sichtbare Konstruktion
- bei gewölbten Bauteilen zusätzliche Arbeitsschritte nötig (Platte biegen etc.)
- bei geringer Betondicke wird Durchgangsloch nötig
- starke Biegebeanspruchung der Verbindungsbolzen



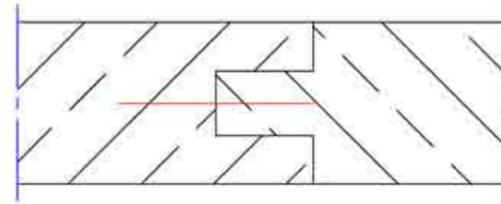
Die abgestuften Betonelemente werden durch einen Bolzen gesichert und verbunden.

Vorteil:

- rasche Montage
- wenig Bauteile
- erhöhte Verbindungsfläche
- erleichterte Montage, da durch die Formgebung der Endausbildung eine Vorbestimmung der Position möglich wird

Nachteil:

- sichtbare Konstruktion
- erhöhter Planungs- u. Schalungsaufwand
- starke Biegebeanspruchung der Verbindungsbolzen



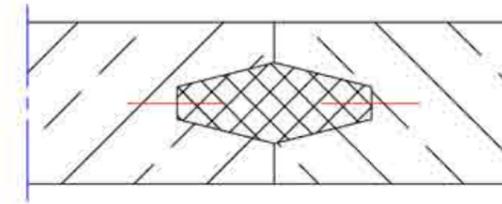
Durch die Endausformung wird ein Ineinanderstecken der Betonteile möglich, die weiters mit einem Betonanker verklebt werden sollen.

Vorteil:

- keine sichtbare Verbindung
- Anker wird nur auf Zug beansprucht
- erleichterte Positionierung der Betonteile durch die Ausbildung der Enden

Nachteil:

- nicht lösbare Verbindung
- erhöhter Planungs- und Schalungsaufwand
- bei gewölbten Bauteilen kommt es zu einer Querschnittserhöhung



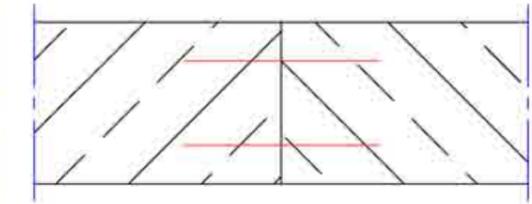
Ein zusätzliches zugfesteres Element dient als Zwischenstück bei der Verbindung. Zwei Betonanker werden mit den Elementen verklebt.

Vorteil:

- keine sichtbare Verbindung
- Anker werden nur auf Zug beansprucht
- erleichterte Positionierung der Betonteile durch die Ausbildung der Enden und den Einschubteil
- höhere Zugbeanspruchung möglich, da die nötige Zugkraft auf 2 Anker aufgeteilt wird und ein größeres Einzugsgebiet für die Kräfteverteilung möglich wird
- geringerer Schalungsaufwand, da die Enden symmetrisch ausgebildet sind

Nachteil:

- nicht lösbare Verbindung
- erhöhter Planungsaufwand
- zusätzliches Element nötig
- bei gewölbten Bauteilen kommt es zu einer Querschnittserhöhung



Die Betonelemente werden mit in 2 Ebenen liegenden Stahlbetonankern verklebt.

Vorteil:

- geringer Schal- u. Planungsaufwand
- keine sichtbare Verbindung
- geringe Bauteilanzahl nötig
- Anker wird nur auf Zug beansprucht

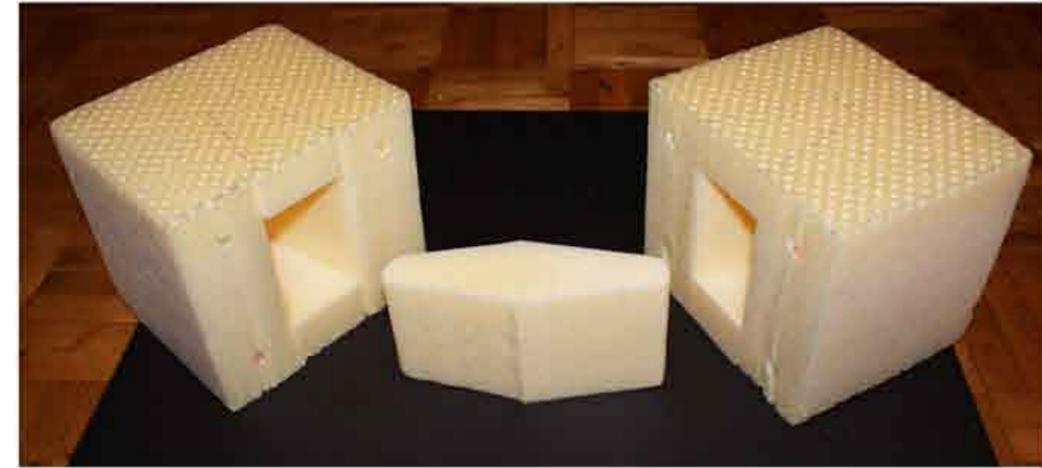
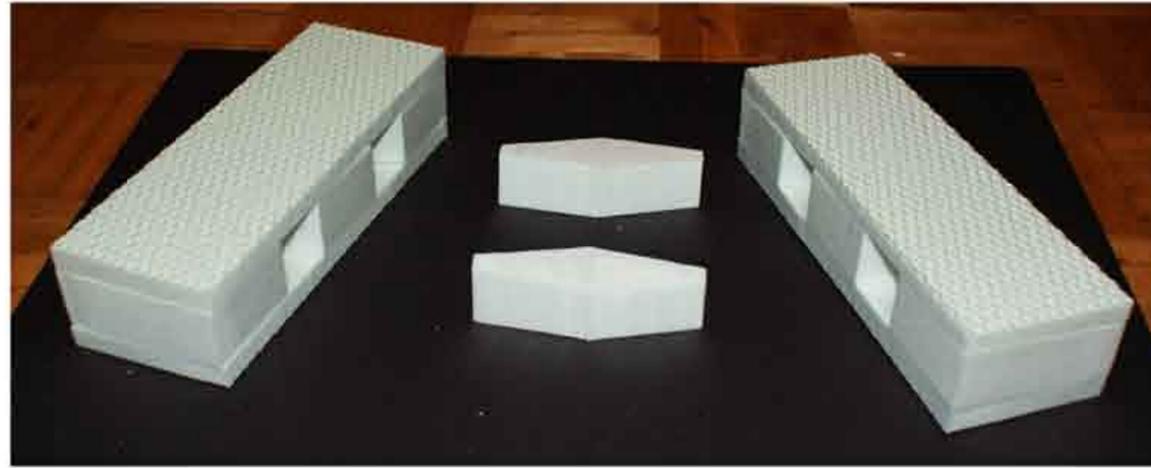
Nachteil:

- schwierige Montage, weil eine Vorpositionierung nicht vorhanden ist
- nicht lösbare Verbindung
- bei gewölbten Bauteilen kommt es zu einer Querschnittserhöhung

Erkenntnis und Entscheidung:

Durch die Betrachtung der unterschiedlichsten vorhandenen Verbindungsmöglichkeiten wurde schnell klar, dass keine für unseren Zweck - nämlich eine Betonelementverbindung, die nicht sichtbar, exakt montierbar, demontierbar, äußerst belastbar und effizient ist - geeignet ist. Aus diesem Grund entschlossen wir uns ein eigenes Detail für die benötigten Anforderungen zu entwickeln, wobei gewisse Ideen von anderen Verbindungen aufgenommen und miteinander kombiniert, sowie teilweise durch neue Ideen ersetzt wurden.

7. Entwicklung System I - Erläuterung und Verbindungsversuche



Um sich der Entwicklung eines Verbindungssystems mit den zuvor beschriebenen Anforderungen zu nähern, entschlossen wir uns, zunächst eine Verbindung für zwei gerade Bauteile zu entwickeln und zu testen.

Um einen realen Bezug für die Entwicklung zu bekommen, bauten wir einige Testkörper anhand derer wir verschiedene Funktionsweisen, wie z.B. das Zusammenstecken zweier Bauteile mittels einer Kupplung, das Verbinden durch Reibung etc., ausprobieren konnten.

Die daraus gewonnenen Erfahrungen ließen eine dreidimensionale Betrachtungsweise bei der zunächst zweidimensionalen Detailfindung zu, wodurch der Entwicklungsprozess deutlich vereinfacht und beschleunigt wurde.

Die Idee, die Betonteile ineinander zu stecken, wurde letztendlich wieder verworfen, da solch eine Verbindung einerseits eine sehr aufwendige Schalung erfordert und sich andererseits eine Demontage sehr schwierig gestalten würde. Wir entschieden uns daher für eine andere Lösung, die auf der folgenden Seite planlich dargestellt ist.

Entscheidung Fertigteile:

Möchte man ein Objekt aus Beton verwirklichen, gibt es bezüglich der Herstellung zwei Möglichkeiten:

1. Ortbeton
2. Fertigteile

Die im Kapitel „Recherche“ vorgestellten Referenzprojekte von amorphen Betonobjekten arbeiten vorwiegend mit Ortbeton, vor allem bei größeren Projekten war dies immer der Fall. Kleinere Designobjekte können in einem Stück gegossen werden. Doch Fertigteile, wie man sie aus diversen anderen Bauprojekten kennt, kamen bisher nirgendwo zur Anwendung. Der Vorteil eines Fertigteils liegt vor allem im wirtschaftlichen Bereich, da aufgrund von Vorfertigung im Werk kostenintensive Arbeiten auf der Baustelle entfallen. Unser concrete leaf soll aus diesem Grund aus Fertigteilen bestehen. Kombiniert man diese nun noch mit einem demontierbaren System, fällt die Ortsbindung, welche bei einem Objekt ab einer gewissen Größe immer besteht, zudem weg.

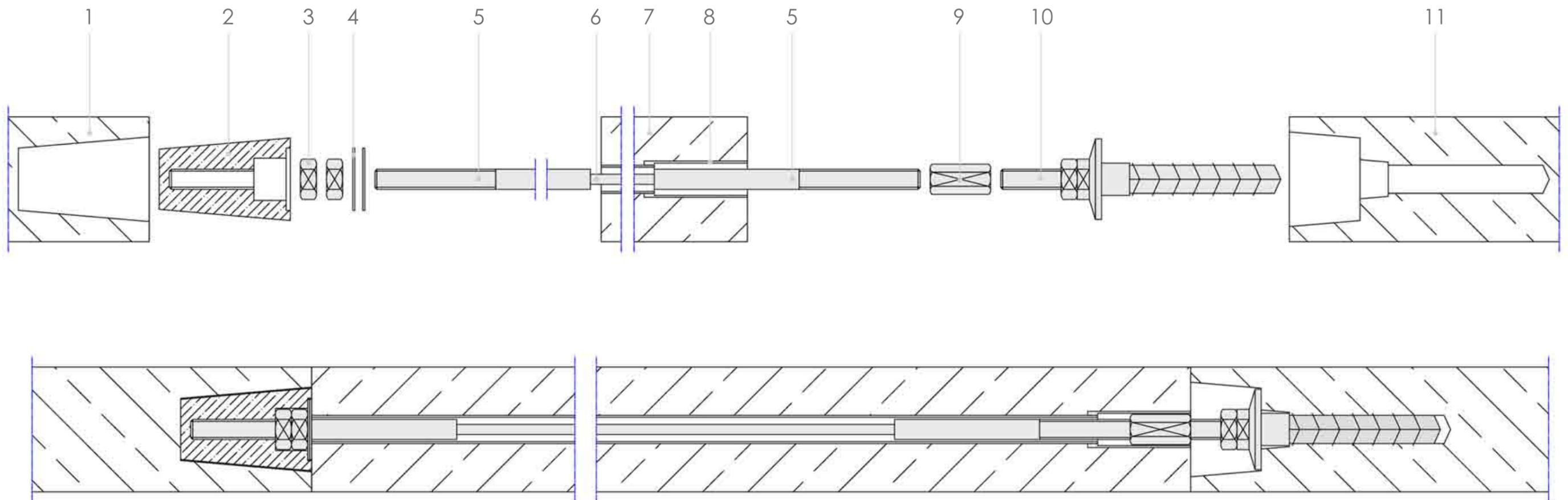
Die Projektentwicklung ist also auf einen flexiblen Weg hin ausgelegt. Der Gedanke richtet sich hier aber nicht nur auf unser concrete leaf, denn jenes könnte auch als Ganzes, wenn auch aufwendig, transportiert werden.

Die Idee dieser Arbeit geht also in die Richtung von transportablen und demontierbaren, amorphen Betonobjekten im großen aber auch im kleinen Maßstab. Das concrete leaf dient also als Basis solch einen Gedankengang anschaulich darzustellen.

7. Entwicklung System I - Gesamtdarstellung

Legende:

- | | | |
|---|---|---|
| 1 zu verbindende Betonplatte 70 x 40 x 6,2 cm inkl. mitgeschaltetem konisch zulaufenden Hohlraum mit \varnothing 3,1 bis \varnothing 4,2 cm | 5 M10 Gewindeterminale auf Seil mit \varnothing 5 mm aufgepreßt | 9 M10 Langmutter mit Durchgangsgewinde L= 3 cm |
| 2 Positionierbolzen, passgenauer Drehteil mit M10 Innengewinde und Ausnehmungen für Muttern und Beilagscheiben | 6 Nirosa - Seil \varnothing 5 mm | 10 Stahlbetondübel mit außen liegender M10 Gewindestange |
| 3 M10 Mutter | 7 Zu verbindende mittlere Betonplatte 70 x 40 x 6,2 cm inkl. mitgeschaltetem Seilführungsschlauch mit einem Außen \varnothing 1,4 cm und Innen \varnothing 1,2 cm | 11 Zu verbindende Endplatte 70 x 10 x 6,2 cm inkl. mitgeschalteter Ausnehmung zur passgenauen Positionierung des Dübels |
| 4 M10 Beilagscheibe, s=1mm | 8 Mitgeschalteter Drehteil aus Nirosa am Ende des Schlauchs mit Innen \varnothing 1,4 cm und \varnothing 1,6 cm und Außen \varnothing 1,8 cm | |

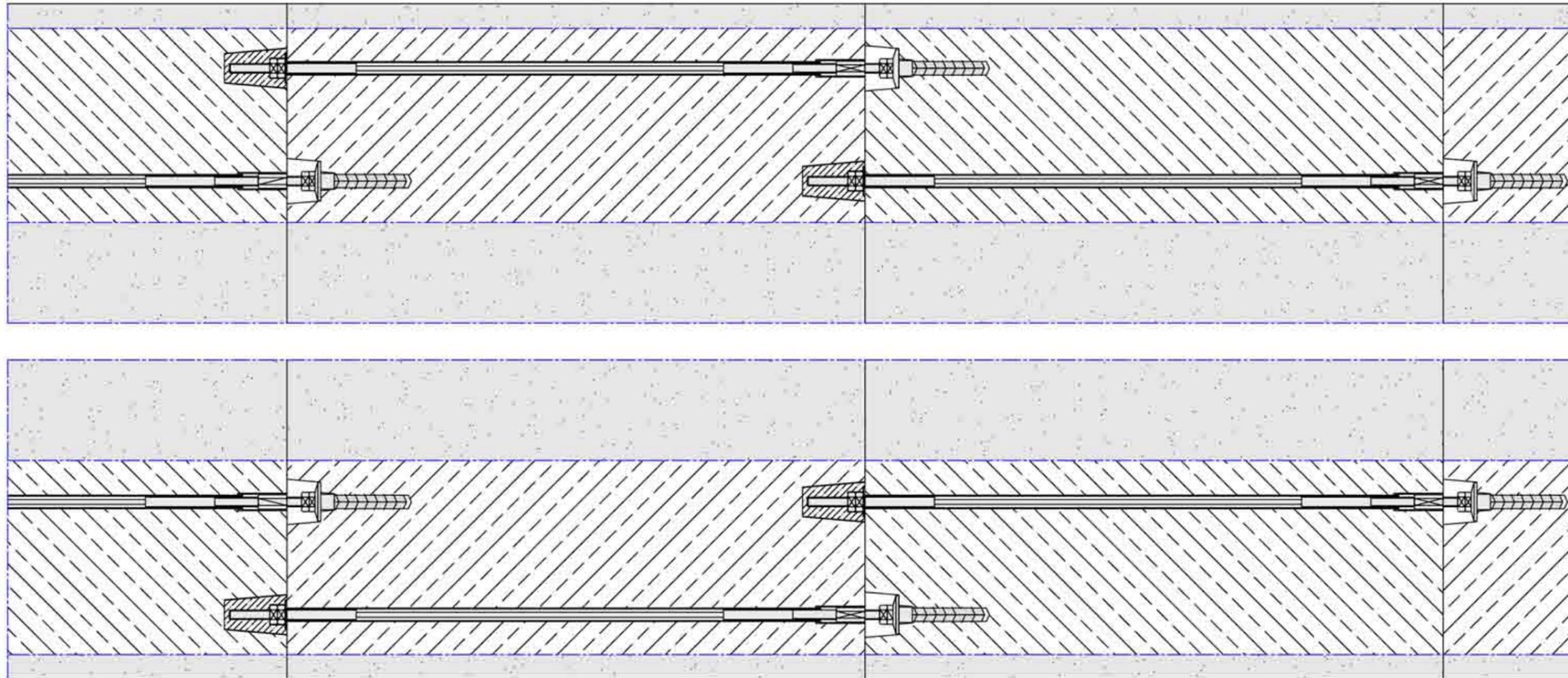


Das hier gezeigte Verbindungssystem für Betonteile gewährleistet eine einfache Montage und Demontage der einzelnen Betonsegmente. Auch der Anforderung, die Elemente nicht sichtbar miteinander zu verbinden, konnte Folge geleistet werden.

M=1:2

8. Test System I - Schalung

Um das zuvor entwickelte System I und dessen Komponenten einzusetzen, bedarf es zunächst einiger Testkörper, um eventuelle Fehlerquellen zu finden und zu eliminieren bzw. ein zweites, verbessertes Verbindungssystem zu entwickeln. Aus Kostengründen und um uns schrittweise den anstehenden Problemen eines gewölbten Betonkörpers zu nähern, entschieden wir uns, zunächst zwei gerade Betonelemente zu fertigen und diese zu verbinden. Auf dieser Seite ist das gewünschte Ergebnis zu sehen. Zur Verdeutlichung des Systems sind bei dieser Darstellung allerdings vier Betonfertigteile (zwei End- u. zwei Zwischenstücke) anstatt zwei Betonfertigteile zu sehen.



M=1:5

Abb. 1: Systemveranschaulichung, zwei End- u. zwei Zwischenelemente

Bevor die Schalungsplanung sowie deren Bau begonnen werden konnte, mußten wir eine Entscheidung in Hinsicht auf das Material treffen. Bezüglich dessen, dass gerade Testelemente gebaut wurden, die Schalung in weiteren Schritten aber amorph ausgebildet sein sollte, entschlossen wir uns für extrudiertes Polystrol. Die Entscheidung begründet sich dadurch, dass es einige Referenzprojekte im großen aber auch im kleinen Rahmen gibt, die mit der Vorgehensweise, dreidimensionale, im Raum frei gekrümmte Schalungskörper aus Hartschaumplatten zu fräsen und anschließend mit Beton zu füllen, erfolgreich waren. Dieses Prinzip wirft aber einige Fragestellungen gemäß der Beschichtung auf. Es gibt bereits einige Firmen, welche mit der Thematik, gefräste 3D Objekte aus extrudiertem Polystrol zu beschichten, sehr vertraut sind. An dieser Stelle möchten wir „Idee & Design“ unter Leitung von Hr. Fuchs danken, welche uns bezüglich dieser Fragen mit wichtigen Tipps beraten haben, die in unsere Experimente miteinfließen konnten. In dieser Phase des Projektes war es aber noch nicht ratsam eine professionelle Firma für den Bau unserer Testkörper hinzuzuziehen, weshalb wir in Eigenregie einige Beschichtungen getestet haben. Diese sogenannten Lackexperimente werden auf den nachfolgenden Seiten beschrieben.

8. Test System I - Schalung - Lackexperimente

Probekörper 1
Material: Hydrosputtel



Das Material wurde auf der Oberfläche des Probekörpers mit einer Spachtel in drei Schichten aufgetragen, wobei zwischen den Auftragsvorgängen eine Wartezeit von ca. zwölf Stunden nötig war. Zusätzlich wurde jede aufgetragene Schicht nach dem Trocknungsvorgang mit einem feinkörnigem Schleifpapier nachbearbeitet, um eine sehr glatte Oberfläche zu gewährleisten.

Vorteile:

- geruchloses Material
- sehr glatte Oberfläche entsteht
- gute Haftung am Untergrund
- kostengünstig
- greift die Poren des Styrodurs nicht an

Nachteile:

- aufwendiger Arbeitsprozess
- feine Rissbildung in den einzelnen Schichten
- schwierig anwendbar bei amorphen Schalungen

Probekörper 2
Material: Kaltglasurharz u. -härter



Vor dem Auftragen wurden die beiden Komponenten im vorgegebenen Verhältnis in einem Behälter vermischt. Danach wurde die nun entstandene Glasur mit einem Pinsel gleichmäßig auf den Probekörper aufgetragen. Insgesamt waren drei Schichten Glasur nötig um eine nahezu plane Oberfläche zu bekommen. Die Wartezeit zwischen dem Auftragen der Schichten betrug zwölf Stunden. Damit eine möglichst gleichmäßige Oberfläche gewährleistet werden konnte, wurde nach dem Auftragen jede Schicht mit einem Fön geglättet und vorgetrocknet, um ein Verrinnen des Materials, welches eine sehr flüssige Konsistenz aufweist, zu vermindern.

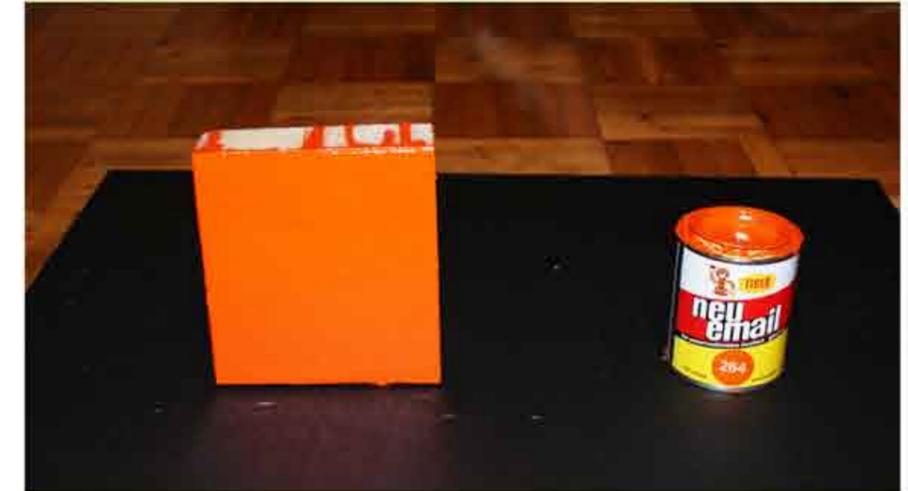
Vorteile:

- gute Haftung am Untergrund
- greift die Poren des Styrodurs nicht an

Nachteile:

- Lufteinschlüsse sowie Bläschenbildung lassen sich nicht verhindern
- eine gleichmäßige Verteilung des Materials ist aufgrund der Dünnpflüssigkeit sehr schwierig
- teuer
- intensiver Geruch
- schnelles Verkleben des Pinsels

Probekörper 3
Material: Acryllack wasserverdünnbar



Das Material wurde auf der Oberfläche des Probekörpers mittels eines Pinsels gleichmäßig aufgetragen und verteilt. Insgesamt wurden im Abstand von zwölf Stunden drei Schichten aufgetragen.

Vorteile:

- gute Haftung am Untergrund
- sehr glatte Oberfläche entsteht
- geringer Arbeitsaufwand
- kostengünstig
- greift die Poren des Styrodurs nicht an

Nachteile:

- durch die Dünnpflüssigkeit des Lacks kann ein Verrinnen nicht ganz verhindert werden

Der Acryllack könnte auch aufgesprüht werden, dadurch würde der Arbeitsaufwand vermindert und die Verteilung sowie auch die Qualität des aufgetragenen Lackes verbessert werden.

8. Test System I - Schalung - Lackexperimente

Probekörper 4 Material: Acryl wasserverdünnbar

In Hinblick auf die Versuche der verschiedenen Beschichtungsmöglichkeiten der Styrodurschalung hat sich der wasserverdünnbare Acryllack am besten bewährt. Daher wurde nun ein rechteckiger, 5 cm dicker Probekörper aus Gips ausgeschalt, um zu testen, ob die Beschichtung dem Schalungsvorgang stand hält.



Bestandteile: zugeschnittene Styrodurteile, Silikon, Acryllack wasserverdünnbar, Modellgips, Glasfasergewebeband, Plastikschlauch

Bau der Schalung:

Insgesamt kamen fünf Schalungsteile zum Einsatz, die miteinander durch Silikon verbunden wurden. Auf eine Abdeckplatte wurde hierbei verzichtet, da dieser Versuch vor allem dazu diente, die Beschichtung auszutesten. Um den Plastikschlauch durch die Schalung führen zu können, musste in zwei gegenüberliegende Schalungsteile ein Loch gebohrt werden. Anschließend wurde der Acryllack mit einem Pinsel auf die Styrodurteile aufgetragen. Nach der nötigen Trocknungszeit der Beschichtung konnte mit dem Befüllen der Schalung begonnen werden.

Befüllung der Schalung:

Der Gips wurde in einem Behältnis mit Wasser vermengt, um die gewünschte Konsistenz zu erhalten. Daraufhin konnte der Boden der Schalung circa 1 cm dick mit dem zähflüssigen Gips bedeckt und mit einer Spachtel verteilt werden. Auf diese erste Schicht wurde nun das Glasfasergewebeband aufgelegt und anschließend der Rest der Schalung mit dem Gips bis zum Rand hin befüllt und wiederum mit der Spachtel geglättet.

Ergebnis und Erkenntnis:

Nach ca. 15 Stunden konnte der ausgeschaltete Teil der Schalung entnommen und der Plastikschlauch entfernt werden. Die Beschichtung hat dem Befüllungsvorgang optimal stand gehalten und keine Reste auf dem ausgeschalteten Probekörper hinterlassen. Bezug nehmend den Lackiervorgang muss bei weiteren Versuchen darauf geachtet werden, dass die Schalung erst nach dem Beschichten zusammengebaut wird und nicht davor. Der Nachteil dieser Beschichtung ist, dass der Lack keine effektive „Auffüllwirkung“ erzielt und somit nicht zum Ausgleichen von Unebenheiten dienen kann.

8. Test System I - Schalung - Lackexperimente

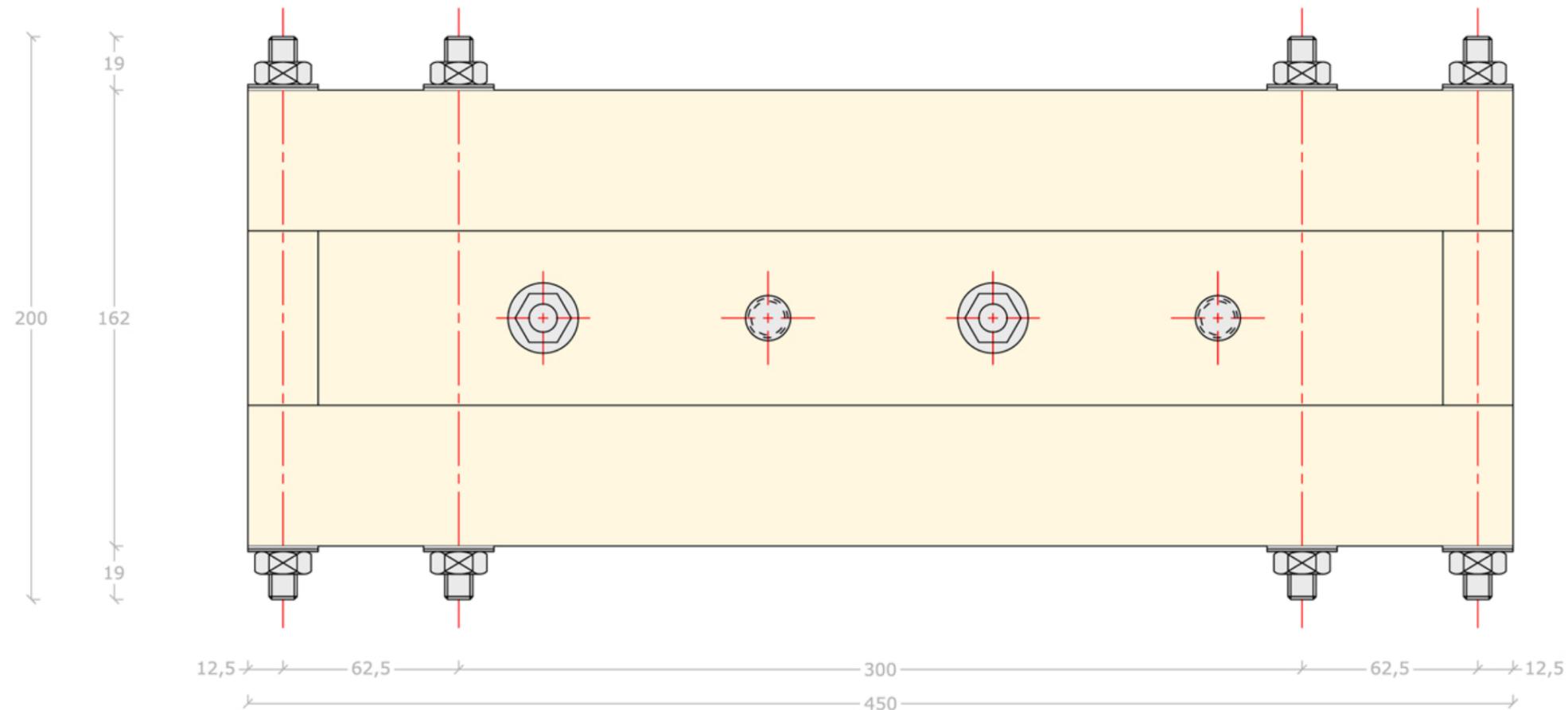
Erkenntnis aus allen Versuchen:

Da es bei dem Schalprozess des UHFB zu einem entsprechend hohen Betondruck kommt, muss die Oberfläche der Styrodurschalung eine gewisse Härte aufweisen. Durch die Versuche mit der Spachtelmasse wissen wir, dass hierbei ein hoher Härtegrad entstehen kann, die Oberfläche jedoch feine Haarrisse aufweist. Es ist anzunehmen, dass dies auf die Trocknung und den damit verbundenen verschiedenen Oberflächenspannungen zurückzuführen ist. Eine Erhöhung der Stärke der Spachtelung und das Auftragen mehrerer Schichten könnte die Risttiefe verringern und die Härte der Oberfläche würde eine Deformation der weichen Schalung erfolgreich verhindern.

Um den Beton entsprechend ausschalen zu können, wird weiters eine sehr glatte Oberfläche benötigt, die eine sehr geringe Haftwirkung aufweist. Hierzu empfehlen wir, die Oberfläche zusätzlich mit einem wasserverdünnbarem Acryllack zu beschichten, da dieser, im Falle einer Durchdringung der Spachtelung, das Styrodur nicht angreift. Zudem sollte die Schalung unmittelbar vor dem Schalvorgang mit einem Silikonspray bzw. einem Schalungsöl eingelassen werden, damit die Haftung zusätzlich reduziert wird.

8. Test System I - Schalung - Seitenansicht

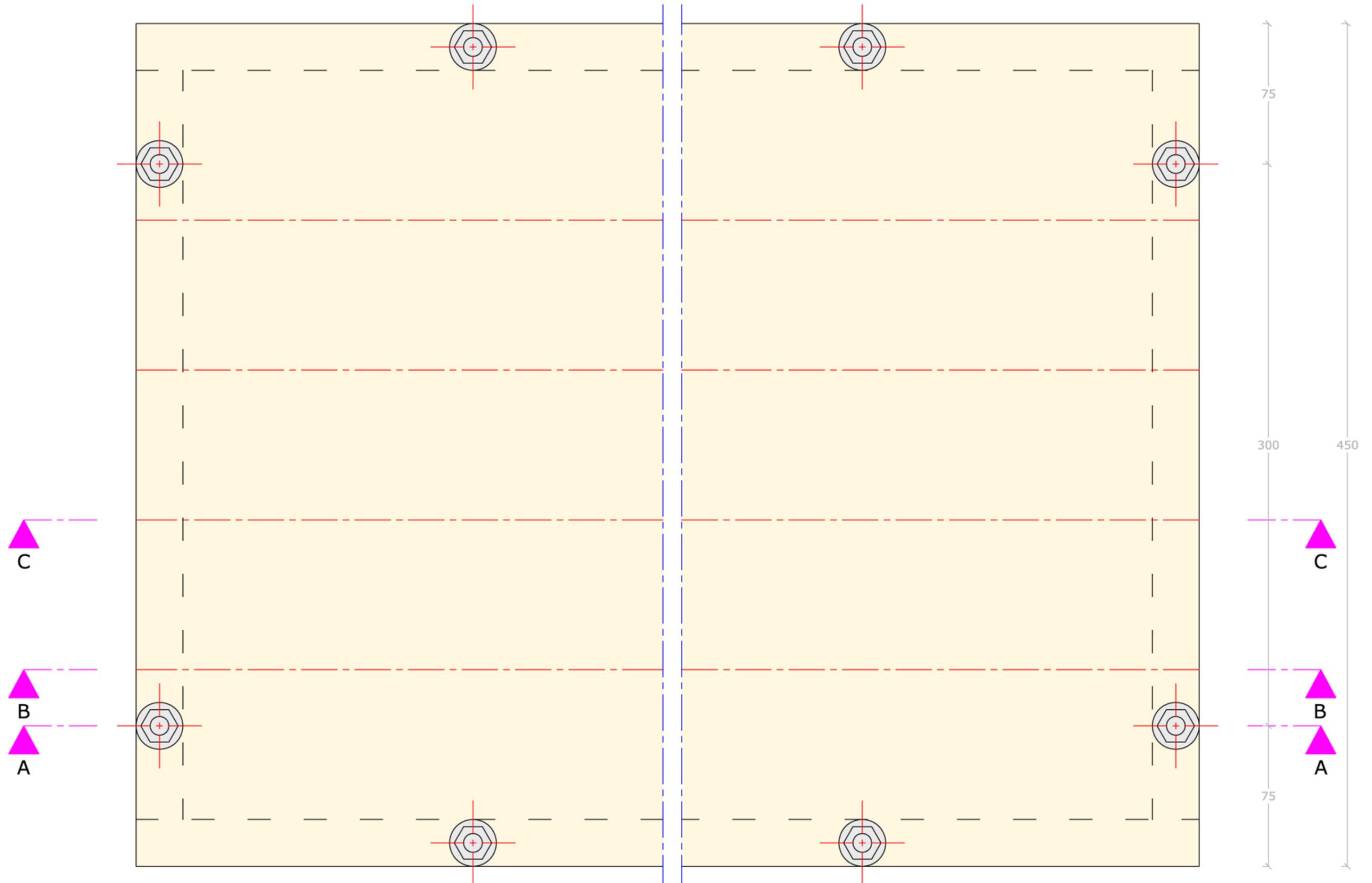
Nachdem die Lackexperimente erfolgreich beendet wurden, konnten wir mit der Planung der Schalung aus Hartschaumplatten für zwei gerade Testkörper beginnen. Die folgenden Seiten zeigen die hierfür nötigen Ansichten und Schnitte.



M=1:2

 XPS Ansicht  Verbindungsschrauben

8. Test System I - Schalung - Draufsicht



M=1:2

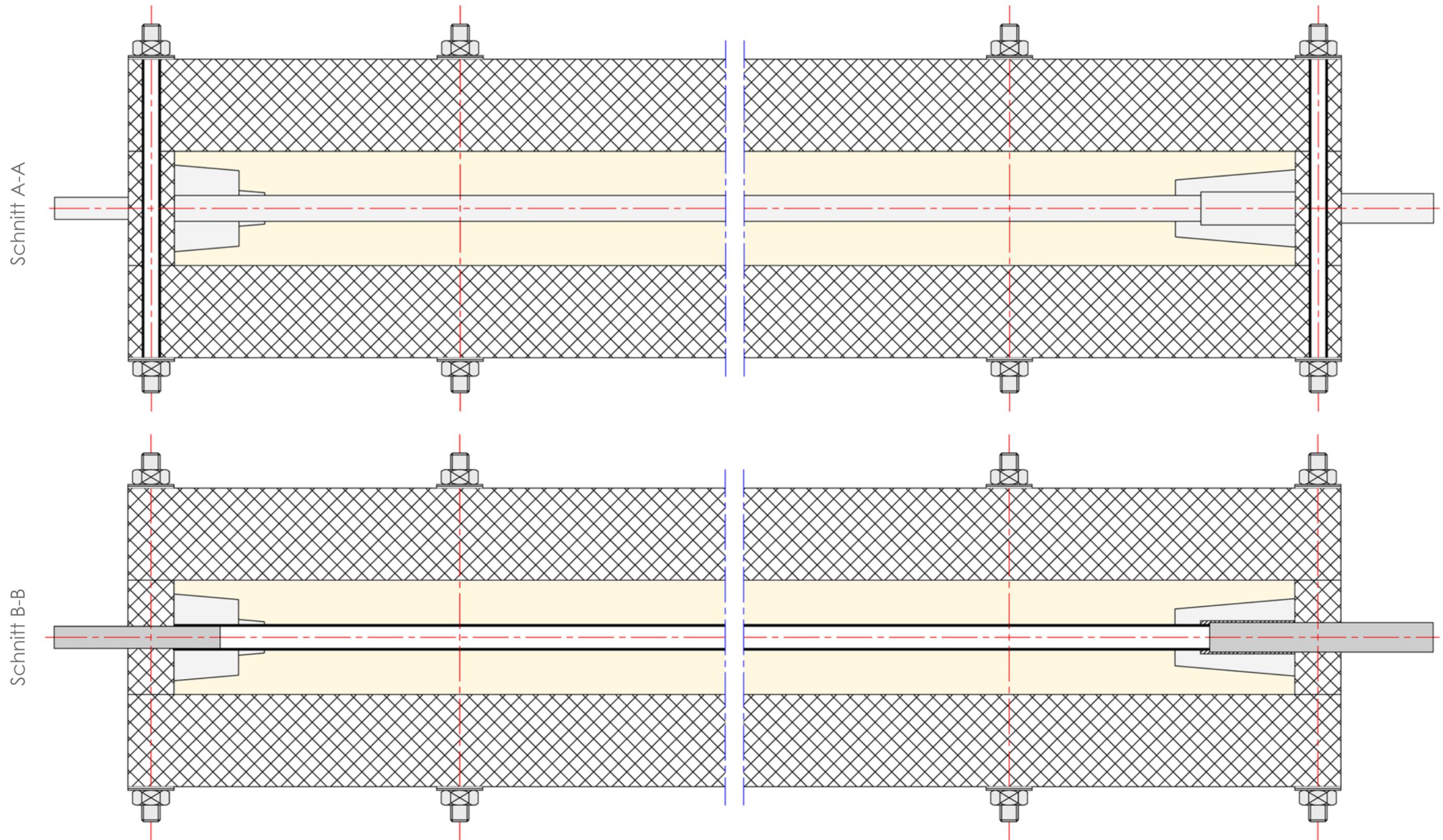


XPS Ansicht



Verbindungsschrauben

8. Test System I - Schalung - Vertikalschnitte



M=1:2



XPS geschnitten



XPS Ansicht

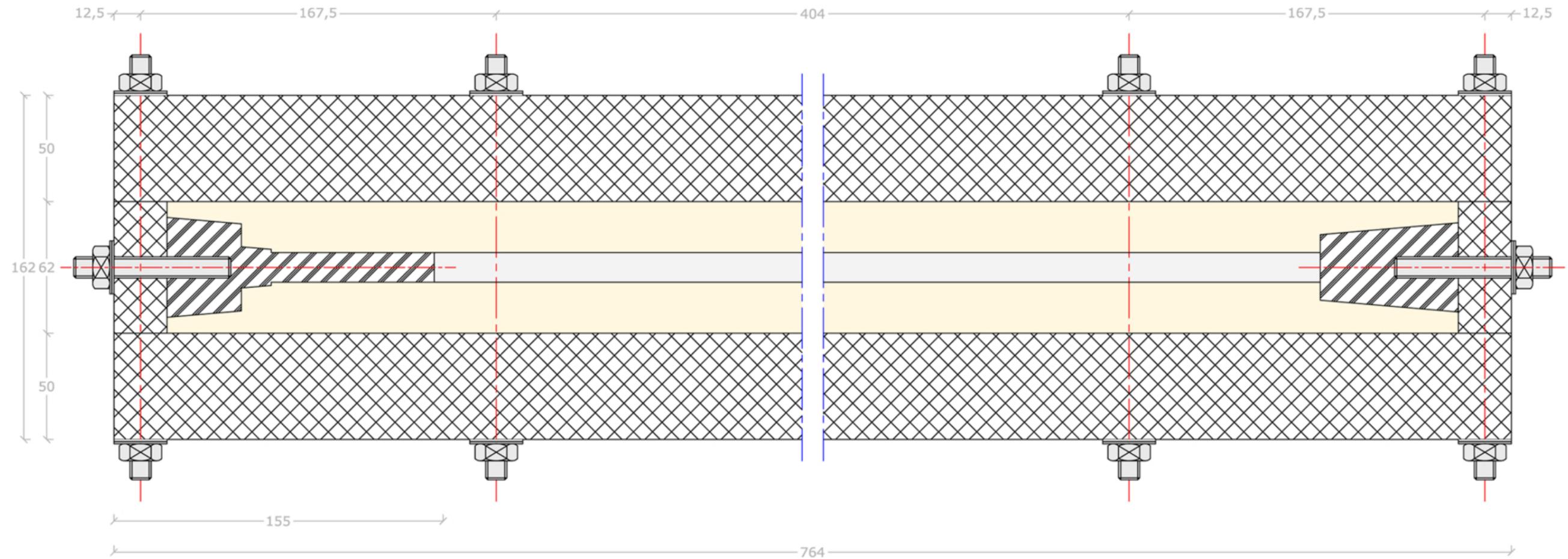


PVC Ansicht



Stützbolzen Ansicht

8. Test System I - Schalung - Vertikalschnitt



Schnitt C-C

M=1:2

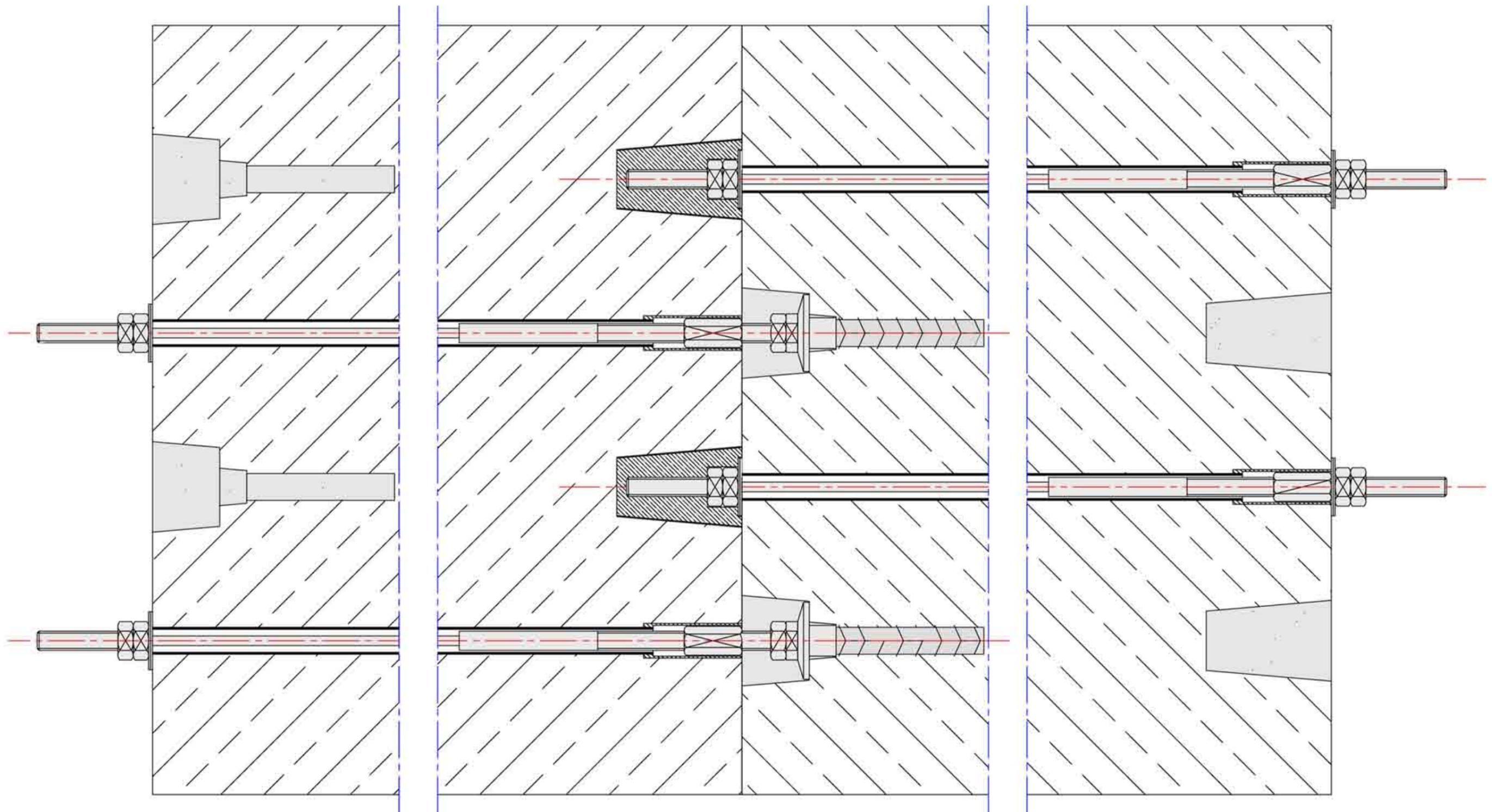
 XPS geschnitten

 XPS Ansicht

 PVC geschnitten

8. Test System I - Schalung - Horizontalschnitt

Eine Schalung ermöglicht aufgrund des symmetrischen Aufbaus die Anfertigung von zwei Testplatten aus UHFB, welche miteinander verbunden werden können.



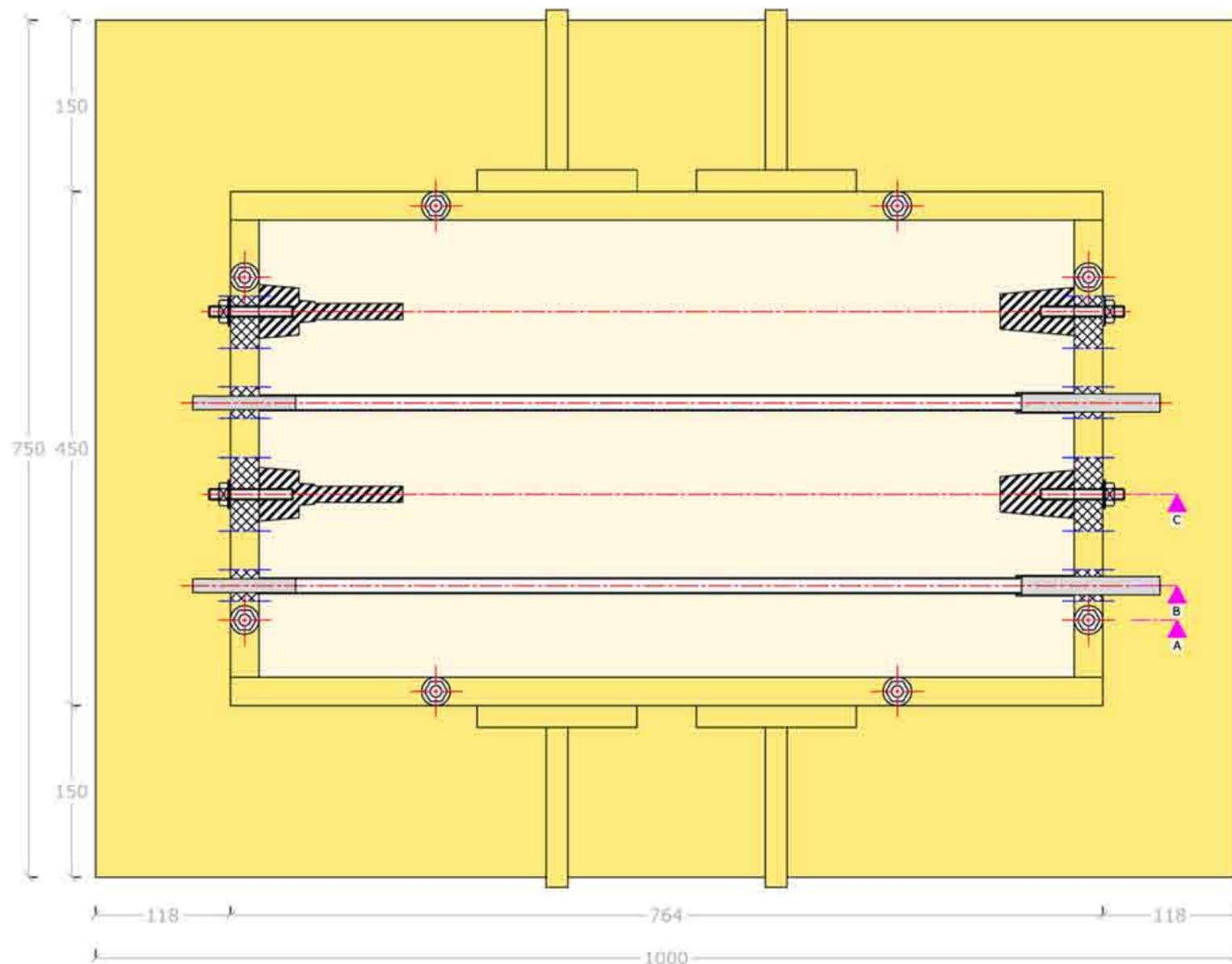
M=1:2

 UHFB geschnitten  UHFB Ansicht  Edelstahl geschnitten

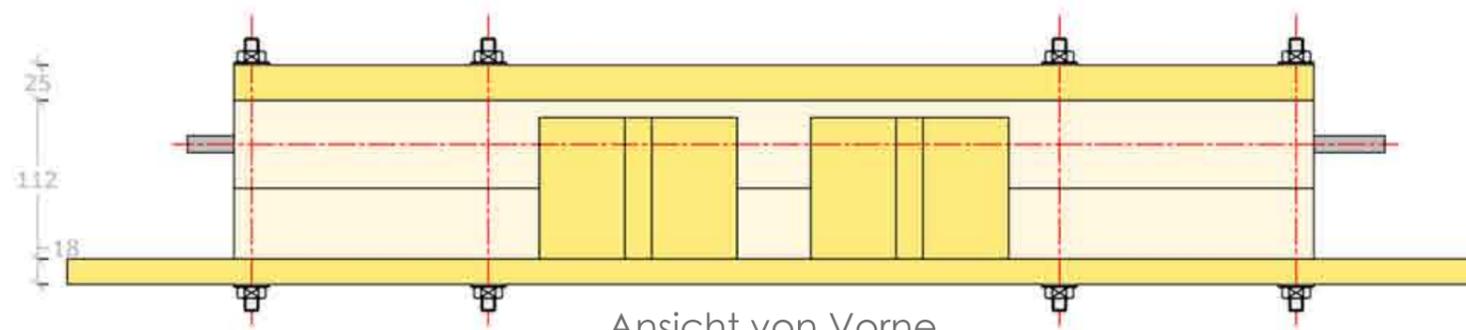
8. Test System I - Schalung - Schalungsoptimierung

Nach der Vorstellung unserer Schalung beim Labor für konstruktiven Ingenieurbau, haben wir einige Änderungen vorgenommen:

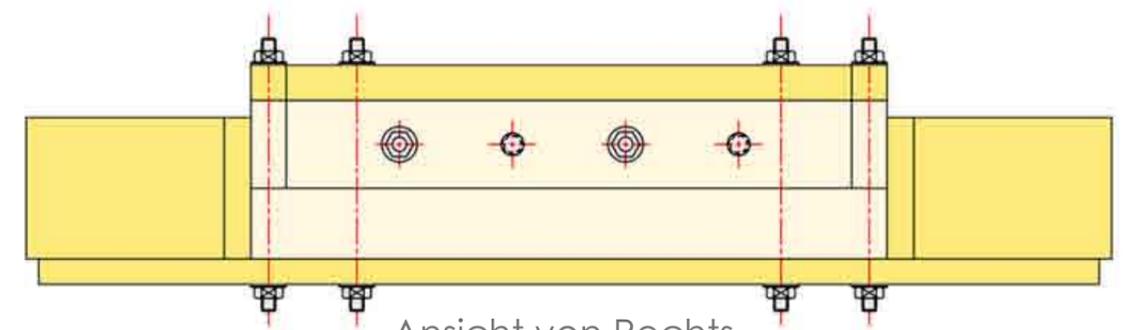
- zusätzliche Aussteifungen gegen den Schalungsdruck
- obere Abschlussplatte entfällt und wird durch einen Holzrahmen ersetzt, um die Preßwirkung zu erhöhen
- durch das Hinzuziehen einer Grundplatte wird die Handhabung mit der Schalung erleichtert und dient zugleich als Montageplatte für die Aussteifungen
- ein Abziehen der Oberfläche wird nötig, da die Schalung offen ist, die Qualität ist aber nur sekundär wichtig, da in dieser Phase die Betonteile auf ihre Funktion hin getestet werden und Erfahrungen aus dem Schalvorgang in einen Beta-Test einfließen sollen.



Ansicht von Oben



Ansicht von Vorne



Ansicht von Rechts

M=1:5



XPS geschnitten



XPS Ansicht



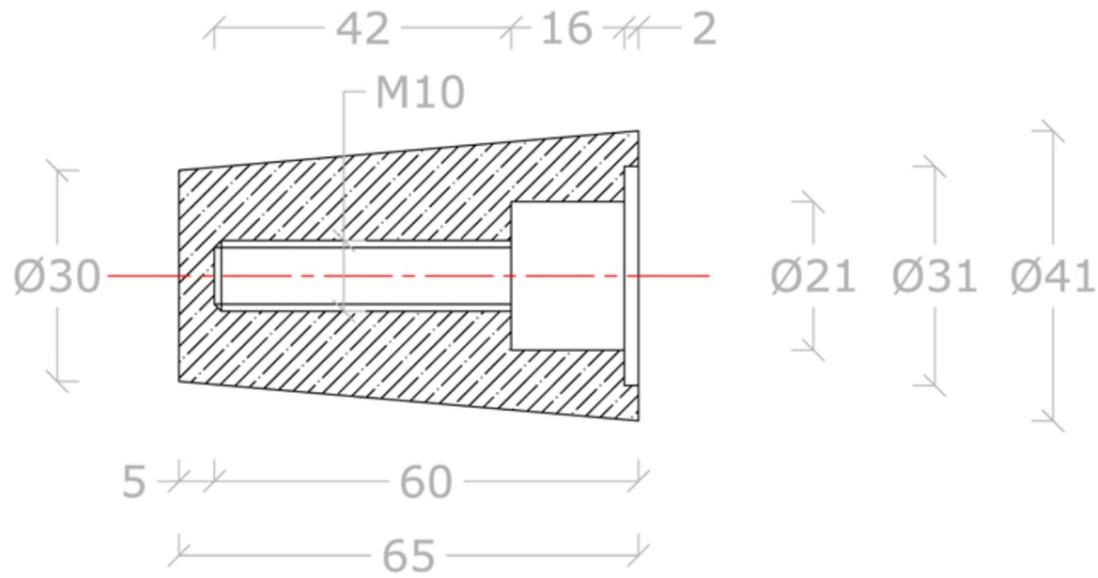
Ansicht Holz



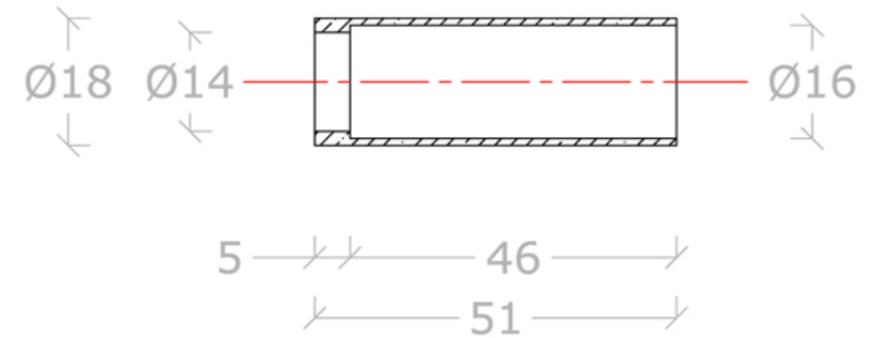
PVC geschnitten

8. Test System I - Schalung - Einbauten

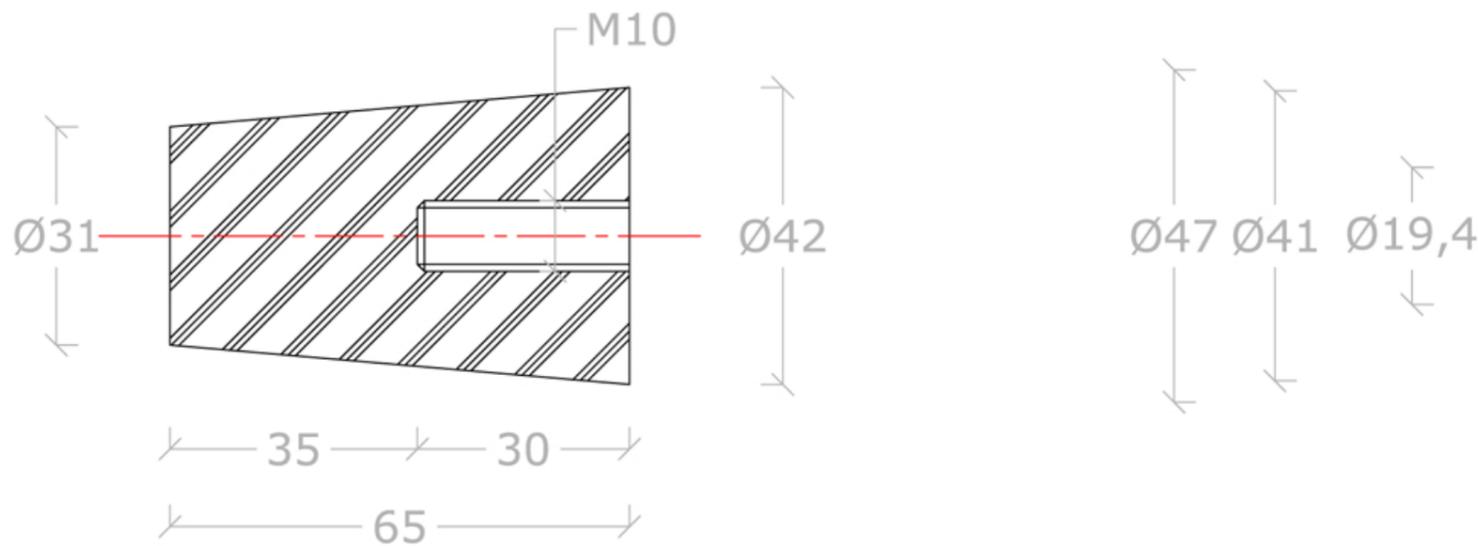
Teil A: 2 Stk. aus Stahl oder Edelstahl fertigen



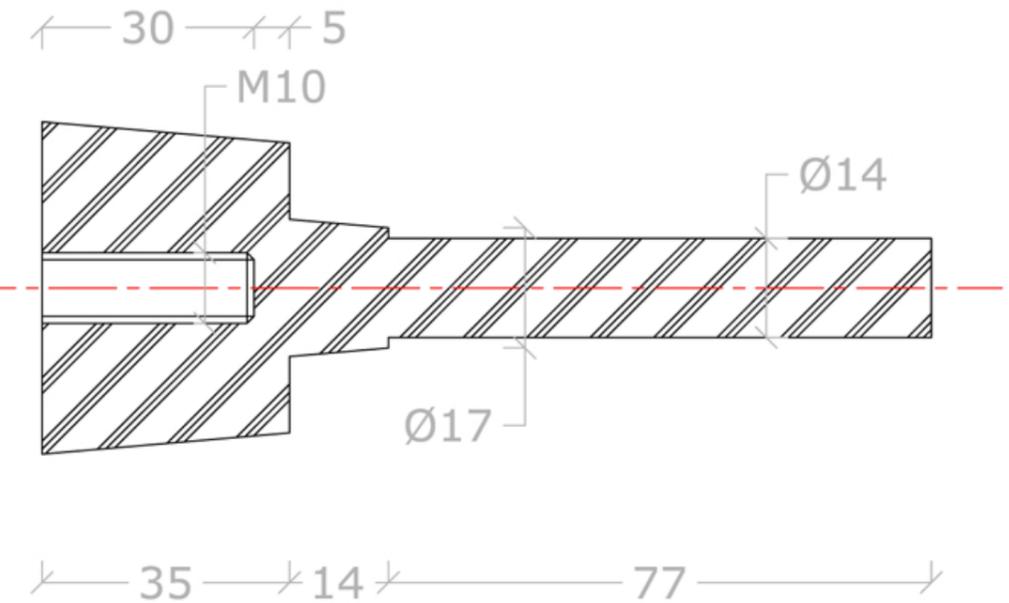
Teil B: 4 Stk. aus Stahl oder Edelstahl fertigen



Teil C: 2 Stk. aus PVC oder Alu fertigen



Teil D: 2 Stk. aus PVC oder Alu fertigen



M=1:1

 PVC geschnitten

 Edelstahl geschnitten

8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung



In diesem Abschnitt wird der Bau der Styrodurschalung sowie auch die einzelnen Teile, die hierfür benötigt werden, dokumentarisch dargelegt.

Schritt 1: Zuschnitt & Vorbereitung

- Zuschnitt der Styrodurplatten, anschleifen der Oberfläche, abkleben für Lackierung

Schritt 2: Oberflächenbehandlung

- 2 x spachteln der gesamten Oberfläche in 12 h Abständen
- 2 x lackieren der gesamten Oberfläche inkl. Zwischenschliff



Schritt 3: Nachbearbeitung

- aufkleben von Dichtungen, um ein Leck in der Schalung zu vermeiden und Unebenheiten auszugleichen
- Bohrungen für Führungsstangen
- Einschub der Gewindestangen
- Zusammenbau der ersten Teile



7. Test System I - Schalung - Styrodurschalung



Schritt 4: Endmontage

- Einbau aller Komponenten, die Montage erfolgt über die Konterwirkung durch die Beilagscheiben bzw. ihrer Verpressung über die Muttern
- Ein zusätzlicher Holzrahmen an der Oberseite dient zur besseren flächigen Verpressung der Komponenten, da die Punktlasten in Flächenlasten umgewandelt werden. Dieser ermöglicht zudem das Weglassen einer oberen Abdeckplatte, was eine genauere Beobachtung des Betonflusses bzw. der Betonverteilung bei dem Schalvorgang zulässt. Durch die hohe Verpressung wird ein Weglassen der horizontalen Dichtungen ermöglicht.
- Die zusätzlichen Aussteifungen an den Rändern sollen ein Ausbrechen der Schalung unter dem Betondruck verhindern, diese „Ausbeulung“ der Schalung ist wegen der geringen Wandstärke zu erwarten.
- Montage aller Komponenten auf eine OSB-Platte für eine bessere Handhabung. Zudem liegt die gesamte Schalung nicht auf den an der Unterseite hervorstehenden Muttern und Gewindestangen, da in jeder Ecke eine weitere kleine Platte die Funktion eines Standfußes einnimmt und der nötige Abstand zum Boden gewährleistet werden kann.

8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung - Bestandteile

1. Schalungsteile Styrodur beschichtet:

1 Stk. 764 mm x 450 mm x 50 mm
2 Stk. 400 mm x 62 mm x 25 mm
2 Stk. 764 mm x 62 mm x 25 mm

2. Dichtungsgummi s = 5 mm

3. Befestigungen der Schalungsteile untereinander:

8 Stk. Gew.stangen M8, l = 200 mm
16 Stk. Muttern M8
16 Stk. Beilagscheiben M8

4. PVC Drehteile und Befestigungen:

4 Stk. Drehteile aus PVC mit Innengewinde M10, jeweils 2 gleicher Bauart
4 Stk. Gew.stangen M10, l = 70 mm
4 Stk. Muttern M10
4 Stk. Beilagscheiben M10

5. Führung Gewindeterminal:

2 Stk. Comisa Verbundrohre ,d = 16 mm, s = 2 mm
2 Stk. Edelstahlhülsen laut Zeichnung

4 Stk. Positionshalter für Comisa Rohr, 2 Stk. Holzstab mit d = 12 mm, l = 50 mm, und 2 Stk. Alu Rohr mit d = 15 mm, l = 50 mm

Bauteile für die Holzunterkonstruktion:

1 Stk. OSB 1 m x 0,75 m, s = 20 mm
4 Stk. T-förmige Holzteile aus Mehrschichtplatten (jeweils 100 x 140 mm, s = 20 mm)
4 Stk. Kanthölzer 25 x 25 mm für die Rahmenfunktion an der Oberseite der Schalung
4 gleich hohe Reststücke zur Montage an der Unterseite der OSB für eine bessere Lagerung und um einen Abstand zum Boden zu erhalten, damit die auf der Unterseite hervorstehenden Muttern und Gewindestangen Platz haben.



8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung - Bestandteile



PVC-Drehteile



Edelstahl-Drehteile



Comisa Verbundrohr

Einbauten:

- 4 PVC Drehteile mit M8 Innengewinde um nachträgliche Bohrungen zu vermeiden, diese Bauteile bleiben beim Ausschalen erhalten und können wiederverwendet werden
- 4 Edelstahldrehteile mit verschiedenen Durchmessern zur Aufnahme unterschiedlicher Lasten und zur Verbindung bzw. Querschnittsvergrößerung der Seilführung. Die Hülsen sind im Beton verloren. Die Aufnahmebolzen kommen erst bei der Endmontage zum Einsatz.
- 2 Stk. Comisa Rohre dienen der Seilführung. Die Verbundwirkung d. Werkstoffe der Bauteile lässt ein Verbiegen bzw. Anpassen an verschiedene Radien möglich werden. Material: versch. Kunststoffe u. Aluminium. Dieses Bauteil ist im Beton verloren.

8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung - Schalvorgang & Ausschalen



Die folgenden Seiten beschreiben den Befüllungsvorgang der Schalung. Hier kam uns das Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU-Graz zuhelfe. Besonderen Dank gilt hierbei Hr. DI Dr.techn. Bernhard Freytag und Hr. DI Josef Linder, die uns den Betoniervorgang ermöglicht haben, sowie Hr. Ass.Prof.DI Dr.nat.techn. Andreas Trummer, der diesen Kontakt hergestellt hat.

Alle nachfolgenden Arbeitsschritte wurden in einer Laborwerkstätte des LKI durchgeführt. Die Schalung wurde mit ultrahochfestem Beton, welcher als Bewehrung Stahlfasern enthält, ausgefüllt, wofür ein für diesen Vorgang spezialisierter Betonmischer zum Einsatz kam.

Schritt 1: Vorbereitungsarbeiten

- Schalung mit Silikonspray einsprühen, um die Gleitfähigkeit zu verbessern bzw. eine spätere Haftwirkung zwischen der Schalung und dem Betonstück zu reduzieren
- Da eine gewisse Menge an UHFB gemischt werden muss, wurden gleichzeitig auch andere Testkörper geschalt. Zu den Vorbereitungsarbeiten gehörte ein exaktes Abwiegen der Stahlfasern sowie die genaue Abmischung des Fließmittels und anderer Komponenten.

8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung - Schalvorgang & Ausschalen



Schritt 2: Mischvorgang

- Um ein optimales Ergebnis zu erzielen, ist die genaue Einhaltung des Betonrezepts, sowie die zugehörige, genau festgelegte Mischdauer sehr wichtig. Der gesamte Mischvorgang erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. 30 min. .
- Im re. Bild sieht man das Befüllen eines Übergangsbehälters, der in weiterer Folge mit einem Kran zu den Schalungskörpern gebracht wird.

8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung - Schalvorgang & Ausschalen



Schritt 3: Befüllen der Schalung

- Der Übergangsbhälter wird über der Schalung in Stellung gebracht. Durch die Ausgangsöffnung des Behälters fließt das Betongemisch in die Schalung.
- Bei diesem Experiment war ungewiss, ob das Gemisch unter die Seilführungsrohre strömt bzw. sich in der Schalung gleichmäßig verteilt, da uns die Konsistenz, die Fließgeschwindigkeit etc. nicht bekannt waren.
- Ein weiterer unsicherer Faktor galt dem Auftrieb der Schläuche bzw. deren Verbiegung oder Verdrehung.
- Interessant ist hierbei die Verteilung der Stahlfasern im Betongemisch und die Beschaffenheit an der Oberfläche, da für einige Minuten nach dem Befüllen Luftblasen aufstiegen, die auf die Verdichtung zurückzuführen sind. Die Oberfläche ebnet sich jedoch von selbst und nur ein geringer, durchaus akzeptabler Grad an Unebenheit ist zu erkennen.

8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung - Schalvorgang & Ausschalen



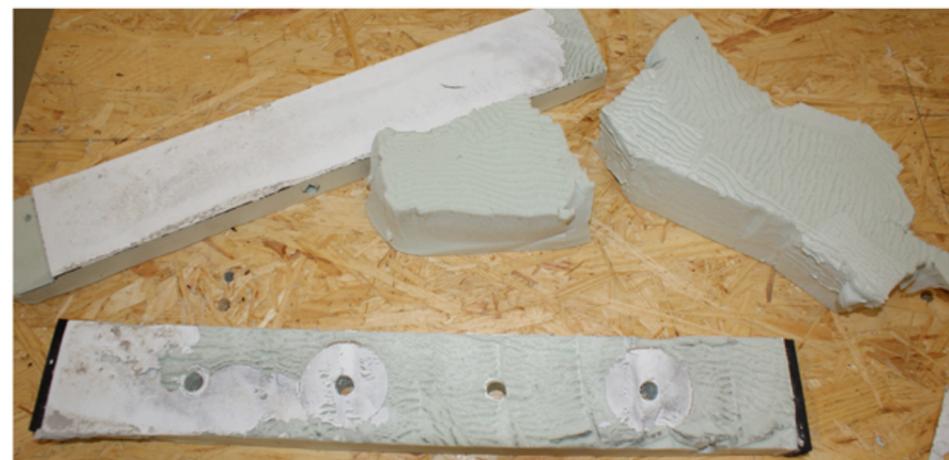
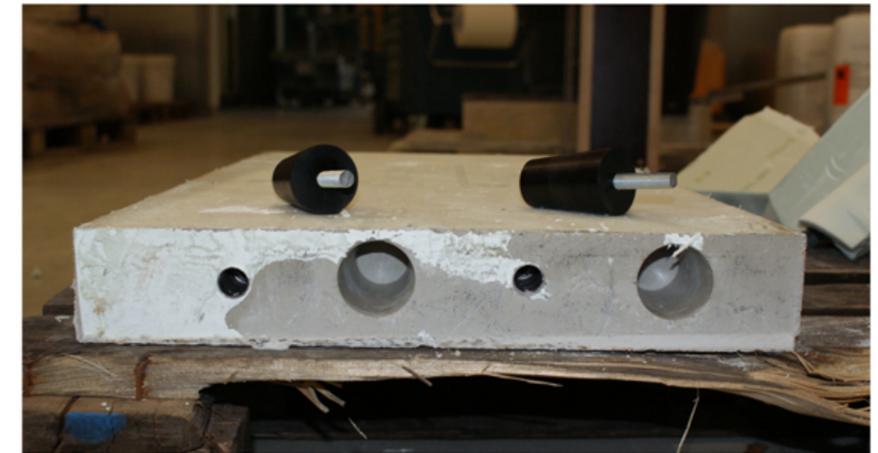
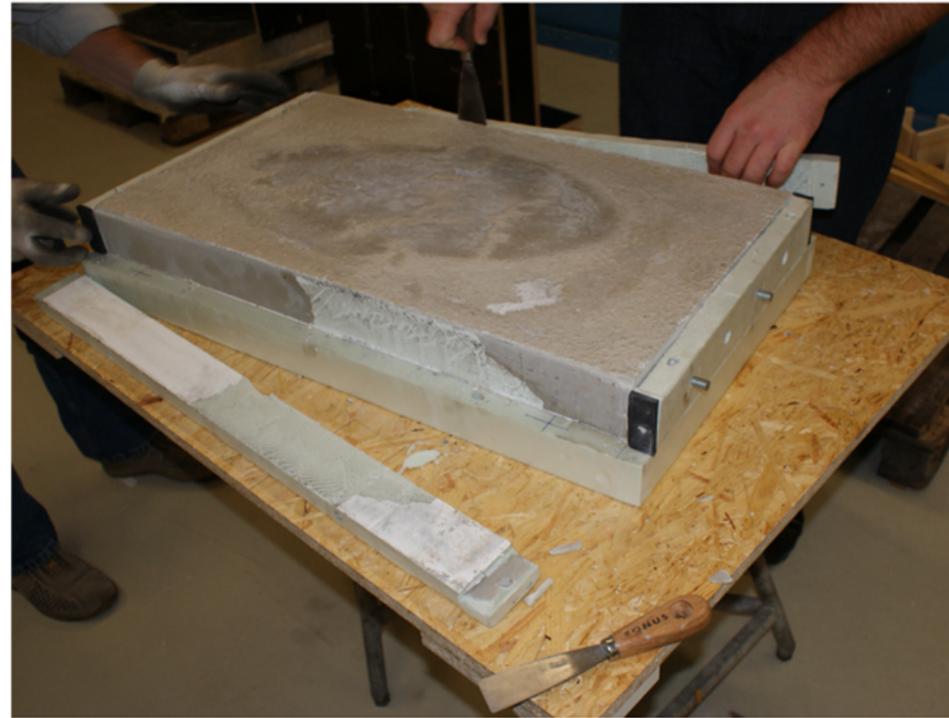
Schritt 4: Kontrolle

- Kontrolle auf die Dichtheit der Schalung und auf eventuelle Ausbeulungen

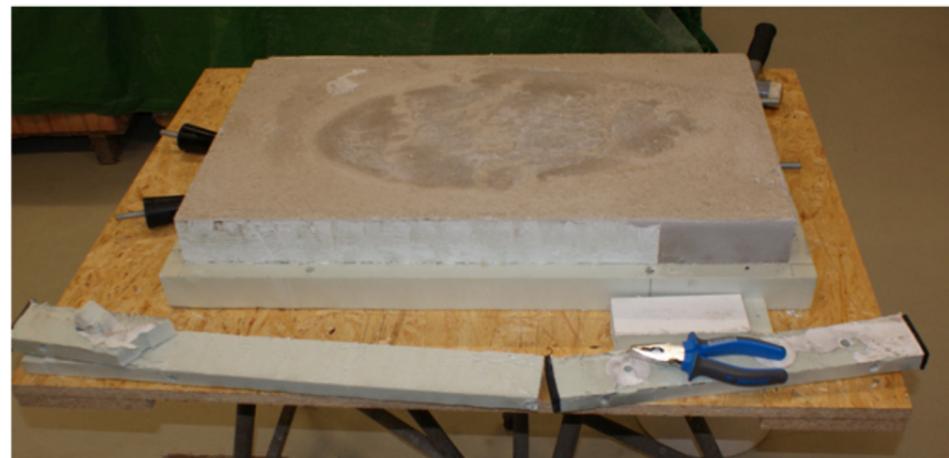
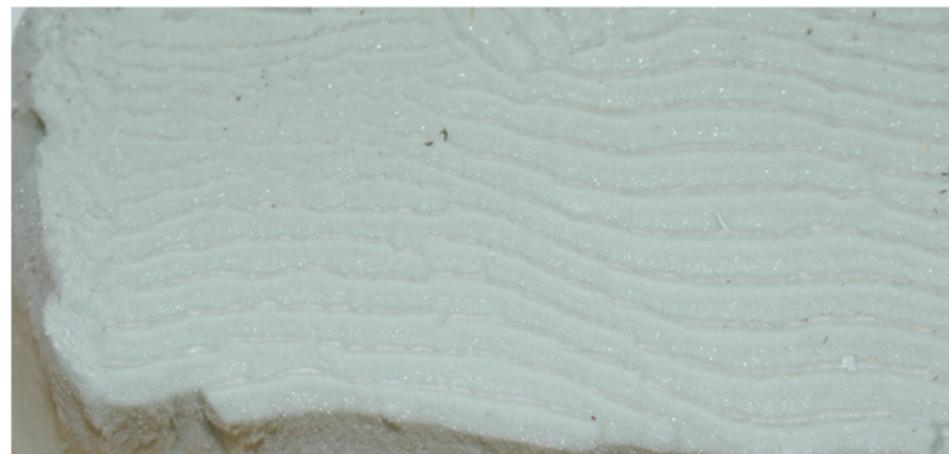
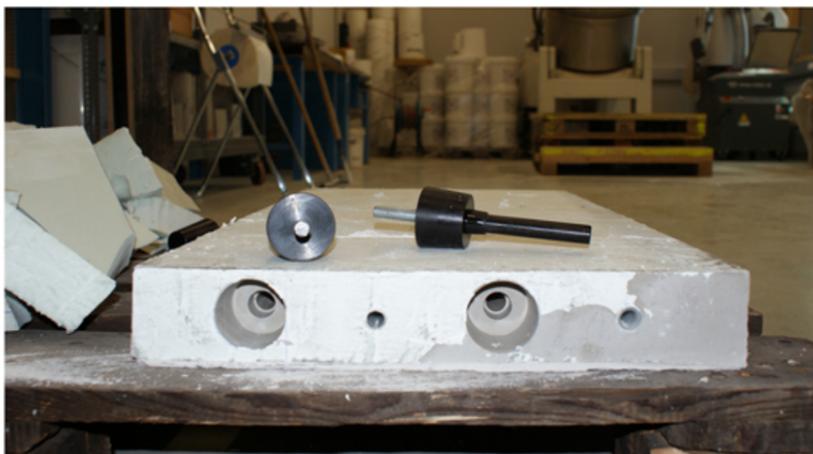
Schritt 5: Erkenntnisse

- Einbau zusätzlicher Elemente würde ein Befüllen nicht verhindern
- Die Flächenpressung des Holzrahmens funktioniert ohne Einschränkungen, wodurch eine Dichtheit der Schalung garantiert werden kann.
- Durch die genaue Einhaltung bei der Betonmischung wurden die Stahlfasern gleichmäßig verteilt, wodurch die Betonkennwerte des Betonproduzenten für Berechnungen herangezogen werden können.
- kein Auftrieb und keine Verschiebung der Einbauteile
- Die Oberflächengüte ist durchaus akzeptabel, kann jedoch durch eine obere Abdeckplatte mit einer Einfüllöffnung verbessert werden.
- Die Handhabung der Schalung wurde durch die Auflageplatte (OSB) deutlich verbessert.

8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung - Schalvorgang & Ausschalen



8. Test System I - Schalung - Styrodurschalung - Schalvorgang & Ausschalen



Nach zwei Tagen konnte der Betonteil ausgeschalt werden, die Fotodokumentation veranschaulicht diesen Prozess.

Erkenntnisse:

- Entgegen unserer Erwartungen ließen sich die Schalungsteile nur zu einem geringen Teil einfach vom Betonelement lösen. Hierbei besteht ein Zusammenhang mit dem Betondruck, da sich die Seitenteile an der Oberseite leichter, jene an der Unterseite aber nur mit Hilfsmitteln und größerem Aufwand lösen ließen.

Mit zunehmendem Füllgewicht ist der Beton mit der Schalung regelrecht eine Verbindung eingegangen. Die Lackierung und das Einsprühen mit Silikonspray hat in diesem Fall also nicht überall ausgereicht. Hierbei ist ein zusätzliches Verwenden von Schalungsöl bzw. die Verwendung anderer Trennmittel zu testen.

- Das Ausschalen der PVC-Drehteile hatte die erhoffte positive Wirkung, nämlich eine glatte und passgenaue Oberfläche. Jene Drehteile, die einen langen, geraden Zylinder aufweisen, konnten, entgegen der vorherigen negativen Erwartungen, ohne Probleme ausgeschalt werden. Daraus ergibt sich, dass die Drehteile nicht unbedingt konisch sein müssen, um ein Ausschalen zu gewährleisten.

- Bei Betrachtung der Seilführung erkennt man keine Probleme beim Übergang von der Hülse auf den Schlauch. Die erwünschte Durchführung der Gewindeterminals kann also problemlos erfolgen.

7. Test System I - Schalung - Holzschalung



Die Styrodurschalung wurde durch den Ausschalungsprozess zerstört und konnte dadurch nicht mehr für den zweiten Prototyp verwendet werden, daraus folgt, dass erneut eine Schalung angefertigt werden musste.

Da wir in diesem Fall nur einen geraden Bauteil benötigten, der wie anfänglich schon erwähnt, dem Test der Verbindung dient, wurde die zweite Schalung aus Holz gefertigt. Dies hatte den Grund, einen möglichst schnellen Schalungsbau zu gewährleisten, da der Bau der Styrodurschalung aufgrund des fehlenden Werkzeugs sehr aufwendig war. Zudem kann ein Vergleich zwischen beiden Materialien gezogen werden.

Schritt 1: Zuschnitt & Vorbereitung

Im Großen und Ganzen wurden hier die Arbeitsschritte der Erzeugung der XPS Schalung wiederholt, mit dem Unterschied, dass es keine Lackierung, dafür allerdings eine obere Abschlussplatte mit einer Befüllungsöffnung mit einem Durchmesser von 10 cm gibt. Die Befestigung der Teile untereinander bzw. die Verspannung erfolgte bei der Holzschalung nicht über einen oberen Holzrahmen, sondern direkt über die obere Abschlussplatte. Weiters entfielen wegen der Steifigkeit der Platte die seitlichen Unterstützungen.

8. Test System I - Schalung - Holzschalung - Bestandteile

1. Schalungsteile Holz-Mehrschichtplatte:

2 Stk. 764 mm x 450 mm x 25 mm
2 Stk. 400 mm x 62 mm x 25 mm
2 Stk. 764 mm x 62 mm x 25 mm

2. Befestigungen der Schalungsteile untereinander:

8 Stk. Gew.stangen M8, l = 200 mm
16 Stk. Muttern M8
16 Stk. Beilagscheiben M8

3. PVC Drehteile und Befestigungen:

4 Stk. Drehteile aus PVC mit Innengewinde M10, jeweils 2 gleicher Bauart
4 Stk. Gew.stangen M10, l = 70 mm
4 Stk. Muttern M10
4 Stk. Beilagscheiben M10

4. Führung Gewindeterminal:

2 Stk. Comisa Verbundrohre ,d = 16 mm, s = 2 mm
2 Stk. Edelhülsen laut Zeichnung

4 Stk. Positionshalter für Comisa Rohr, 2 Stk. Holzstab mit d = 12 mm, l = 50 mm, und 2 Stk. Alu Rohr mit d = 15 mm, l = 50 mm

Bauteile für die Holzunterkonstruktion:

1 Stk. OSB 1 m x 0,75 m, s = 20 mm
4 Stk. T-förmige Holzteile aus Mehrschichtplatten (jeweils 100 x 140 mm, s = 20 mm)
4 Stk. Kanthölzer 25 x 25 mm für die Rahmenfunktion an der Oberseite der Schalung
4 gleich hohe Reststücke zur Montage an der Unterseite der OSB für eine bessere Lagerung und um einen Abstand zum Boden zu erhalten, damit die auf der Unterseite hervorstehenden Muttern und Gewindestangen Platz haben



8. Test System I - Schalung - Holzschalung - Bestandteile



PVC-Drehteile



Edelstahl-Drehteile



Einbauten:

- 4 PVC Drehteile mit M8 Innengewinde um nachträgliche Bohrungen zu vermeiden, diese Bauteile bleiben beim Ausschalen erhalten und können wiederverwendet werden
- 4 Edelstahldrehteile mit verschiedenen Durchmessern zur Aufnahme unterschiedlicher Lasten und zur Verbindung bzw. Querschnittsvergrößerung der Seilführung, die Hülsen sind im Beton verloren, die Aufnahmebolzen kommen erst bei der Endmontage zum Einsatz
- 2 Stk. Comisa Rohre dienen der Seilführung. Die Verbundwirkung d. Werkstoffe der Bauteile lässt ein Verbiegen bzw. Anpassen an verschiedene Radien möglich werden. Material: versch. Kunststoffe u. Aluminium. Diese Bauteile sind im Beton verloren.



Comisa Verbundrohr

8. Test System I - Schalung - Holzschalung - Schalvorgang & Ausschalen



Schritt 1: Vorbereitungsarbeiten

- Beim Ausschalen der XPS Schalung kam es zu Komplikationen, da es zu wenig Gleitwirkung zwischen den Bauteilen gab. Wir haben uns daher bei der unbehandelten Holzoberfläche dazu entschlossen, Schalungsöl zu verwenden. In mehreren Durchgängen aufgetragen, blieb eine glänzende Ölschicht an der Oberfläche der Schalung haften. Hierbei ist zu beachten, dass man wirklich überall eine gleichmäßige Schicht aufbringt, wo der Beton hinfließt. Das gilt für den Innenbereich, aber auch für die Umgebung an der Oberseite des Einfüllstutzens.
- Wie beim ersten Durchgang war auch hier ein exaktes Abwiegen und Bemessen der Zusatzstoffe und Komponenten sowie die Einhaltung zeitlicher Abläufe wichtig, um ein optimales Betongemisch mit einer gleichmäßigen Faserverteilung zu erzeugen.

Schritt 2: Mischvorgang

- Um ein optimales Ergebnis zu erzielen, ist die genaue Einhaltung der Inhaltsstoffe des UHFB und deren Mischdauer sehr wichtig. Der gesamte Mischvorgang erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. 30 min. .
- Zunächst wird ein Übergangsbhälter befüllt, der in weiterer Folge mit einem Kran zu den Schalungskörpern gebracht wird.

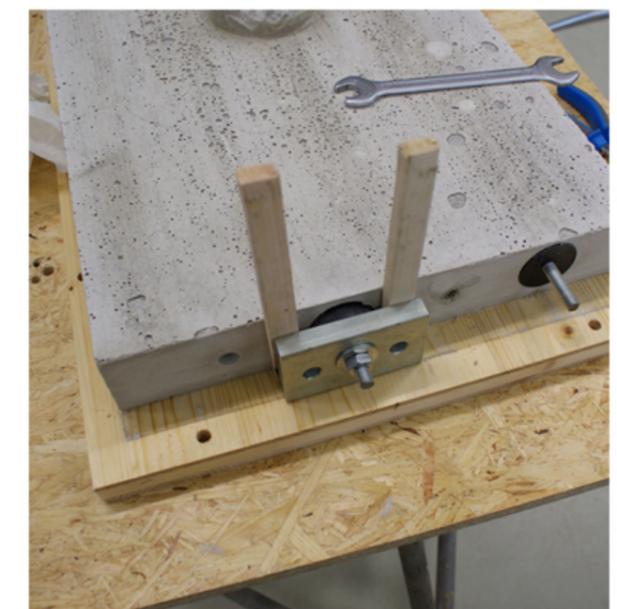
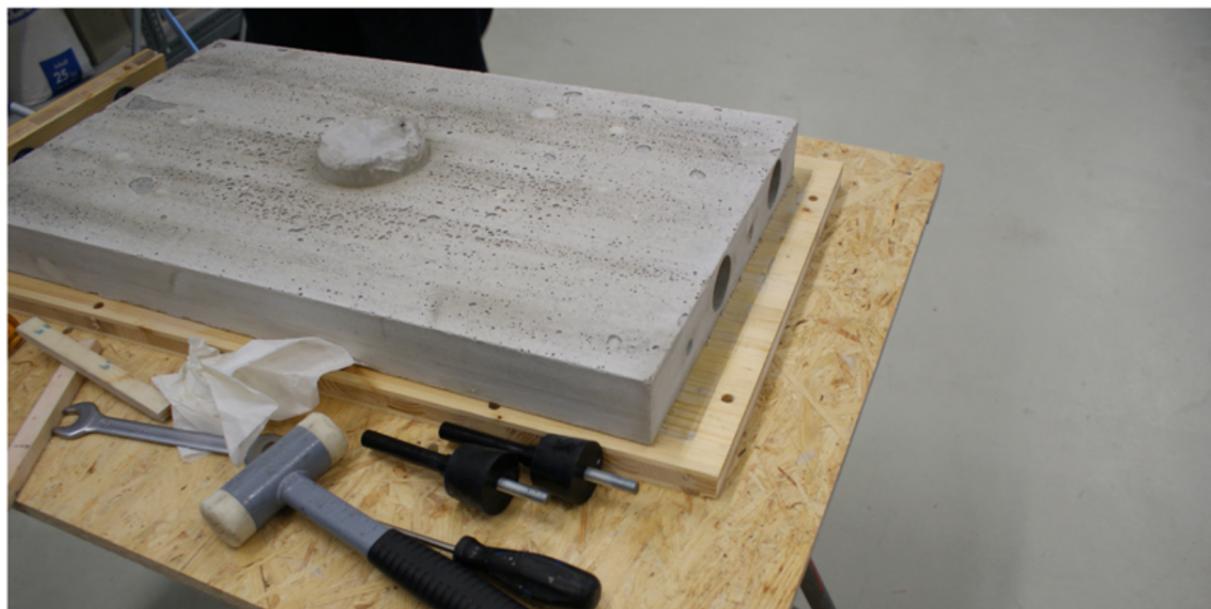
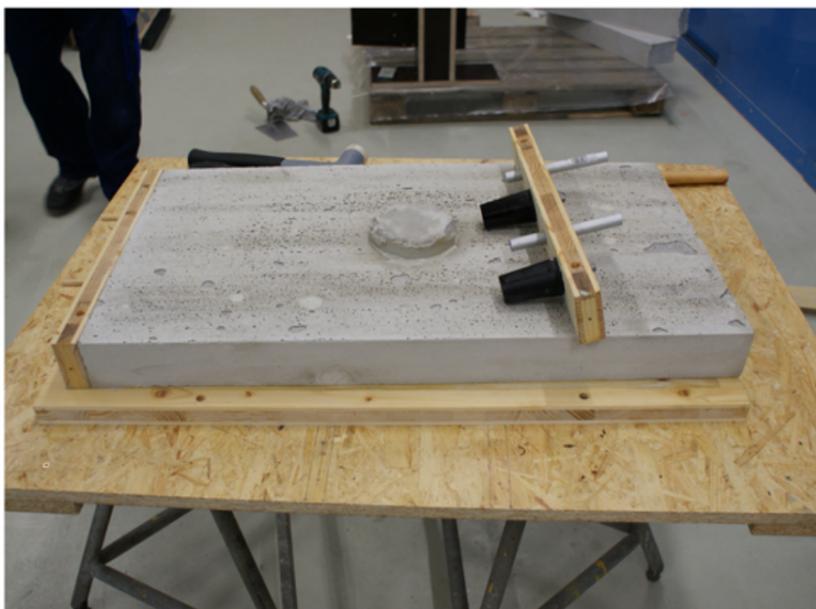
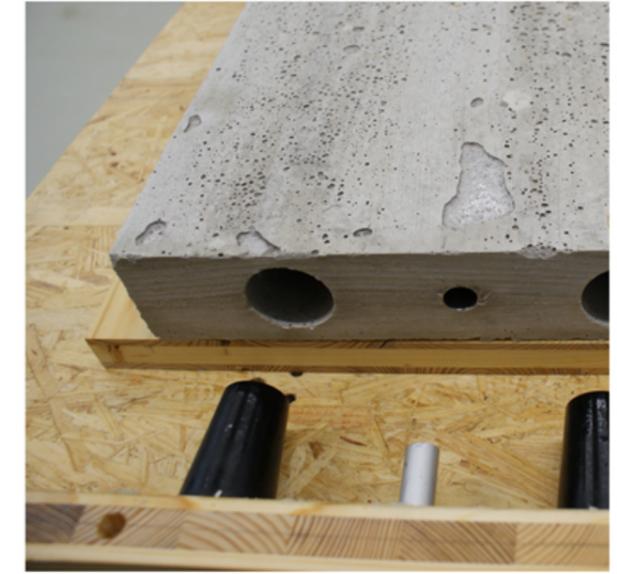
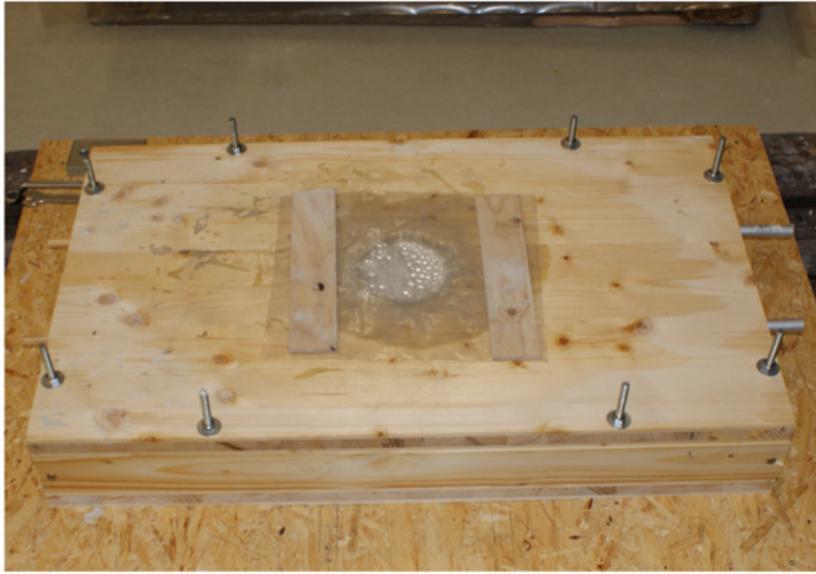
8. Test System I - Schalung - Holzschalung - Schalvorgang & Ausschalen



Schritt 3: Befüllen der Schalung

- Der Übergangsbekräftiger wird über der Schalung in Stellung gebracht. Durch die Ausgangsöffnung des Behälters fließt das UHFB-Gemisch über die 10 cm große Öffnung in die Schalung.
- Es ist anzumerken, dass der Betonfluß nicht in einem Durchgang sondern eher in mehreren Impulsen eingefüllt wurde, um dem Beton jene Zeit zu geben, die er für eine gleichmäßige Verteilung unter den Führungsrohren benötigt.
- Schließlich wurde bis zum Überlauf angefüllt, weil das Material sich erst nach einigen Minuten nachverdichtet, wodurch ein temporärer Betonüberschuss zum Nachfließen vorhanden sein sollte.
- Auch bei dieser Schalung hat die flächige Verpressung ausgereicht, wodurch diese als dicht zu bezeichnen ist.
- Bei diesem Schalvorgang wurde nach dem Befüllen eine Folie über den Korpus gelegt, um eine Rissbildung, die sogenannte Elefantenhaut, zu vermeiden.

8. Test System I - Schalung - Holzschalung - Schalvorgang & Ausschalen



8. Test System I - Schalung - Holzschalung - Schalvorgang & Ausschalen



Holzschalung



XPS Schalung



Erkenntnisse:

- Im Großen und Ganzen gibt es 2 markante Qualitätsunterschiede zur XPS Schalung. Einerseits ist die Qualität der Oberflächen, bedingt durch die harte Schalungsoberfläche und das mehrmalige Auftragen des Schalungsöls sehr gut, andererseits bleibt ein Fingerabdruck der Holzmaßerung im Beton erhalten.
- Der einzige Nachteil bei dem ausgeschalteten Objekt ist die Oberseite. Es gilt die Vermutung, dass es durch das Fehlen eines Betondrucks an der Oberfläche zu keinerlei Verdichtung kam, wodurch auch kein Material nachfließen konnte und die aufsteigenden Luftblasen unter der Schalung Krater hinterließen. Dieses Problem wird bei der nächsten Schalung einerseits durch eine Schrägstellung der gesamten Schalung und dem Anbringen der Einfüllöffnung an der flachen Stirnseite gelöst. Zudem sollte der Bauteil bei dem nächsten Durchgang auch deswegen senkrecht stehen, um den Schaldruck zu konzentrieren, wodurch zwar die Belastung für die Schalung erhöht, aber auch eine Qualitätssteigerung ermöglicht werden kann.

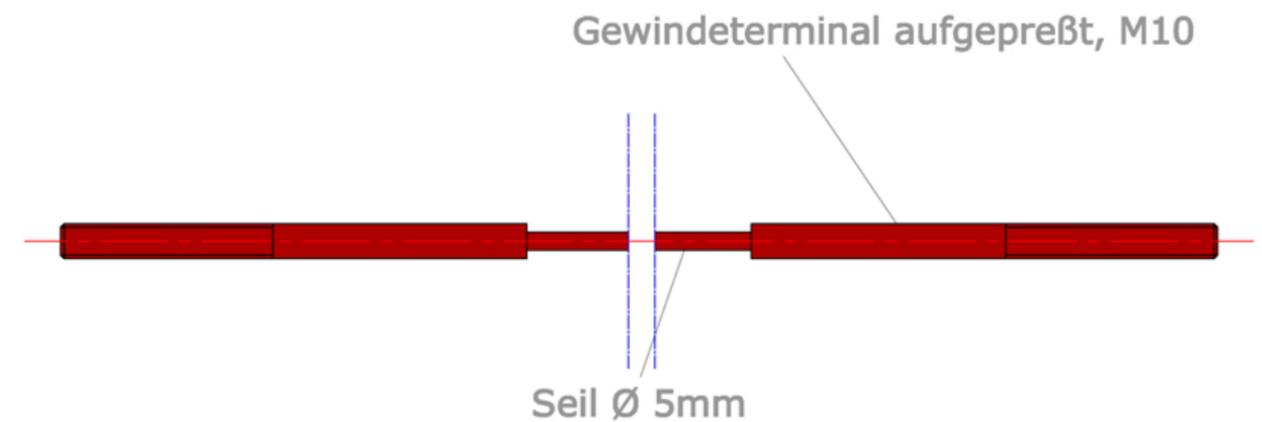
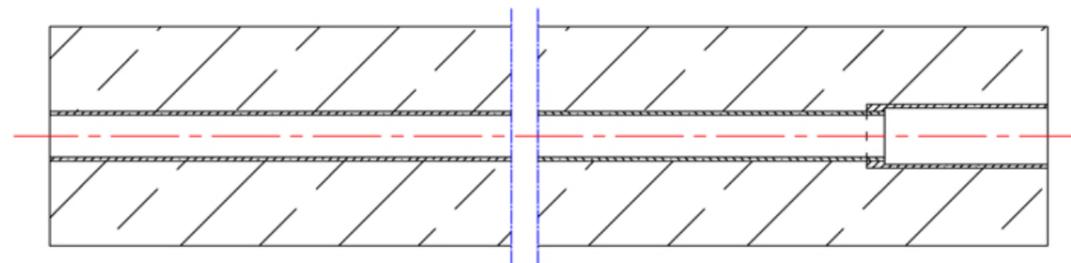
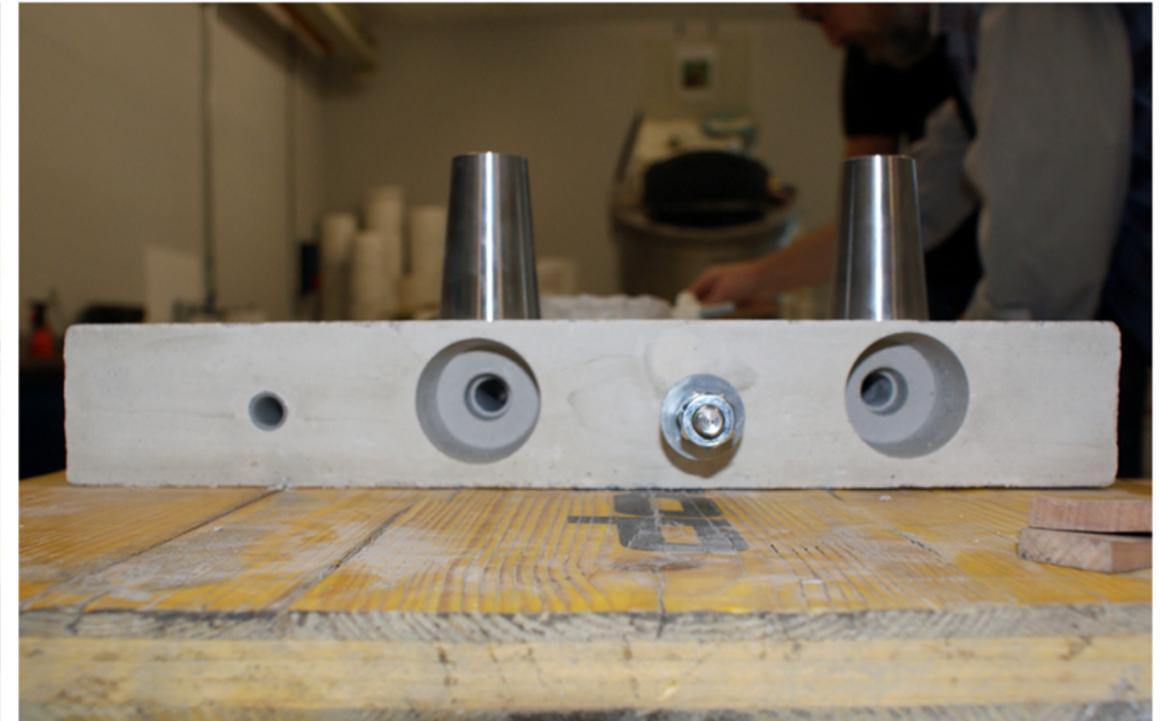
8. Test System I - Schalung - Vergleich zwischen XPS- und Holzschalung

Vergleicht man beide ausgeschalteten Betonteile (XPS-u. Holzschalung), so erkennt man auf den ersten Blick eine Qualitätssteigerung. Hier darf aber nicht vergessen werden, dass die Styrodurschalung nicht professionell hergestellt wurde. Bei Holz hingegen braucht man „nur“ exakt zugeschnittene Bretter, welche in jedem Baumarkt erhältlich sind und einige Schrauben, um eine Schalung zu erstellen. Bei der Schalung aus Hartschaumplatten wurden herkömmliche Dämmplatten aus dem Baumarkt verwendet und mit dem Styrocutter zugeschnitten. Unter professionellen Umständen würde zwar ein dem Styrodur ähnliches Material zur Verwendung kommen, aber mit besseren Eigenschaften in Hinsicht auf die Härte. Zudem kann die Oberfläche weitaus resistenter beschichtet werden, als dies bei uns der Fall war. Prinzipiell kommen beide Materialien für eine amorphe Betonschalung in Frage, wobei die Holzschalung, welche in solch einem Fall, wie das Referenzprojekt Marta zeigt, aus mehreren Teilen besteht, bezüglich der Kosten höchstwahrscheinlich teurer wäre. Der Vorteil liegt aber darin, dass die Oberfläche nicht mehr nachbearbeitet werden muss, zudem wären sehr viele Schalungsvorgänge mit den gleichen Elementen machbar. Bei einer Schalung aus Styroporblöcken ist es sicher von Vorteil, dass die einzelnen Elemente auf einer passenden Fräse in einem Stück hergestellt werden können. Dafür sind aber im Nachhinein aufwendige Oberflächenbeschichtungen nötig, um eine optimale Qualität des geschalteten Betonelements zu gewährleisten. Bei guter Ausführung der Schalung sind auch einige Betoniervorgänge mit den gleichen Elementen denkbar. Grundsätzlich kommt es aber auf den Verwendungszweck an, für welches Material man sich schließlich entscheidet und natürlich auf die Kosten, sowie die Verfügbarkeit entsprechender ausführender Firmen.

8. Test System I - Montage der Testkörper

Nach der erforderlichen Trocknungszeit des Betons konnte die Montage des Systems 1 erfolgen. Die dafür erforderlichen Einzelteile haben wir entweder bestellt oder anfertigen lassen, um zu testen, ob die gedanklichen Überlegungen mit der Praxis übereinstimmen.

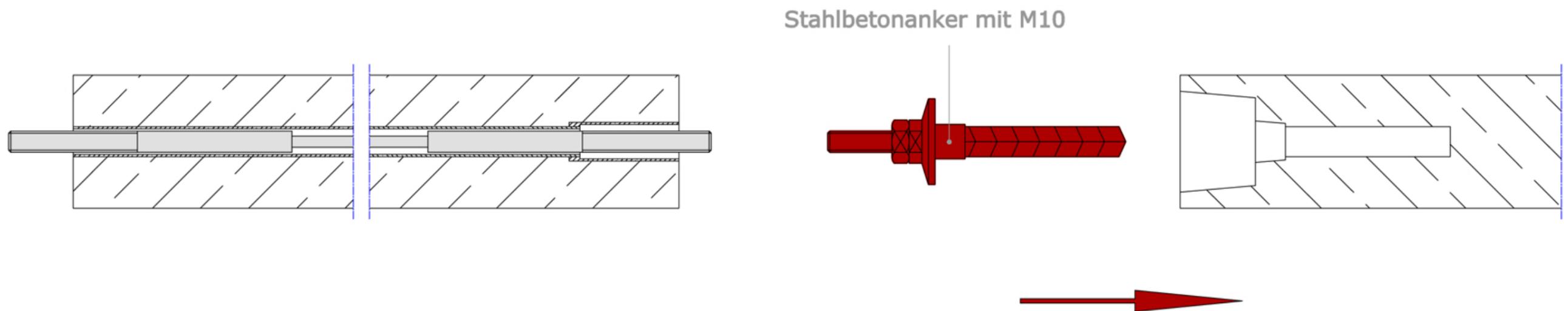
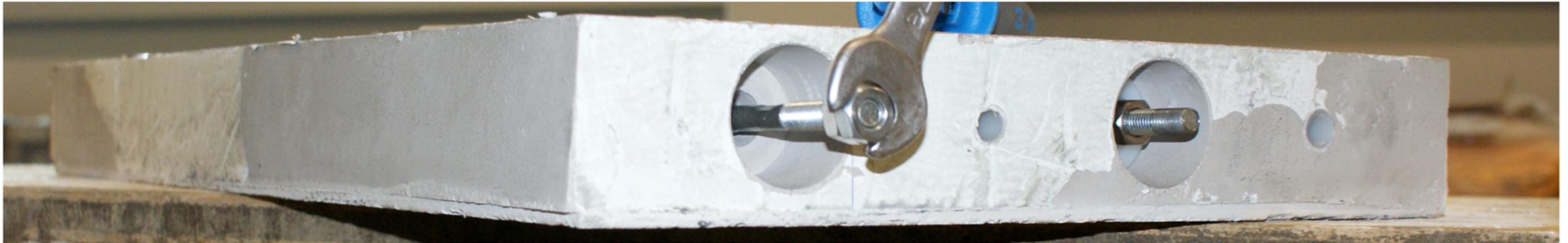
Schritt 1: Einschub des Seils mit 2 aufgepreßten Gewindeterminals in den Betonfertigteil



M=1:2

8. Test System I - Montage der Testkörper

Schritt 2: Einfügen des Stahlbetonankers in den 2. Betonfertigteile



M=1:2

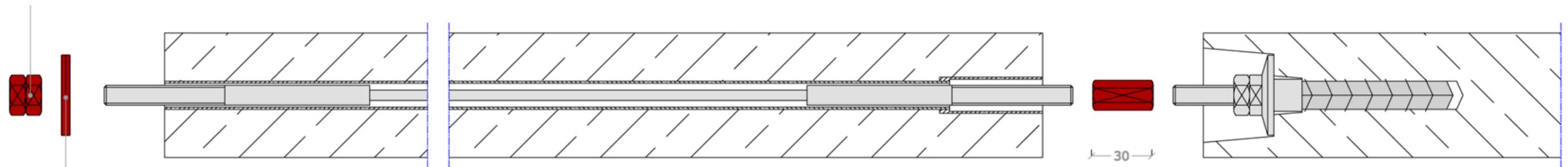
8. Test System I - Montage der Testkörper

Schritt 3: Aufbringen von 2 Stk. Beilagscheiben und 2 Stk. M10 Muttern auf das Ende eines Gewindeterminals
Aufbringen von 1 Stk. M10 Langmutter auf den Stahlbetonanker

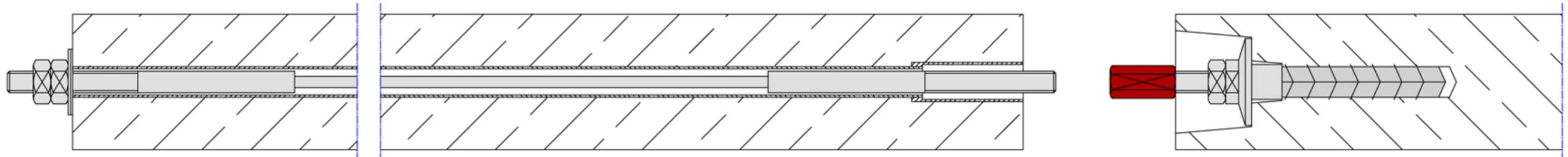
Schritt 4: Verbinden der 2 Betonfertigteile durch die Langmutter



2 M10 Muttern



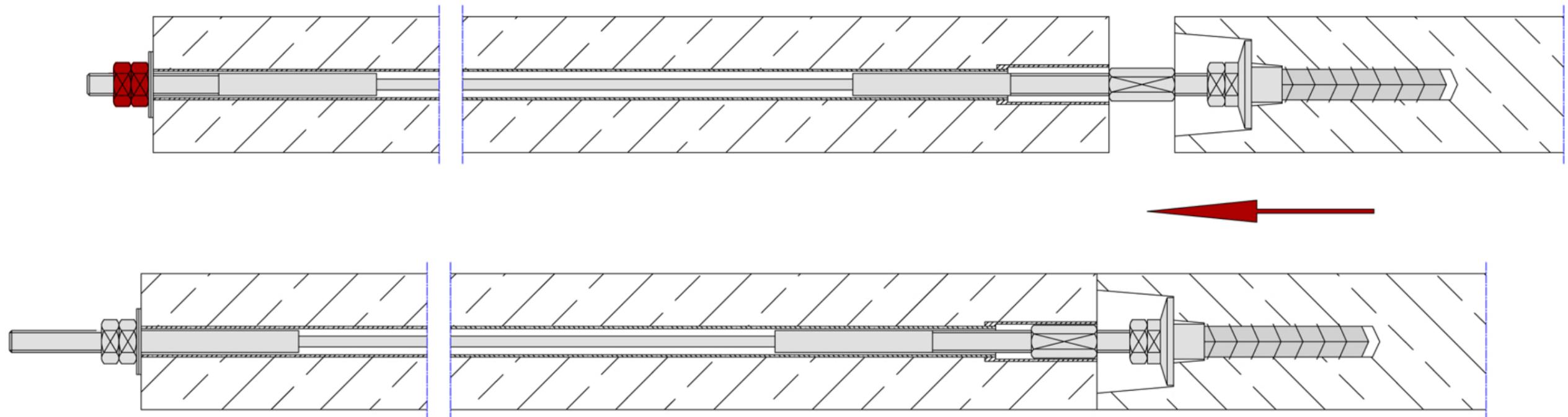
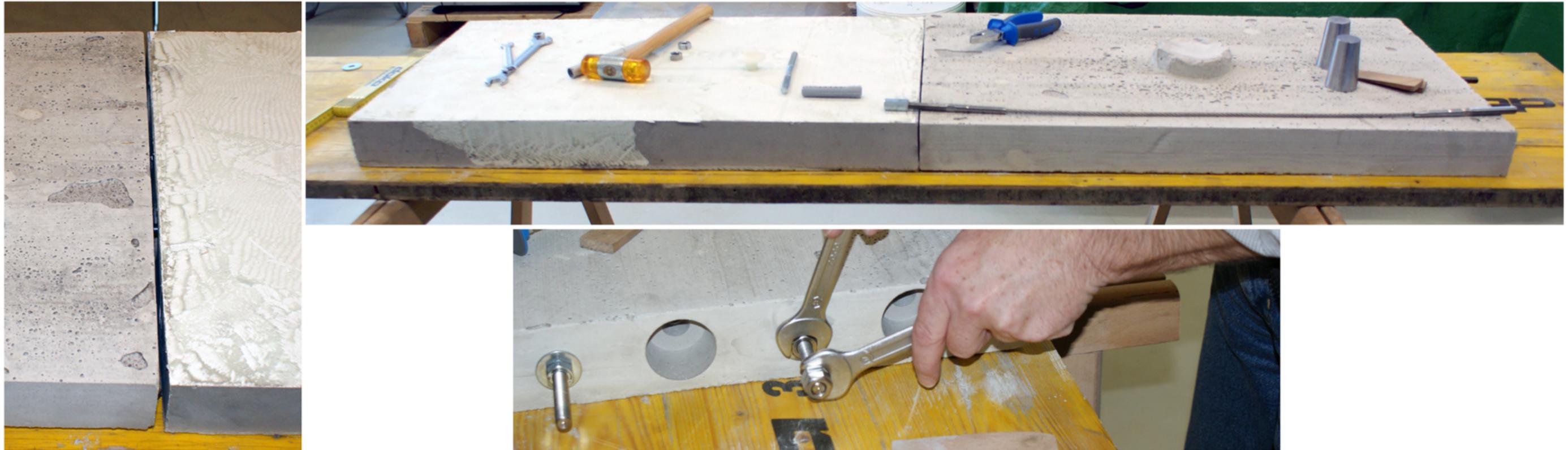
2 Beilagscheiben, a' 40/10/2



M=1:2

8. Test System I - Montage der Testkörper

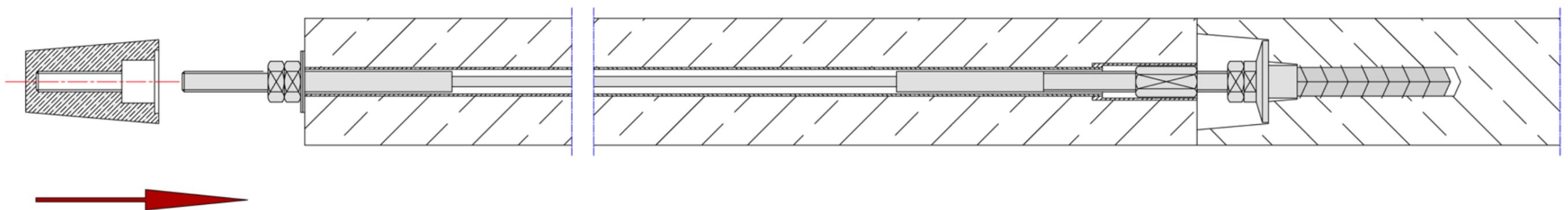
Schritt 5: Spannen der Seile bzw. zusammen ziehen der Betonfertigteile



M=1:2

8. Test System I - Montage der Testkörper

Schritt 6: Aufbringen eines Drehstücks zur weiteren Nutzung des Gewindeüberstands als Positionierbolzen für den nächsten Betonfertigteil

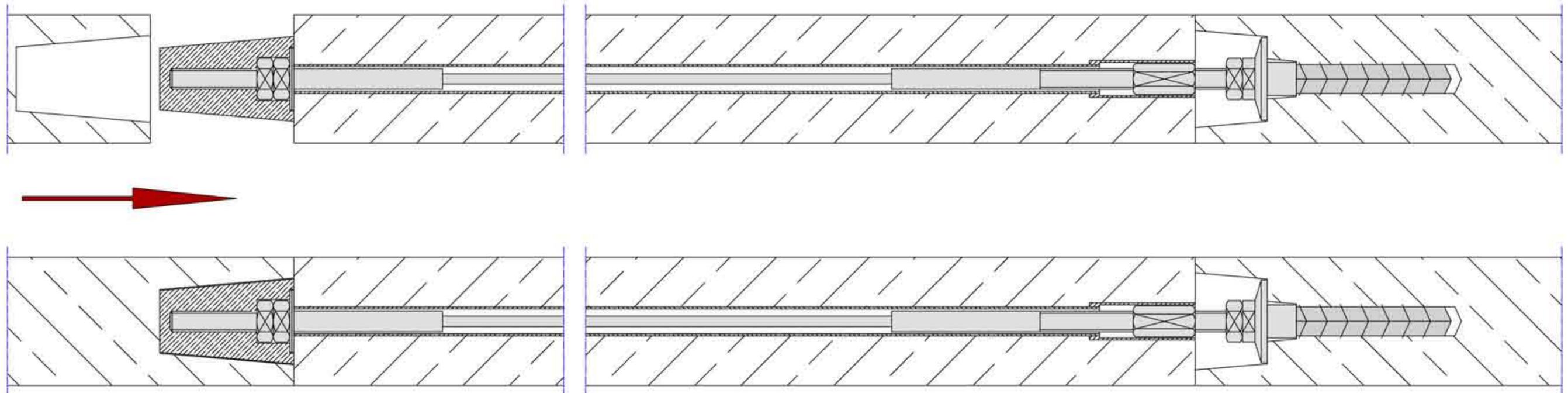


M=1:2

8. Test System I - Montage der Testkörper

Schritt 7: Verbinden mit dem nächsten Betonfertigteile

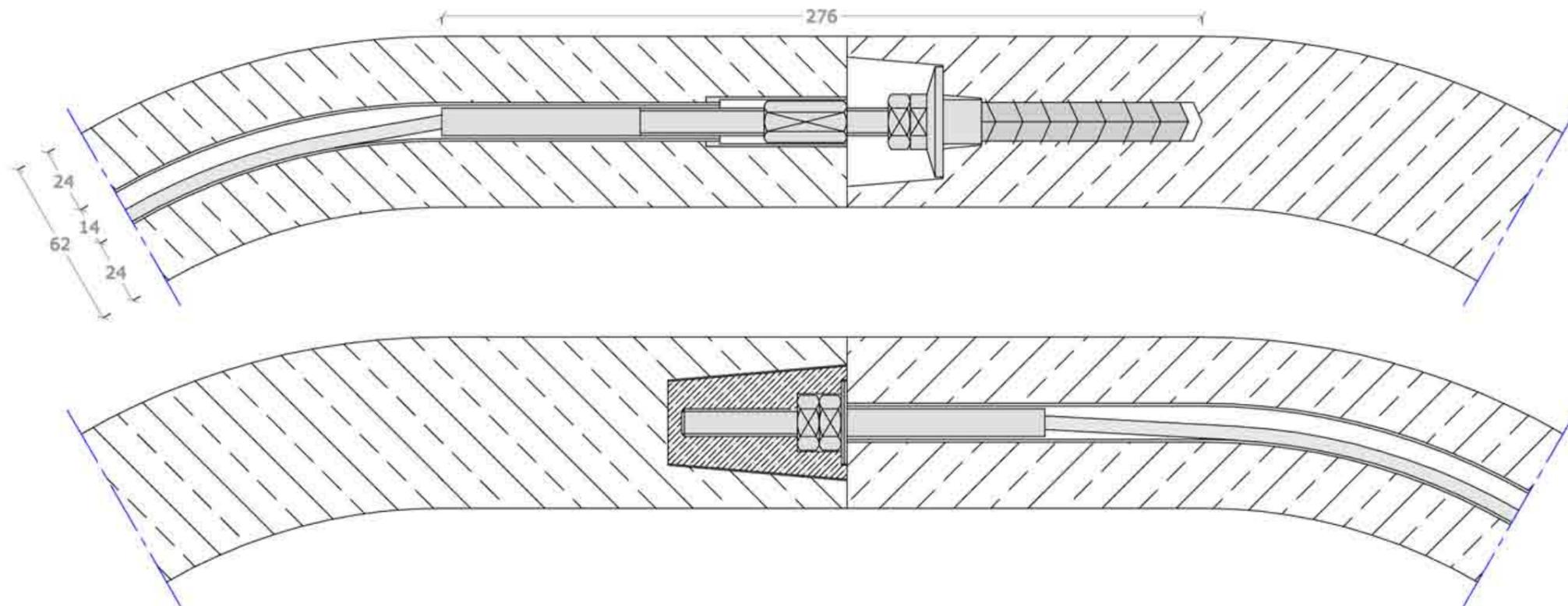
Im Falle einer Anbringung von einem Abschlussstück, sollte dieses aufgeklebt werden. Bei Aufrechterhaltung einer Demontage wären die Positionierbolzen zu sehen bzw. das Abschlussstück müsste zerstört werden.



M=1:2

9. System I bei gewölbten Bauteilen - Möglichkeit I

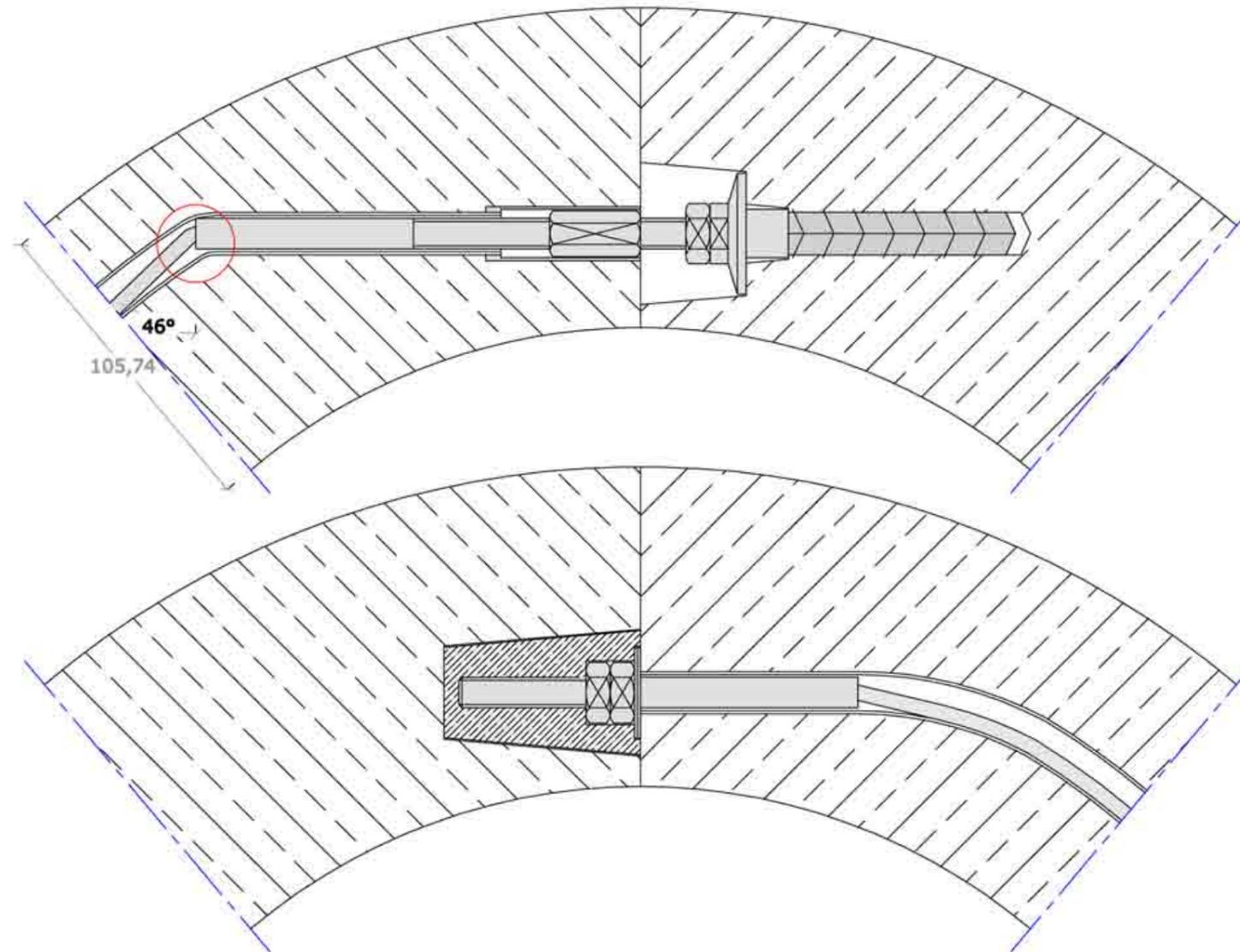
Bei näherer Betrachtung wird klar, dass es im Prinzip 2 Möglichkeiten für eine Wölbungsausformung gibt. Bei der ersten Möglichkeit die hier dargestellt wird, bleiben die Bauteile (Betonkörper) in jenem Bereich gerade, in dem sich die systembedingte Gerade befindet und beginnen erst nach dieser Notwendigkeit ihre Wölbungsausformung. In dem Plan sind zwei Vertikalschnitte, bei denen einer in der Ebene nach hinten versetzt ist, dargestellt, um beide Ausformungsmöglichkeiten der Enden aufzuzeigen.



M=1:2

9. System I bei gewölbten Bauteilen - Möglichkeit II

Die zweite Möglichkeit eine Wölbung umzusetzen, besteht darin, die Bauteile im Bereich der detailabhängigen Geraden zu verstärken. Da allerdings hierbei der unten rot eingekreiste Abscherwinkel von 46° vorhanden ist und ein Einführen des Gewindeterminals nicht mehr möglich ist, ist dieses System in diesem Fall nicht mehr tauglich. Zudem bedeutet der Anstieg der Bauteilstärke um 70 % bzw. auf 106 mm zusätzliches Gewicht und ein unwirtschaftliches Ergebnis. In dem Plan sind zwei Vertikalschnitte, bei denen einer in der Ebene nach hinten versetzt ist, dargestellt, um beide Ausformungsmöglichkeiten der Enden zu zeigen. Die Entscheidung, dieses Problem in einem zweiten System zu eliminieren, ist an dieser Stelle gefallen.



M=1:2

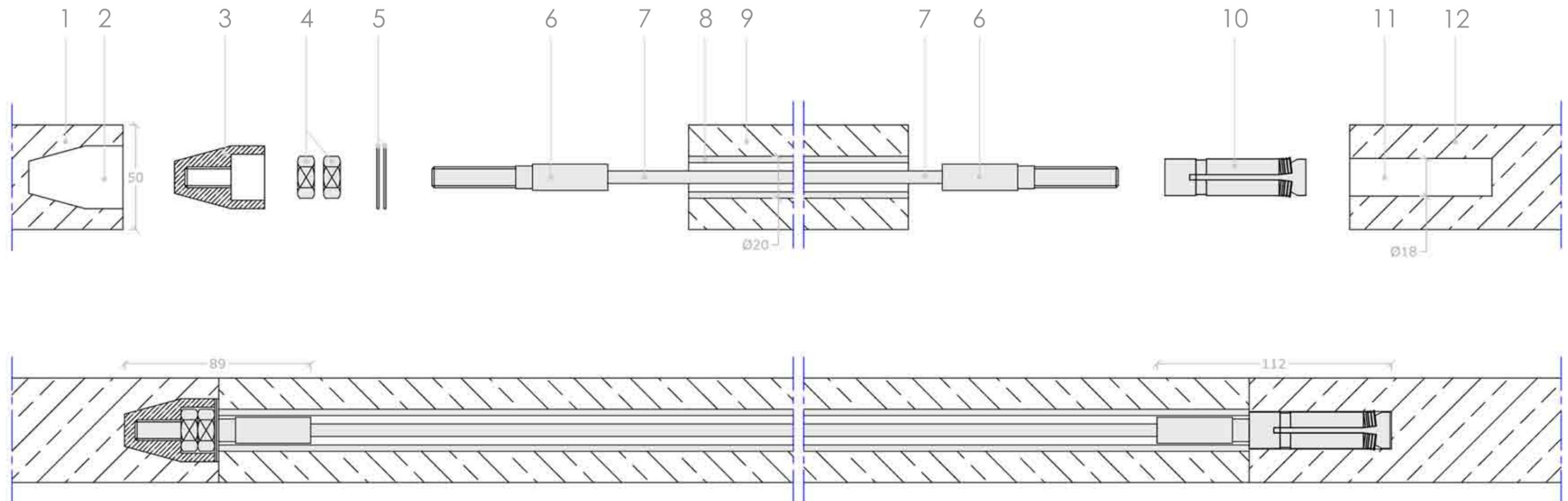
10. Entwicklung System II - Gesamtdarstellung

System II stellt die zweite Entwicklungsstufe dar, hierbei sind Verbesserungen, die sich aus den Erfahrungen und Überlegungen der Optimierung ergaben, dargestellt. Um in weiterer Folge eine Bewertung der Lösung zu erhalten, sind hier Vor- u. Nachteile aufgelistet:

- VT: - Reduktion der Bauteile und somit der Fehleranfälligkeit
- die Bauteilhöhe wurde durch die Konstruktion verringert
 - Verkürzung der Bauteile um 30% der Ursprungslänge
 - Erhöhung des Seildurchmessers von 5 auf 6 mm
 - Zugfestigkeit des Systems erhöht sich durch den Gewindeanker auf 8 kN
 - Kostenreduktion durch weniger Bauteile
 - die Vorpositionierung der Seilführung ohne Abstandhalter ist durch das größere Verbundrohr möglich

- NT: - exakte Vorarbeiten nötig
- Vorfertigung spezifischer Teile (Kosten)
 - die Fuge ist nicht regendicht
 - hoher Planungsaufwand
 - Seilführungsdurchmesser erhöht sich auf 20 mm
 - Ein Nacharbeiten der Stirnseiten, um Abweichungen durch den Schalungsvorgang zu beseitigen, wird evtl. nötig, um eine Passgenauigkeit bei den Fugen zu erzielen.

- | | | |
|--|---|--|
| 1 linkes Betonelement | 5 2 Stk M10 Beilagscheiben s=1mm | 9 mittleres Betonelement inkl. mitgeschalteten Verbundrohr |
| 2 mitgeschaltete Öffnung für Positionierbolzen | 6 aufgepreßter Gewindeterminale mit M10 Endgewinde | 10 Hilti HSC-I M10x60 Innengewindeanker |
| 3 Positionierbolzen | 7 Nirosa Seil d=6mm | 11 mitgeschaltete zyl. Öffnung d=18mm |
| 4 2 Stk. M10 Muttern | 8 Comisa Verbundrohr Kunststoff/Alu
Ad=20mm, Id=14mm | 12 rechter Betonteil |



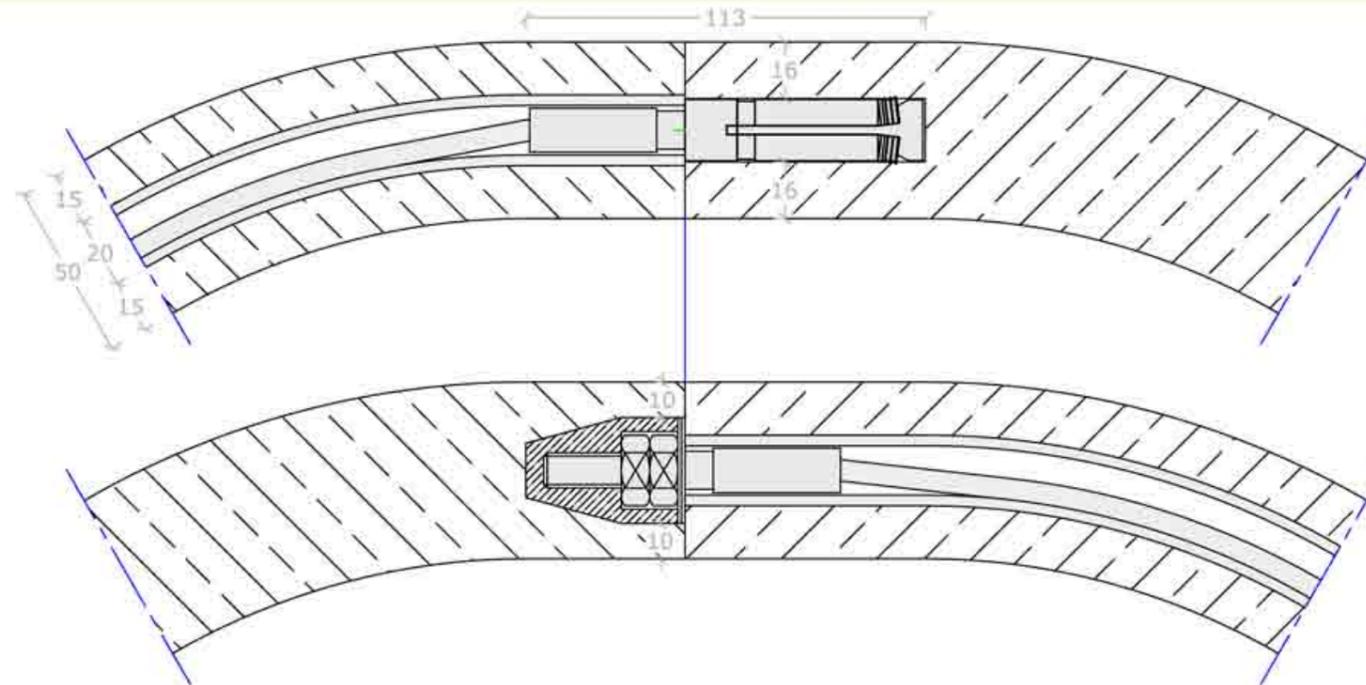
M=1:2, alle Maße in mm

11. Vergleich der Systeme I & II bei gewölbten Bauteilen

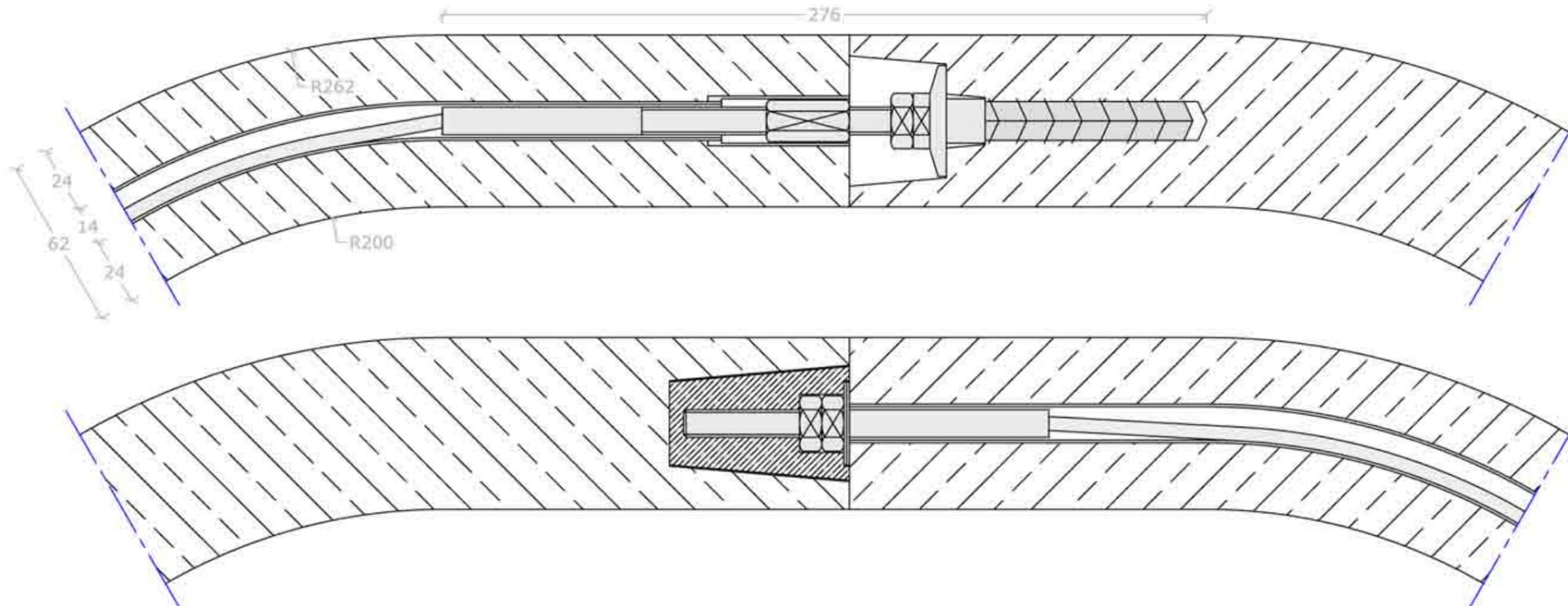
Möglichkeit 1: Die Bauteile bleiben im Bereich der detailbedingten Länge gerade

Es zeigt sich, dass durch die Reduzierung der Bauteile und der Verkürzung der notwendigen Länge durch das Detail beim System II, der notwendige gerade Abschnitt im Vergleich zu System I, um 59% also von 276 mm auf 113 mm verkürzt werden kann, um weiterhin eine konstante Wandstärke garantieren zu können.

System II:



System I:



M=1:2, alle Maße in mm

11. Vergleich der Systeme I & II bei gewölbten Bauteilen

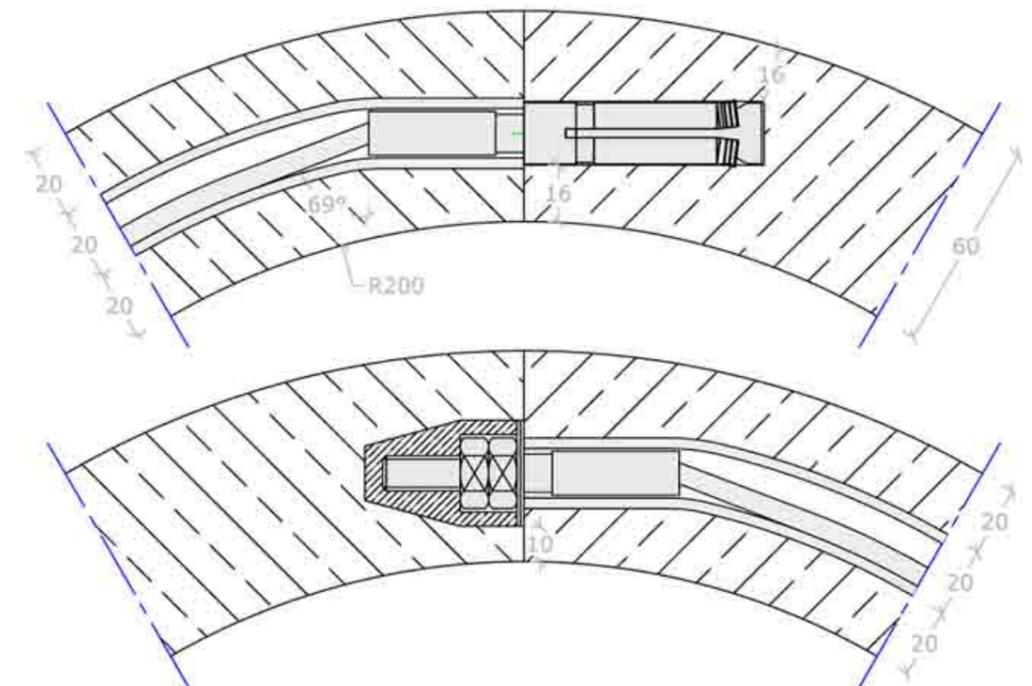
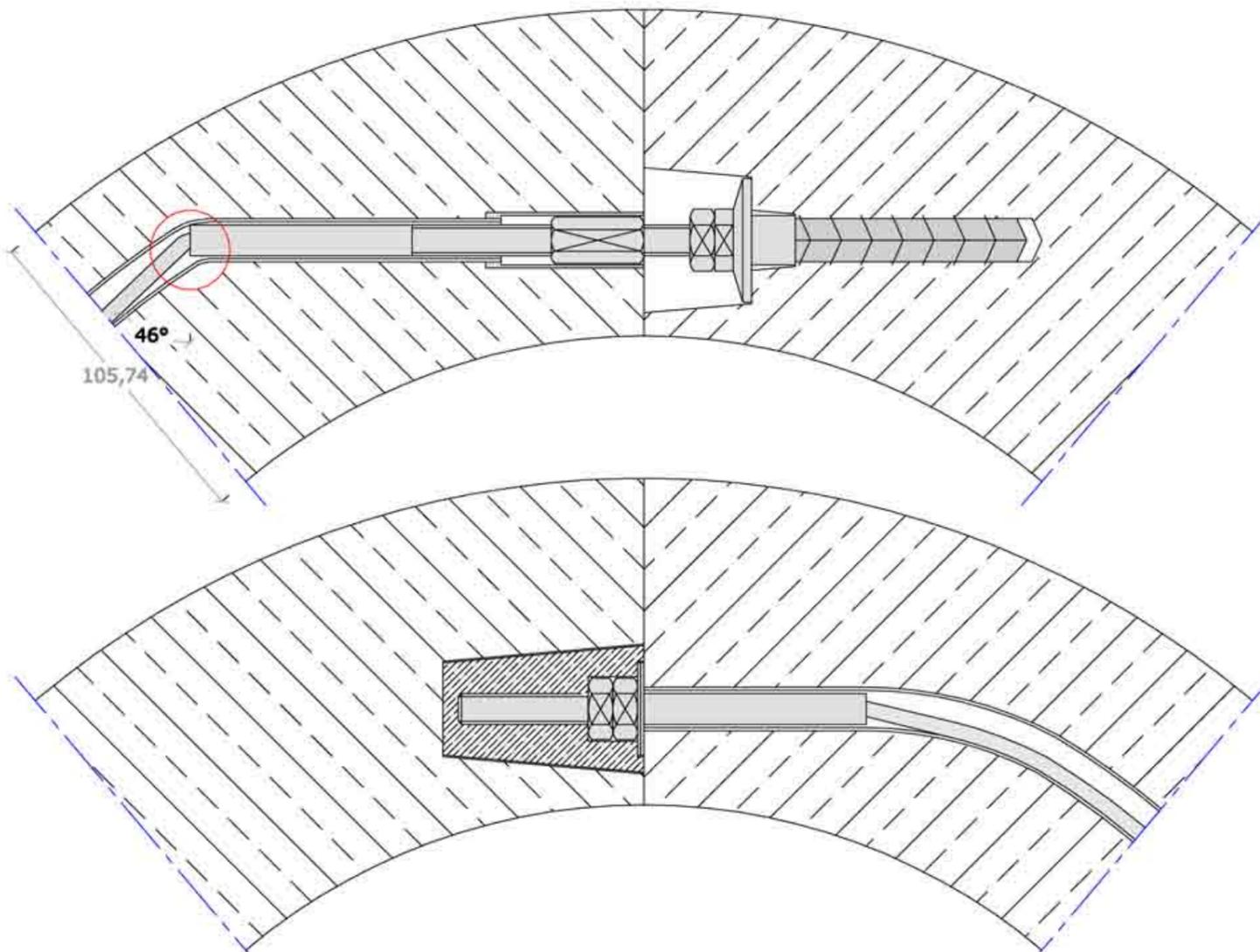
Möglichkeit 2: Die Bauteile passen sich im Bereich der detailbedingten Länge den Radien an, wodurch die Bauteilstärke zunimmt.

System I:

Da der Abscherwinkel 46° beträgt und ein Einführen des Gewindeterminals nicht mehr möglich ist, erweist sich dieses System in diesem Fall als nicht mehr tauglich. Ein zusätzlicher negativer Punkt ist die außerordentliche Bauteilstärke von 106 mm, das bedeutet ein Ansteigen um 70 % gegenüber einer Verbindung mit geraden Bauteilen.

System II:

Durch den Einsatz eines kompakteren Gewindeterminals verbessert sich der Abscherwinkel auf 69° . Die Montage des Gewindeterminals ist bei einem Innenradius des Betonfertigteils von 200 mm nicht gefährdet. Die Bauteilstärke erhöht sich gegenüber einer Verbindung mit geraden Bauteilen um nur 20 %, d.h. auf 60 mm.

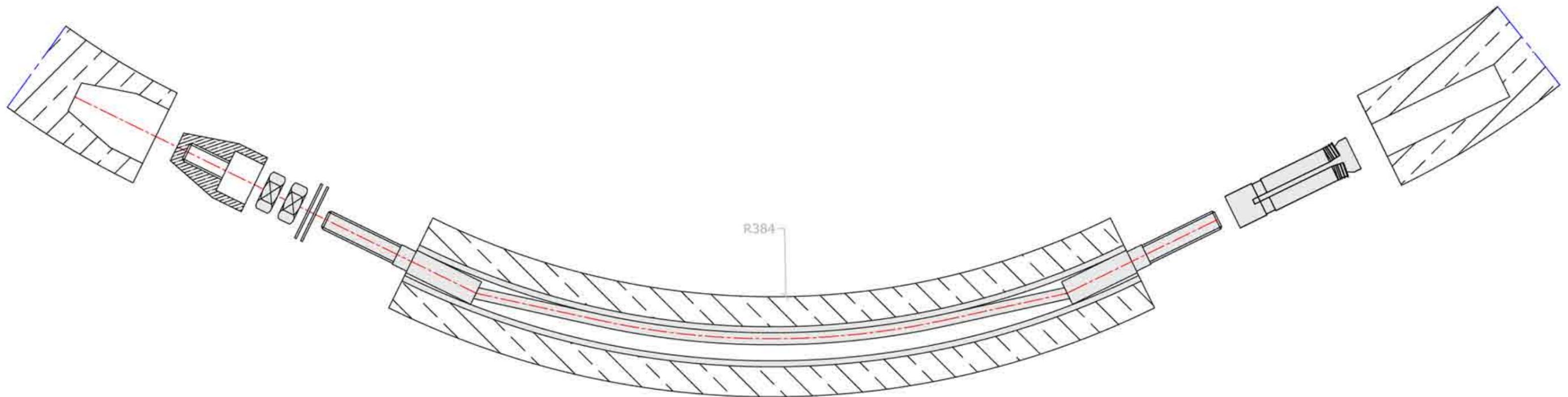


M=1:2, alle Maße in mm

12. Herleitung der Begrenzungsfaktoren für System II:

Erläuterung durch den Montageversuch der Gewindeterminals:

Zu Beginn wird ein aufgepreßter Gewindeterminal inkl. dem Seil in die dafür vorgesehene, mitgeschalte Seilführung eingeführt. Das Problem hierbei besteht in einer Begrenzung der Radien, bezogen auf den Seilführungsdurchmesser, da sich ab einem gewissen Wölbungsradius der Gewindeterminal verklemmt und ein Einführen nicht mehr gewährleistet werden kann. Um dem entgegen zu wirken, siehe unten, ist ein Bauteilinnenradius von > 384 mm bei einer Querschnittshöhe von 50 mm über den gesamten Bauteilquerschnitt notwendig.



M=1:2, alle Maße in mm

12. Herleitung der Begrenzungsfaktoren für System II - Horizontalschnitte:

Erläuterung durch den Montageversuch unter der Bedingung, dass die Fuge als richtungswechselnde Spline ausgebildet ist:

Es ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass der maximale Tangentenwinkel der richtungswechselnden Spline vom Positionierbolzen abhängt. Um diesem eine plane Anschlussfläche zu bieten, muss der Betonfertigteile entsprechend ausgebildet werden, was wiederum mit der Schaltechnik zusammenhängt, da hierbei ein zylindrisches Gegenstück benötigt wird. Dieses muss maximal jenem zylindrischen Abschnitt des Positionierbolzens plus der Stärke der Beilagscheiben entsprechen. Eine genauere Analyse ist auf der folgenden Seite einzusehen.

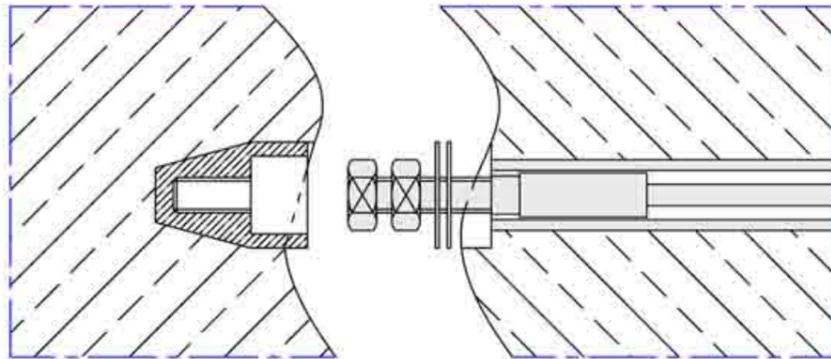


Abb. I: demontierter Zustand des Gewindeterminals und Positionierbolzens

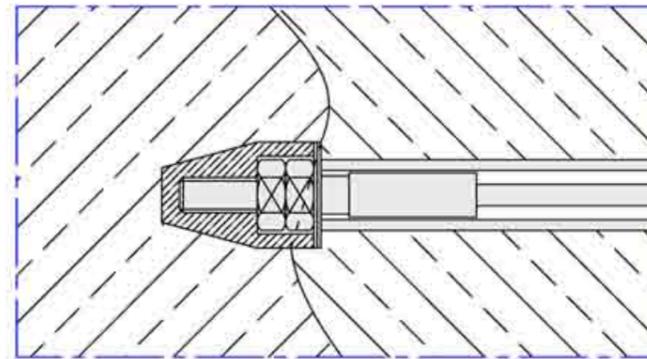


Abb. II: montierter Zustand des Gewindeterminals und Positionierb.

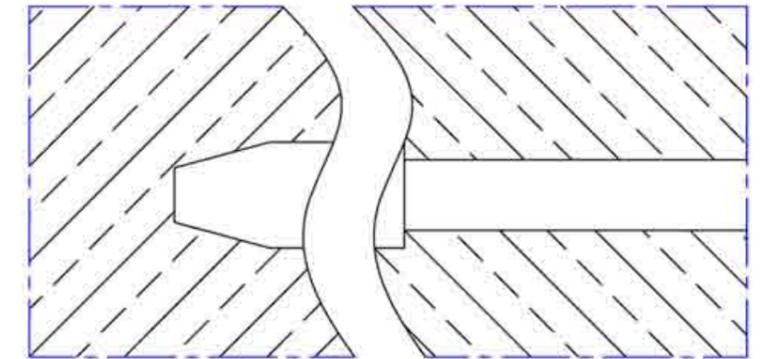


Abb. III: nötige Ausnehmung im Beton

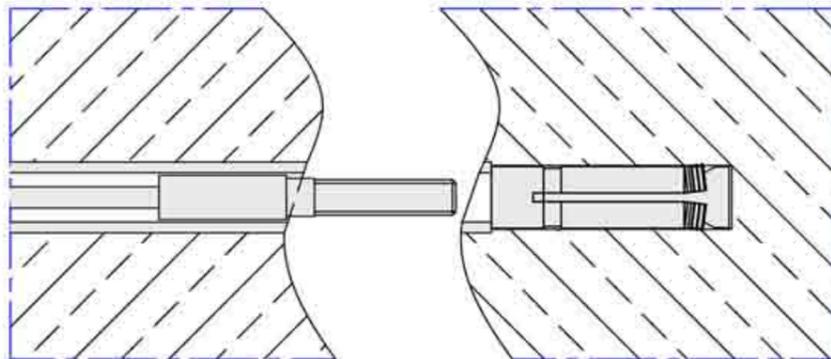


Abb. IV: Gewindeterminal & Betonanker in demontiertem Zustand

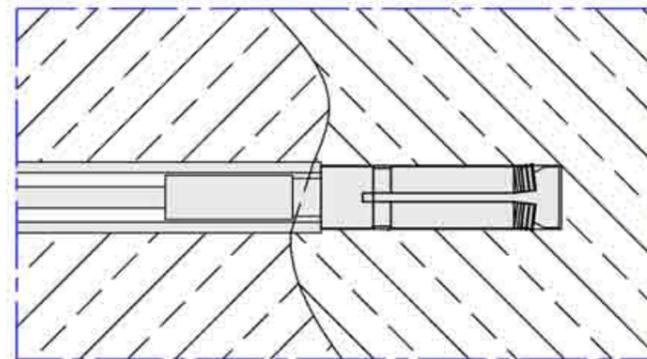


Abb. V: Gewindeterminal & Betonanker in montiertem Zustand

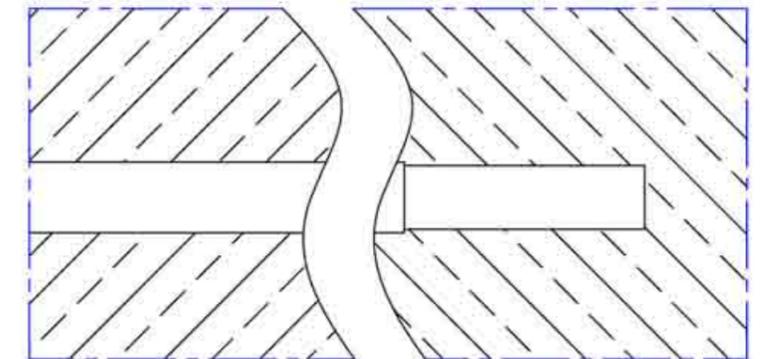


Abb. VI: nötige Ausnehmung im Beton

M=1:2

12. Herleitung der Begrenzungsfaktoren für System II - Horizontal- und Vertikalschnitte

Damit ein Positionieren des Bolzens in sein mitgeschaltetes Gegenstück zu ermöglicht wird, muss er sich nach dem Einschub in diese Öffnung zum Teil verklemmen können, um Ungenauigkeiten des Schalens auszugleichen. Durch die übertragene Gewichtskraft der Betonelemente auf die Seitenwände des Bolzens kommt es zu dieser Verklemmung. In Folge dessen muss der Positionierbolzen über seine Länge auf zumindestens einer Seite vollständig in der Öffnung sitzen, da er sonst seine Wirkung als Führung verlieren könnte. In den unteren Darstellungen sind die Begrenzungsfaktoren für zwei Ausbildungen verschiedener Elemente zu erkennen. Zum Einen mit gewölbtem Querschnitt und zum Anderen mit geraden Elementen. In beiden Fällen jedoch soll eine Fuge als richtungswechselnde Spline ausgeführt werden, wobei die sekundäre Lösung bei gewölbten Querschnitten in Abb. 5+6 dargestellt wird. Hierbei ist die Ausbildung des Betonelements zwar komplizierter, dafür kann jedoch mit Standardbolzen gearbeitet werden. Bei der primären Lösung (Abb.3+4) kommt ein veränderter bzw. längerer Bolzen zum Einsatz, wodurch gleich wie bei Abb. 5+6, ein größerer Winkel zur Fuge möglich wird.

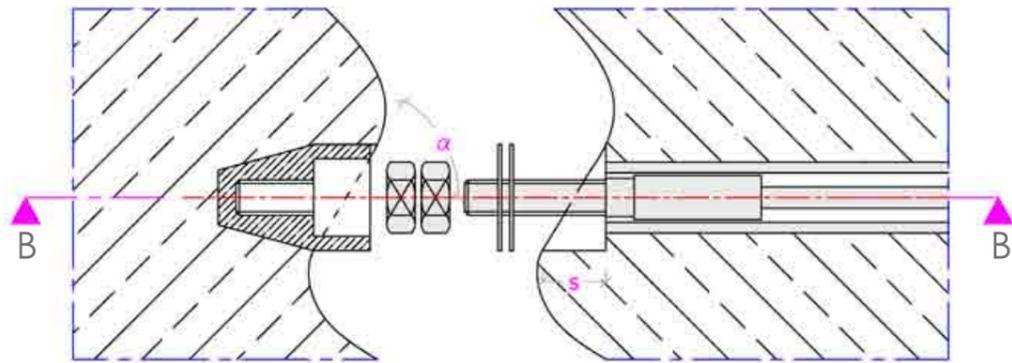


Abb. 1: Horizontalschnitt A-A, Positionierbolzen bei gewölbtem Querschnitt, max. Verformungswinkel der Spline zur Achse des Bolzens: $\alpha = 59^\circ$

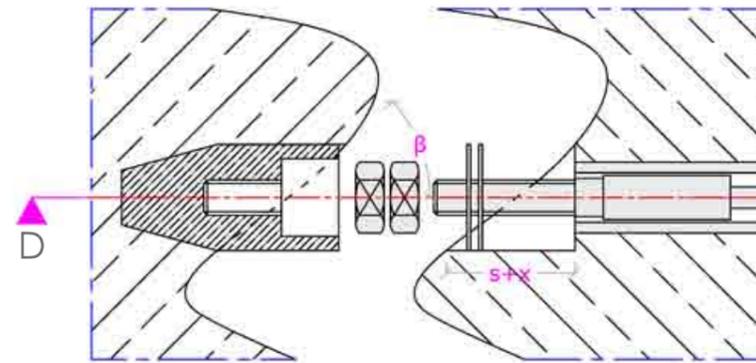


Abb. 3: Horizontalschnitt C-C, Positionierbolzen bei geradem Querschnitt, max. Verformungswinkel der Spline zur Achse des Bolzens: $\beta = 43^\circ$

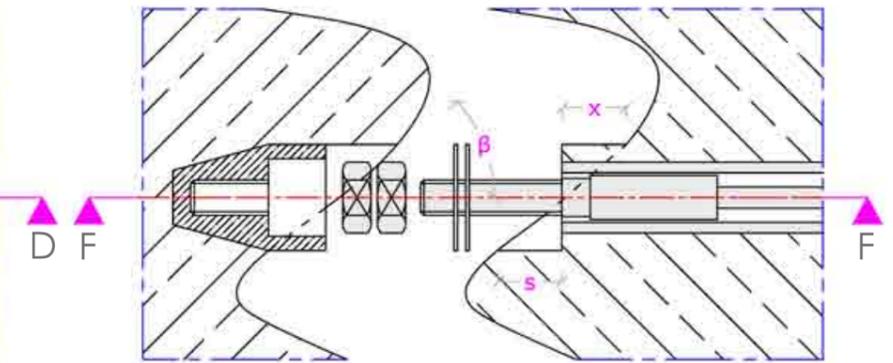


Abb. 5: Horizontalschnitt E-E, Positionierbolzen bei geradem Querschnitt, max. Verformungswinkel der Spline zur Achse des Bolzens: $\beta = 43^\circ$

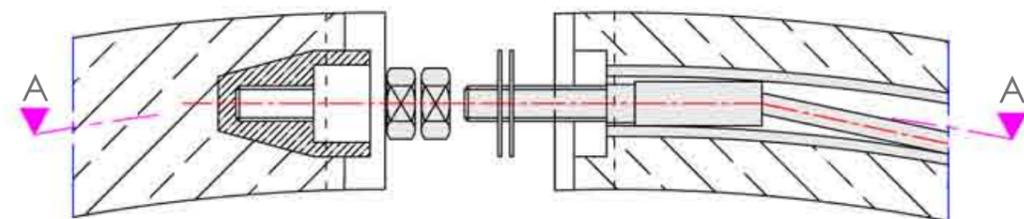


Abb. 2: Vertikalschnitt B-B, Positionierbolzen bei gewölbtem Querschnitt, max. Verformungswinkel der Spline zur Achse des Bolzens: $\alpha = 59^\circ$

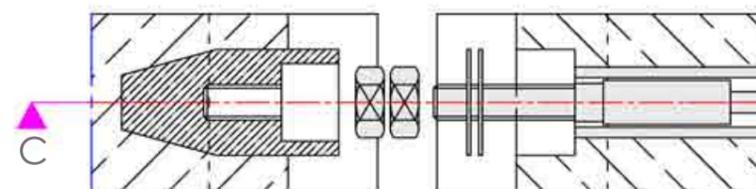


Abb. 4: Vertikalschnitt D-D, Positionierbolzen bei geradem Querschnitt, max. Verformungswinkel der Spline zur Achse des Bolzens: $\beta = 43^\circ$

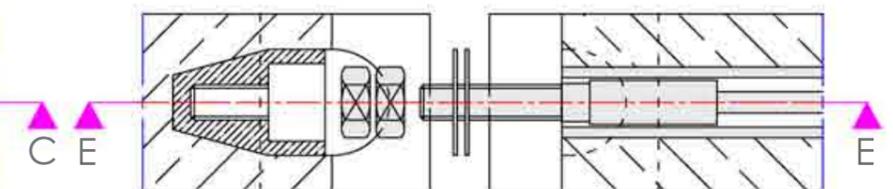


Abb. 6: Vertikalschnitt F-F, Positionierbolzen bei geradem Querschnitt, max. Verformungswinkel der Spline zur Achse des Bolzens: $\beta = 43^\circ$

s . . . detailbedingte Mindesttiefe für den Bolzen 16 mm

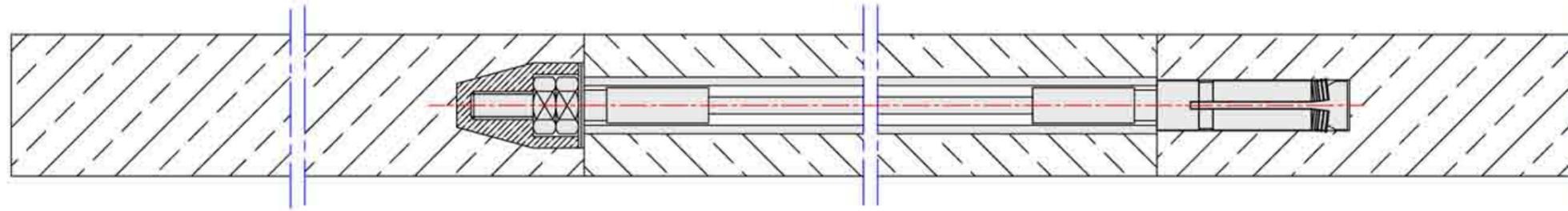
s+x . . . detailbedingte Mindesttiefe für den Sonderbolzen in Abhängigkeit von β

x . . . durch den steileren Winkel β bedingte Länge für einen Betonüberstand des Elements an dieser Stelle

Durch den Umgang mit der oben gezeigten Situation kann die gestalterische Freiheit bei der Ausbildung der Fugen eingeräumt werden. Es ist jedoch erneut zu erwähnen, dass bei den Fugenausbildungen von gekrümmten Volumenkörpern immer auf die errechnete Mindestbauteilstärke zu achten ist. Ein weiterer Faktor für die Beeinflussung der Ausbildungen ist, dass bei zwei Betonsegmenten die miteinander verbunden werden sollen, die Positionierbolzen immer parallel zueinander in den Bauteil eingebaut werden müssen, da andernfalls kein Ineinandergreifen der Bolzen und ihrer Führung möglich wäre. Dieser Umstand führt zu Anpassungen der Betonsegmente, weswegen die in Abb. 5+6 gezeigte Lösung von uns empfohlen wird. Weiters sollte darauf acht gegeben werden, dass man „nur“ drei Positionierbolzen benötigt, um die Position einer Fläche im Raum zu definieren.

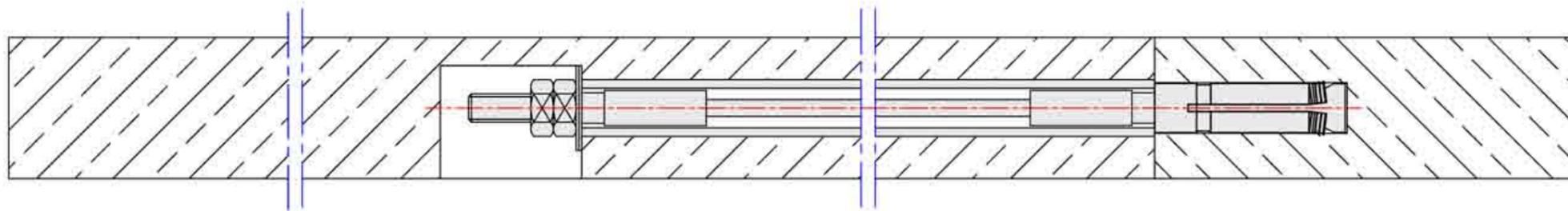
M=1:2

13. Möglichkeiten der Endausbildung (Vertikalschnitte)



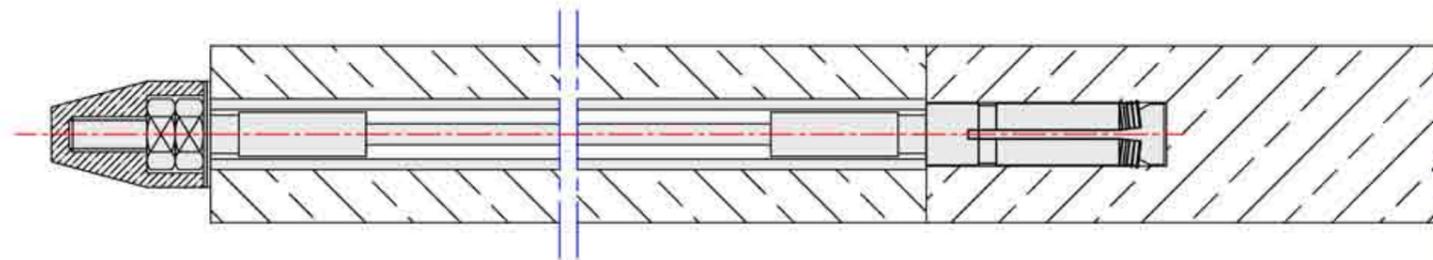
Verkleben:

Das Verkleben des Endstücks mit der Gesamtstruktur an der Stoßfuge bringt den gestalterischen Vorteil, dass die Konstruktion in keinsten Weise sichtbar wird und das gewünschte Gebilde als homogene Form auftreten kann. Für den Fall einer Demontage muss das verklebte Endstück zerstört werden, um an die Positionierbolzen und die darunterliegende Spannvorrichtung heranzukommen.



Verspannen:

Da eine Öffnung zum Verspannen nötig ist, ist die Überlegung in Bezug auf ihre Positionierung entscheidend. Dieses System kann als effizient angesehen werden, da es sich zum Zweck einer Demontage eignet und die Öffnung bzw. sichtbare Konstruktion relativ klein ausfällt. Einziger Nachteil hierbei ist ein höherer Aufwand bei der Schalung für das Betonfertigteil.



Sichtbares Ende:

Konstruktiv gesehen ist dies die einfachste Lösung, da hierbei das Endstück entfällt und die Positionierbolzen sichtbar sind. Es ist jedoch anzumerken, dass eine individuelle, gestalterische Ausbildung durch die vorhandenen M10 Gewinde möglich ist.

M=1:2

14. Berechnungsmodell

Auf den folgenden Seiten werden jene Schritte erläutert, die es erlauben, aus dem Entwurf einer dreidimensional verwundenen Fläche ein statisches Berechnungsmodell zu definieren, anhand dessen alle auftretenden Lasten, welche auf die Form einwirken, berücksichtigt werden, um in weiterer Folge entsprechende konstruktive Lösungen für die Auflager und Fundamente zu definieren. Dieser Schritt ist aber gleichsam wichtig für die Betrachtung der Verformung der Gesamtstruktur, um eventuell mit geometrischen Veränderungen eine Optimierung zu erreichen.

Da einer der wichtigsten Punkte bei unserem Projekt im Aufbau mehrerer Segmente liegt, muss auch das Berechnungsmodell auf diesen Umstand eingehen, was wiederum bedeutet, dass das Objekt nicht als Ganzes, sondern in genau jenen Teilen, aus denen es besteht, in das Statikprogramm eingespeist werden muss, um auf die maximalen Kräfte, die in den richtungswechselnden Stoßfugen wirken, zu kommen bzw. ein annähernd realistisches Szenario der Lasteinwirkung auf die Gesamtstruktur und deren Reaktion bzw. Verformung auf diese nachzuahmen.

Hierbei ist zu erwähnen, dass alle Umwandlungs- u. Berechnungsschritte sowie alle Ergebnisse am Institut für Tragwerksentwurf an der TU-Graz entwickelt und umgesetzt wurden. Eine besondere Danksagung gilt hierbei Herrn Univ.Ass. Arch. DI Helmut Schober, der sich intensiv mit den Berechnungsmöglichkeiten auseinandergesetzt und uns entsprechend unterstützt hat.

Verwendete Programme:

- Dlubal RFEM (Baustatikprogramm)
- McNeel Rhinoceros 4.0 (3-D Modellierungsprogramm)

Datentransfer:

Da wir bereits für die Entwurfsüberprüfung mittels Renderings ein 3-D Modell im Rhinoceros produziert hatten, lag es auf der Hand, dieses für die Berechnung weiter zu verwenden. Nach gescheiterten Versuchen unser Gebilde als Ganzes oder in Segmenten mittels verschiedenster Exportformate umzuwandeln, um es schließlich in das RFEM einzuspeisen, stellte sich heraus, dass es nur mittels Export eines Linienmodells als dxf - file funktionieren kann. Anhand eines kleinen Testlaufs mehrerer Linien wurde diese Theorie bestätigt, wodurch nun der erste Schritt den lückenlosen Datentransfer zu gewährleisten, fest stand.

Vorbemessung:

Beim concrete leaf handelt es sich um einzelne Segmente, die vorgespannt werden. Da man jedoch im RFEM diese Vorspannung nicht simulieren kann, empfehlen wir für eine tatsächliche Bemessung ein Nachrechnen mit einer anderen 3D-FE-Software wie z.B. Sofistik, Abaqus oder Ansys.

Das Funktionsprinzip des RFEM liegt darin, dass ein Flächenmodell von der Mittelebene einer Struktur mit einem Gewicht belegt wird, aus diesem Grund kann im Falle unseres Projektes nur eine Vorbemessung erfolgen. Mit den oben genannten alternativen Programmen ist es möglich, die notwendige Genauigkeit einer tatsächlichen Bemessung durch die Verwendung von Volumenkörpern und die Simulation der Vorspannung zu erreichen.

Vorhandene Versuche des Materials Ceracem, zur Verfügung gestellt vom Labor für konstruktiven Ingenieurbau (LKI) der TU-Graz, dienen als Grundlage für die Berechnungen.

14. Berechnungsmodell - Transformation

Bevor wir näher auf die Berechnungsschritte und deren Ergebnisse eingehen, möchten wir auf den folgenden Seiten jene Schritte erläutern, die einen Datenaustausch zwischen den Programmen Rhinoceros und RFEM ermöglichen.

Um den angestrebten Datentransfer durchzuführen muss man zunächst wissen, dass das RFEM nicht mit Volumenkörpern arbeiten kann, sondern „nur“ die Mittelfläche einer Struktur mit einem Gewicht belegt. Daher bestand der erste Schritt darin, diese Mittelfläche im Rhinoceros zu generieren. Leider mussten wir schnell feststellen, dass ein Export ins RFEM zwar bei geraden Flächen kein Problem darstellt, bei stark gekrümmten Flächen stößt das Programm jedoch an seine Grenzen und ein „Haufen“ zerteilter und verschobener Einzelflächen im RFEM stellt keine brauchbare Berechnungsgrundlage dar. Aus diesem Grund entschlossen wir uns, aus der vorhandenen Mittelfläche einzelne Linien zu generieren, die nach erfolgreichem Export und Import weiterbearbeitet werden konnten. Die Aufteilung der Linien über die Gesamtstruktur bildete hierbei die Form von gleichmäßig verteilten Dreiecken, da diese ein einfaches geometrisches Mittel zur Nachbildung von Krümmungen darstellen und das RFEM die Bildung von Dreiecksflächen bevorzugt. Außerdem unterstützen Dreiecksflächen möglichst gleichmäßige Lastverteilungen an der Gesamtstruktur, was für die Berechnungsgenauigkeit spricht. Um die einzelnen Linien der Dreiecke zu zeichnen, behelfen wir uns mit einer Umwandlung der U und V Linien des Flächenmodells in Splinekurven, die uns im Anschluss als Hilfslinien zur Verfügung standen.

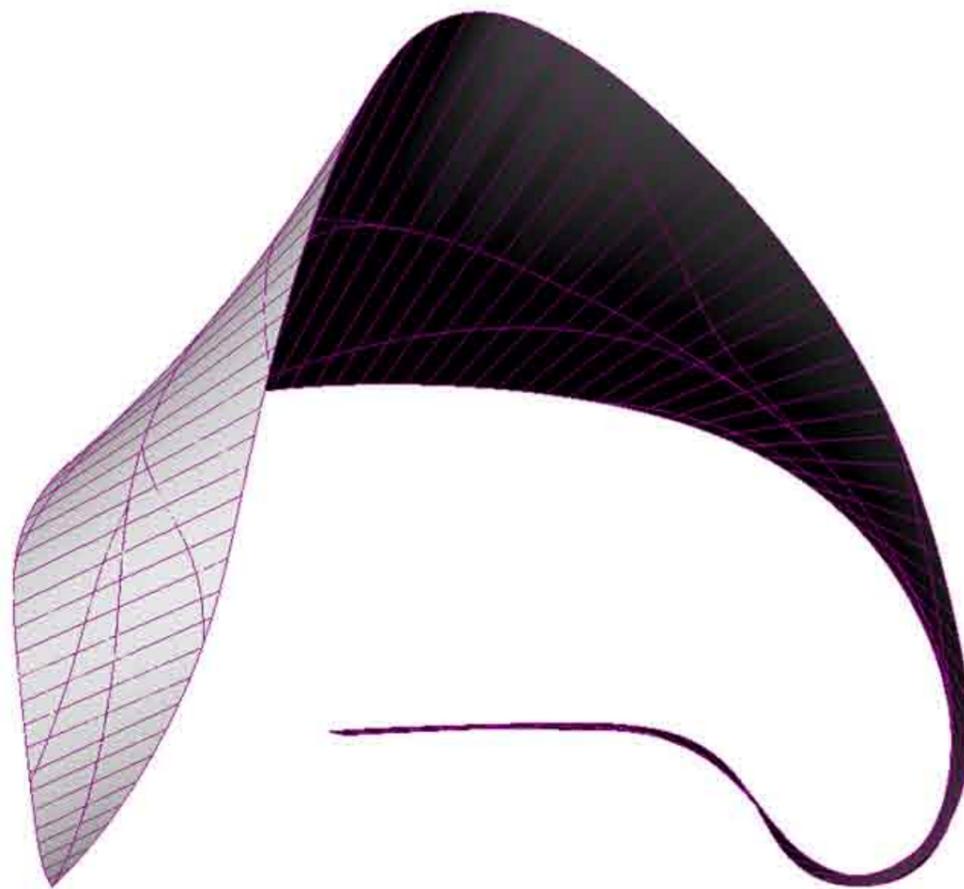


Abb. 1: Seitenansicht Flächenmodell mit U und V Linien

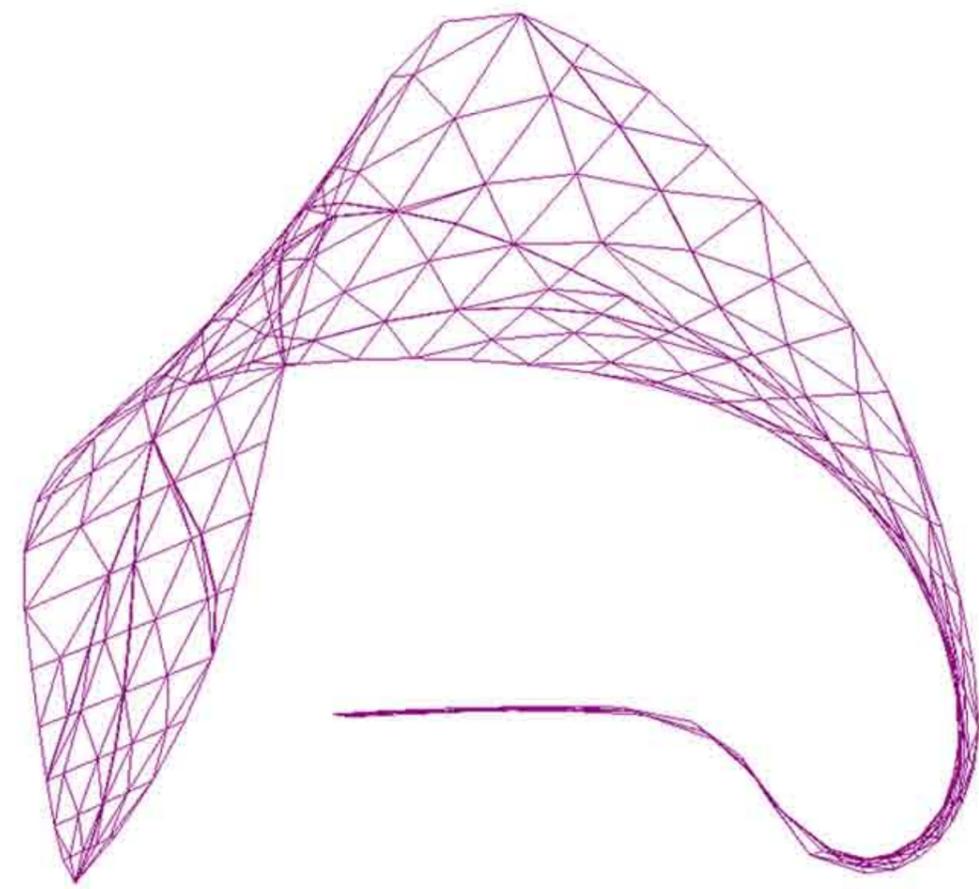


Abb. 2: Seitenansicht Linienmodell bestehend aus gleichm. verteilten Dreiecksfeldern

Anmerkung:

U und V Linien eines 3-D Objekts sind für das geometrische Auftreten desselben verantwortlich. Aus diesen Linien definiert sich in unserem Beispiel das Polygonnetz bzw. die Freiformfläche als Ganzes. Im Rhinoceros ist es zudem möglich, bei einem bereits bestehenden Flächenmodell U u. V-Linien umzuwandeln, um zusätzliche „echte Linien“ zu erhalten, mit denen man daraufhin weiter arbeiten kann.

14. Berechnungsmodell - Transformation

Um die einzelnen Segmente unseres Gebildes zu verbinden und um die auftretenden Zugkräfte abzuleiten werden diese, wie bereits in der Systemklärung beschrieben, miteinander durch im Inneren der Segmente verlaufende Seile verspannt.

Um zu überprüfen, ob die Verbindungskonstruktion funktioniert, benötigen wir die max. auftretenden Kräfte in den Fugen bzw. an den Stellen wo die Seile gespannt werden, was uns zu einer Art geometrischen Vorbemessung führt, weil für das Einzeichnen der Seile, deren Anzahl und die Abstände zueinander angenommen werden müssen. Wir wählten vier Seile pro Segment, da hierbei das Einzugsgebiet der Lastaufnahme über eine Breite von ca. 20 cm und der Zugkraft eines Verbindungssystems von 30 kN als ausreichend angenommen wurde.

Nun galt es die Seile zunächst im Flächenmodell einzuzichnen, um eine genaue Verteilung zu garantieren. Besonderes Augenmerk galt dem Versatz bzw. der Positionierung der Linien von Segment zu Segment, da durch unser verwendetes System das Endstück eines Seils von einem Segment immer mittig zwischen den Anfangsstücken des nächsten Segments positioniert ist. Um die Linien zu generieren, kamen uns wieder die U u. V Linien zugute, da wir diese „nur“ auf die Breite der Gesamtstruktur hin unterteilen mussten, damit sie dann im Anschluss auf das jeweilige Segment inkl. einem Überstand getrimmt werden konnten. Das Ergebnis dieses Prozederes ist in Abb. 1 zu sehen (violett).

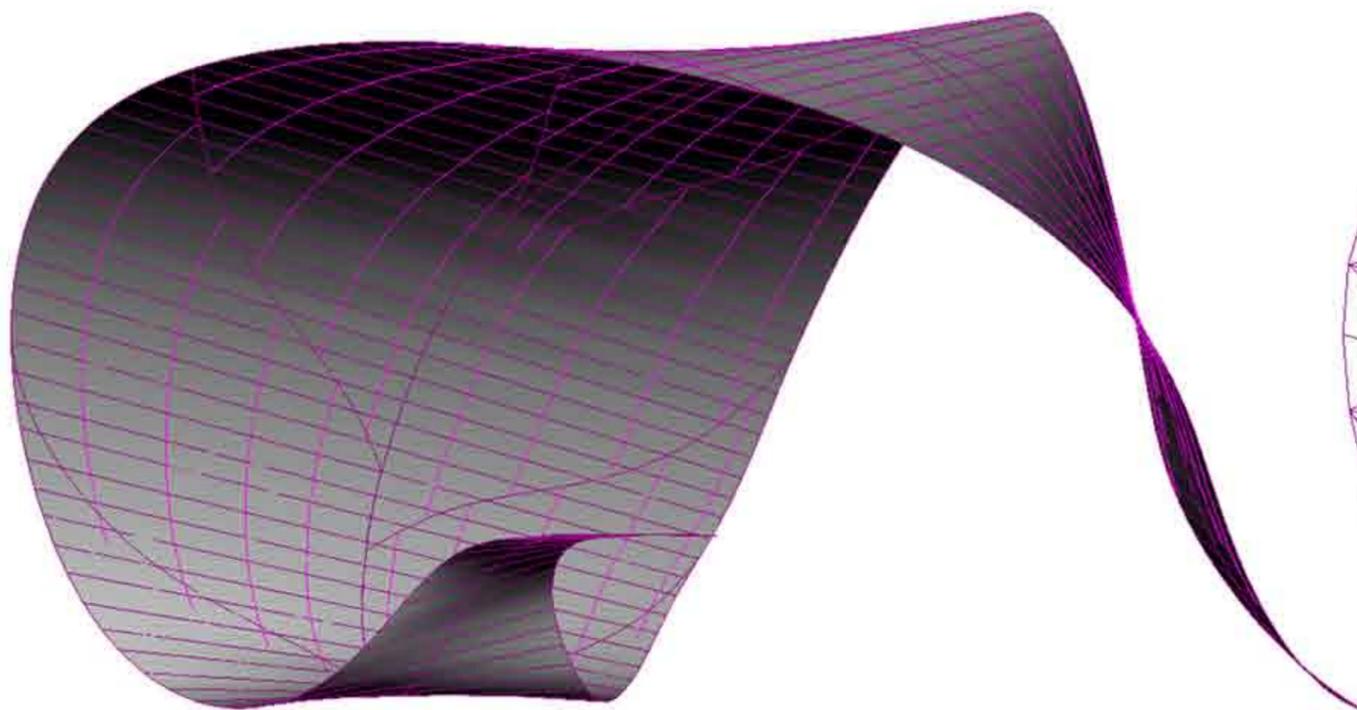


Abb. 1: Ansicht des Flächenmodells inkl. Seilführungen

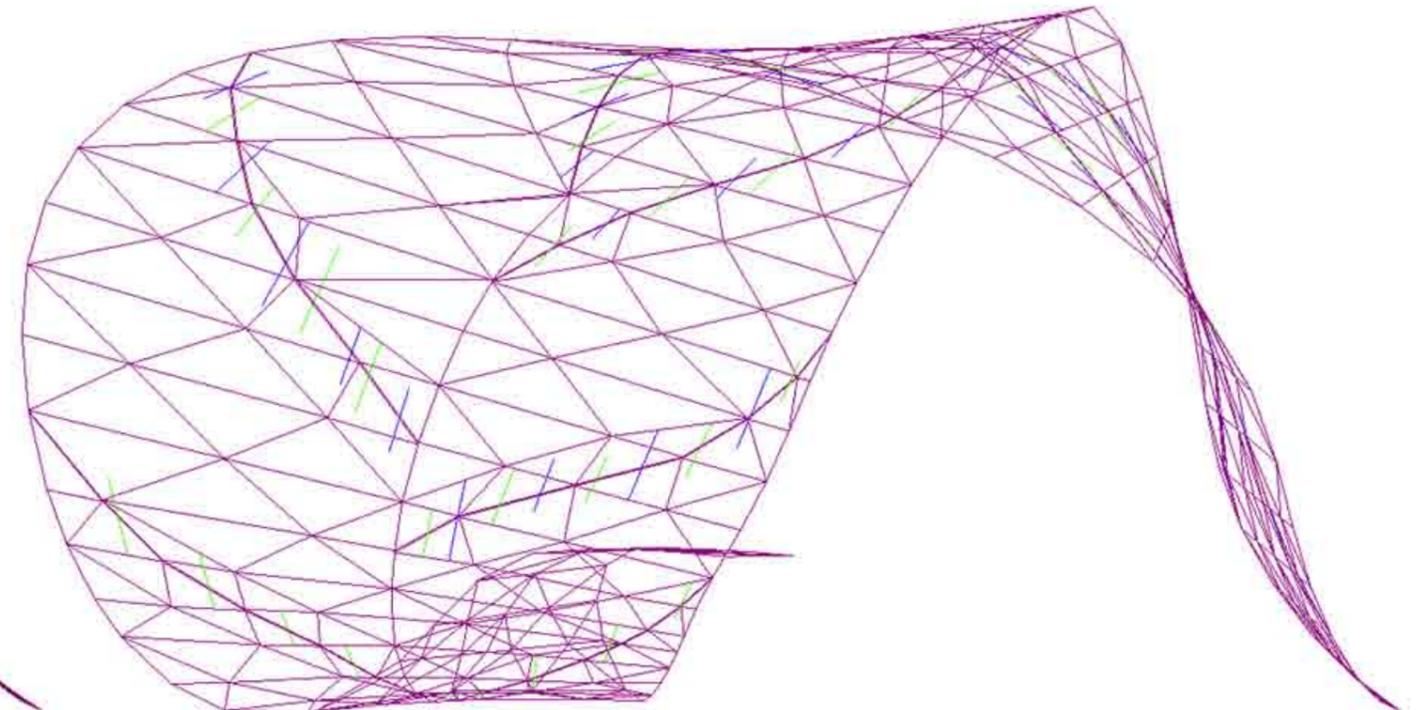


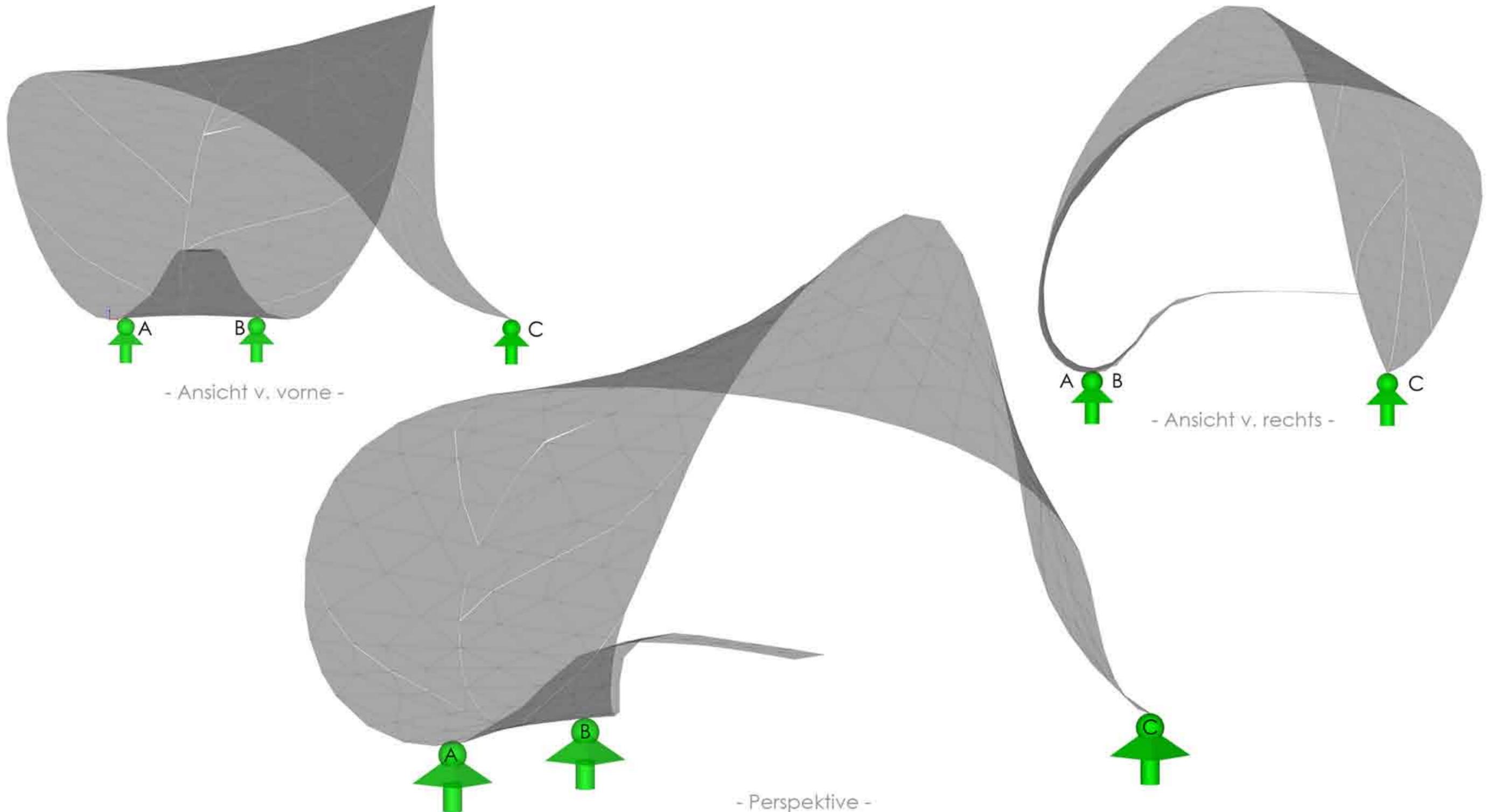
Abb. 2: Ansicht des Linienmodells inkl. Positionsbestimmungslinien

Im nächsten Schritt transportierten wir die entstandenen Spline - Linien in das Linienmodell (Abb. 2), um die genauen Positionen an den Stoßfugen zu erhalten. Nun konnten wir einzelne gerade Linien an genau jenen Stellen positionieren, an denen sich unser Verbindungssystem und die damit auftretenden Kräfte befinden werden. Um die Orientierung beim Zeichnen und die Zugehörigkeit von Anfangs- u. Endpunkt einer jeden Linie zu erhalten, wurden die Linien in separaten Farben eingefärbt.

Durch das Kennen der Position der auftretenden Lasten im RFEM kann in weiterer Folge ein Schnitt an genau jener Position (definiert durch die Endpunkte der einzelnen Linien) gelegt oder ein Stab eingesetzt werden, anhand dessen die auftretenden Kräfte dargestellt werden können und somit eine genaue Bemessung der einzelnen Komponenten ermöglicht wird.

14. Berechnungsmodell - RFEM - Import und Flächengenerierung

Zu erkennen ist das importierte Linienmodell im RFEM. Mittels einem dxf - file gelang, wie bereits beschrieben, ein Datentransfer zwischen den Programmen Rhinoceros und RFEM. Da nur Linien und keine Flächen oder Volumenkörper transferiert werden konnten, mussten aus den einzelnen Linien separate Dreiecksflächen im RFEM generiert werden, die man im Anschluss segmentweise gruppieren konnte. Im Anschluss wurden die drei Auflager an der Gesamtstruktur angebracht, um in weiterer Folge die Lasten, die von den Fundamenten aufgenommen werden müssen, auszuwerten.



14. Berechnungsmodell - RFEM - Lastbild

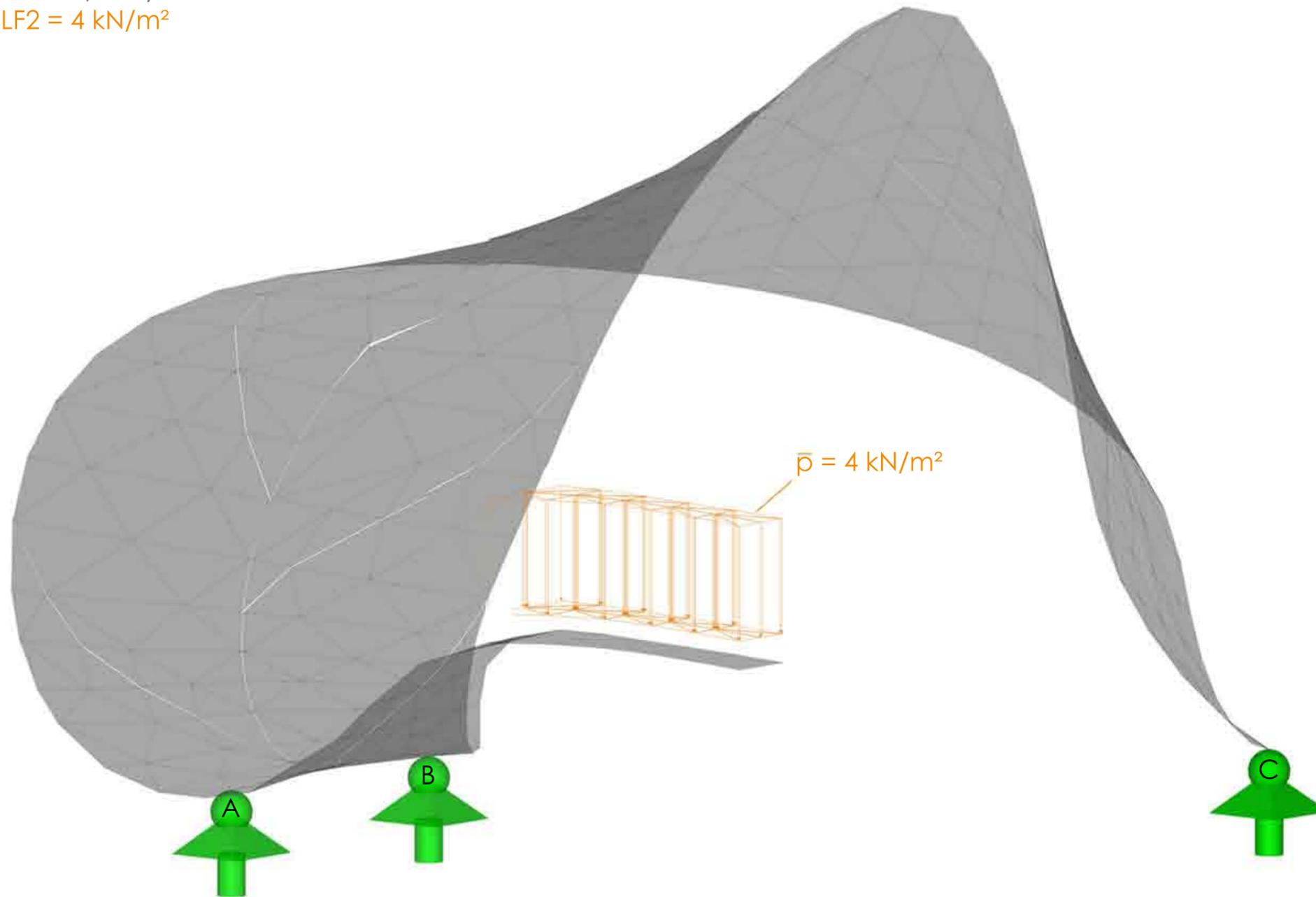
Das concrete leaf wird von folgenden Lastfällen beansprucht:

Lastfall 1 (LF1): Eigengewicht (Gesamtobjekt) & Lastfall 2 (LF2): Nutzlast (Kragarm); Gesamtfall = LF1 + LF2

Aufgrund der verwundenen Struktur des Objektes ist anzunehmen, dass Schnee im Falle eines Niederschlags nicht auf der Überdachung verbleibt, weswegen der im Normalfall anzuwendende Lastfall Schnee vernachlässigt werden kann.

LF1 = 1,4 kN/m²

LF2 = 4 kN/m²



- Perspektive -

Lastfall 1 (LF1): Eigengewicht

$$\bar{g} = \gamma \times d$$

\bar{g} ... Flächenlast (kN/m²)

γ ... Wichte (kN/m³)

d ... Dicke (m)

$$\gamma = 28 \text{ kN/m}^3, d = 0,05 \text{ m}$$

$$\gamma = 28 \text{ kN/m}^3 \times 0,05 \text{ m}$$

$$\gamma = 1,4 \text{ kN/m}^2$$

Das Eigengewicht der Freiform aus UHFB beträgt 1,4 kN/m² bzw. 140 kg/m².

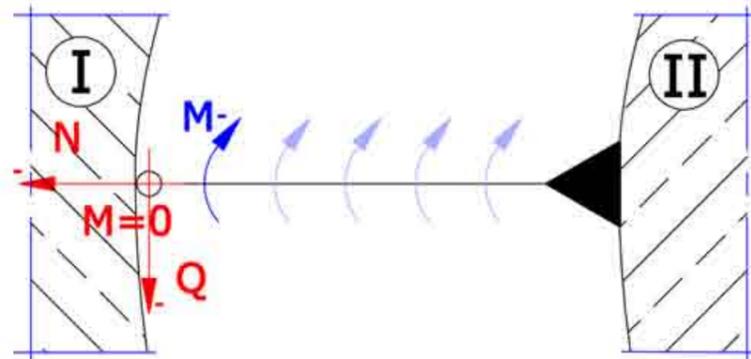
Lastfall 2 (LF2): Nutzlast

Die Nutzlast, welche in Form von Belastung durch mehrere (sitzende oder stehende) Personen am Kragarm auftritt, wurde mit $\bar{p} = 4 \text{ kN/m}^2$ (400 kg/m²) angenommen. Dieser relativ hohe Wert erklärt sich dadurch, dass mit einer maximalen Belastung des Kragarms gerechnet werden muss, um Unfälle (z.B. Bruch des Kragarms aufgrund zu hoher Belastung) tunlichst zu vermeiden.

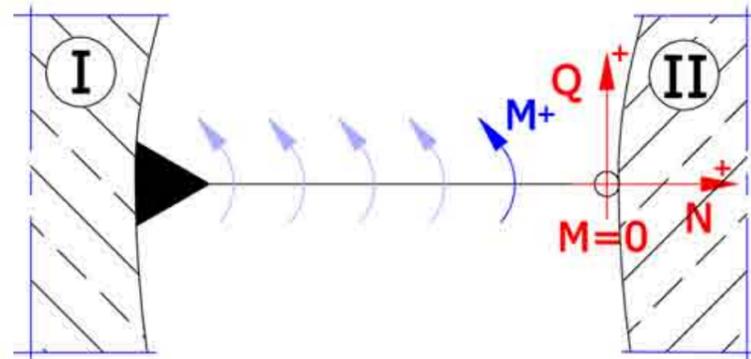
14. Berechnungsmodell - RFEM - Kopplungsstäbe zur Ergebnisauswertung

Um eine Bemessung für die Verbindungselemente zwischen den einzelnen Segmenten durchzuführen musste dessen Positionierung, wie bereits beschrieben, anhand von einzelnen Linien eingezeichnet werden, um nun folgenden „Trick“ anzuwenden: Da ein Schnitt bei gekrümmten Flächen keine brauchbaren Ergebnisse liefern kann, weil man die Länge, Abstände und genaue Position des Schnitts und der einwirkenden Kräfte in diesem Bereich nicht vordefinieren kann, haben wir einen Kopplungsstab in der Fuge zwischen den Punkten der eingezeichneten Position eingefügt, anhand dem man problemlos, nach dem Durchführen des Berechnungsvorgangs, die Werte ablesen kann. Diesen Schritt haben wir an allen Stellen, wo es eine Verbindung gibt, angewendet und sind zu dem Ergebnis gekommen, dass die maximal auftretende Zugkraft aller Kopplungsstäbe unter Einwirkung aller Lasten 30 kN und die maximal auftretende Druckkraft 23 kN beträgt.

Möglichkeiten zur Kopplung zweier Tragwerksscheiben:



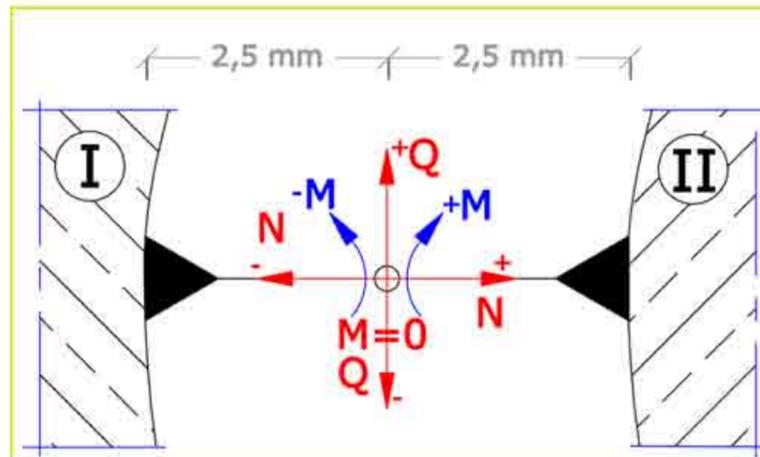
In beiden Fällen entsteht ein Moment entlang des Stabs bis hin zum Gelenk. Das Gelenk kann dieses Moment zwar nicht auf den anschließenden Bauteil übertragen, in die errechneten Ergebnisse würden jedoch die Momente integriert werden und ein verfälschtes Ergebnis wäre die Folge.



Da es sich hierbei um eine Pendelstütze handelt, können nur Normalkräfte, also jene entlang der Stabachse vorherrschende Kräfte, vom Bauteil I zu Bauteil II weitergeleitet werden.

Dieses System würde sich nur dann als Kopplung eignen, wenn es keine Momente von einem auf den anderen Bauteil übertragen würde. Da die Momentübertragung in real gebautem Zustand eben nicht möglich ist, kann auch dieses System nicht verwendet werden.

gewähltes System



In diesem Fall wird eine Kombination aus zwei Stäben verwendet, die es ermöglicht, die Zug- und Druckkräfte darzustellen. Da die auftretenden Momente nicht übertragen werden können, weil sich in der Mitte ein Gelenk befindet und der Kombinationsfall eine symmetrische Ausbildung darstellt, kann hierbei von einem korrekten Kopplungszustand ausgegangen werden.

14. Berechnungsmodell - RFEM - Ergebnisauswertung der Kopplungsstäbe unter ULS (Tragfähigkeitsnachweis)

Der Tragfähigkeitsnachweis des Objektes kann nur mithilfe von Teilsicherheitsbeiwerten (γ_f) erfolgen, um eventuelle Streuungen der Lasten abzudecken.

Teilsicherheitsbeiwerte Tragfähigkeitsnachweis (ULS):

Eigengewicht (=ständige Last): $\gamma_f = 1,35$ Nutzlast (=veränderliche Last): $\gamma_f = 1,5$

Nach Eingabe der erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte im RFEM konnten die Werte der Kopplungsstäbe unter Beanspruchung des Gesamtlastfalls ausgegeben werden. Der Maximalwert für druckbelastete Bauteile beträgt 23 kN und für zugbelastete Bauteile 30 kN.

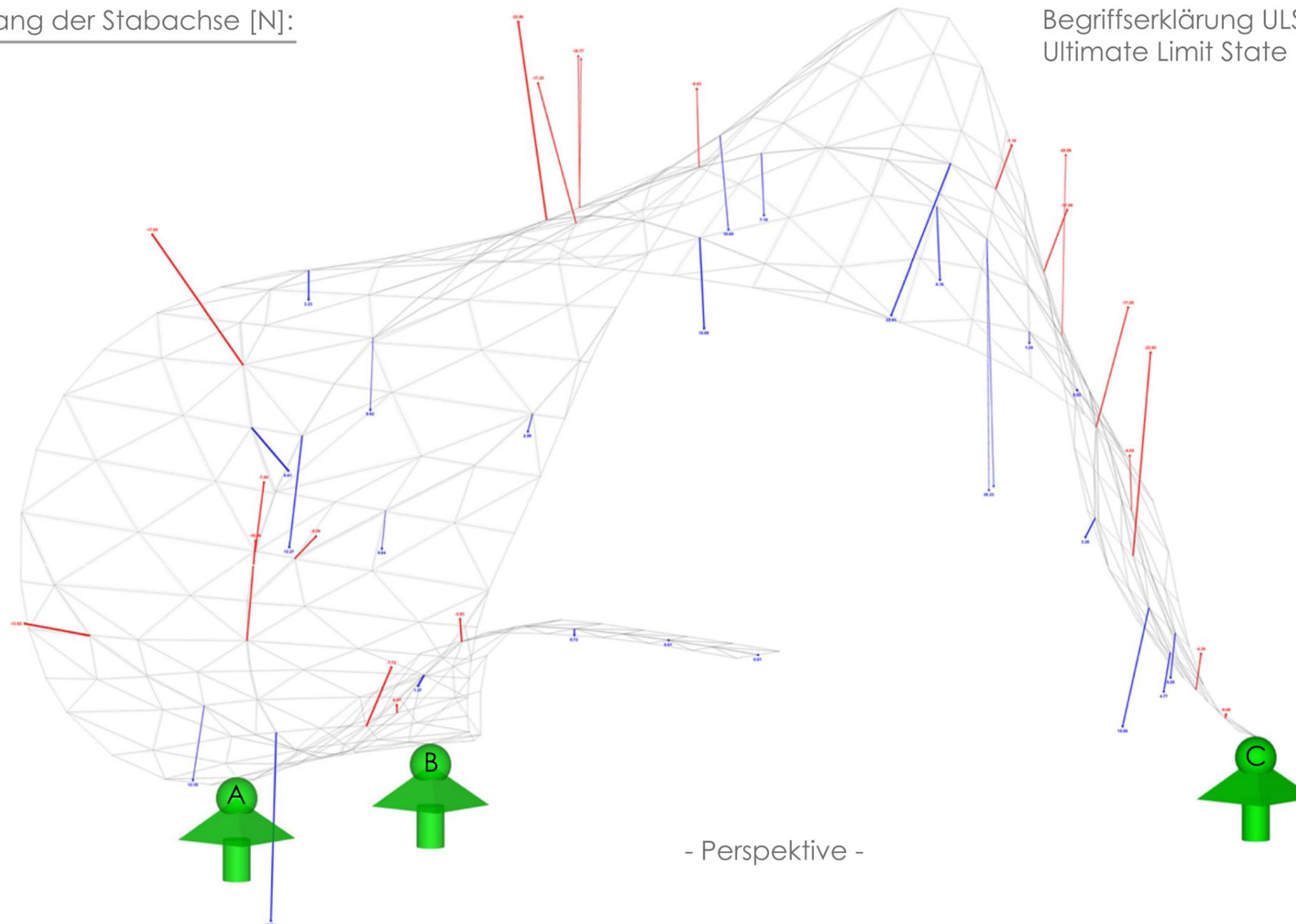
In der unteren Darstellung sind die Kopplungsstäbe im RFEM dargestellt, wobei zugbelastete Bauteile als blaue und druckbelastete als rote Linien erkennbar sind. Die Größe der Kräfte wird in der Grafik proportional zum Wert als Länge dargestellt. Bei den Werten handelt es sich um die Normalkräfte [N] in den Stäben.

Schnittgrößen entlang der Stabachse [N]:

-  Zugstab
-  Druckstab

Begriffserklärung ULS:

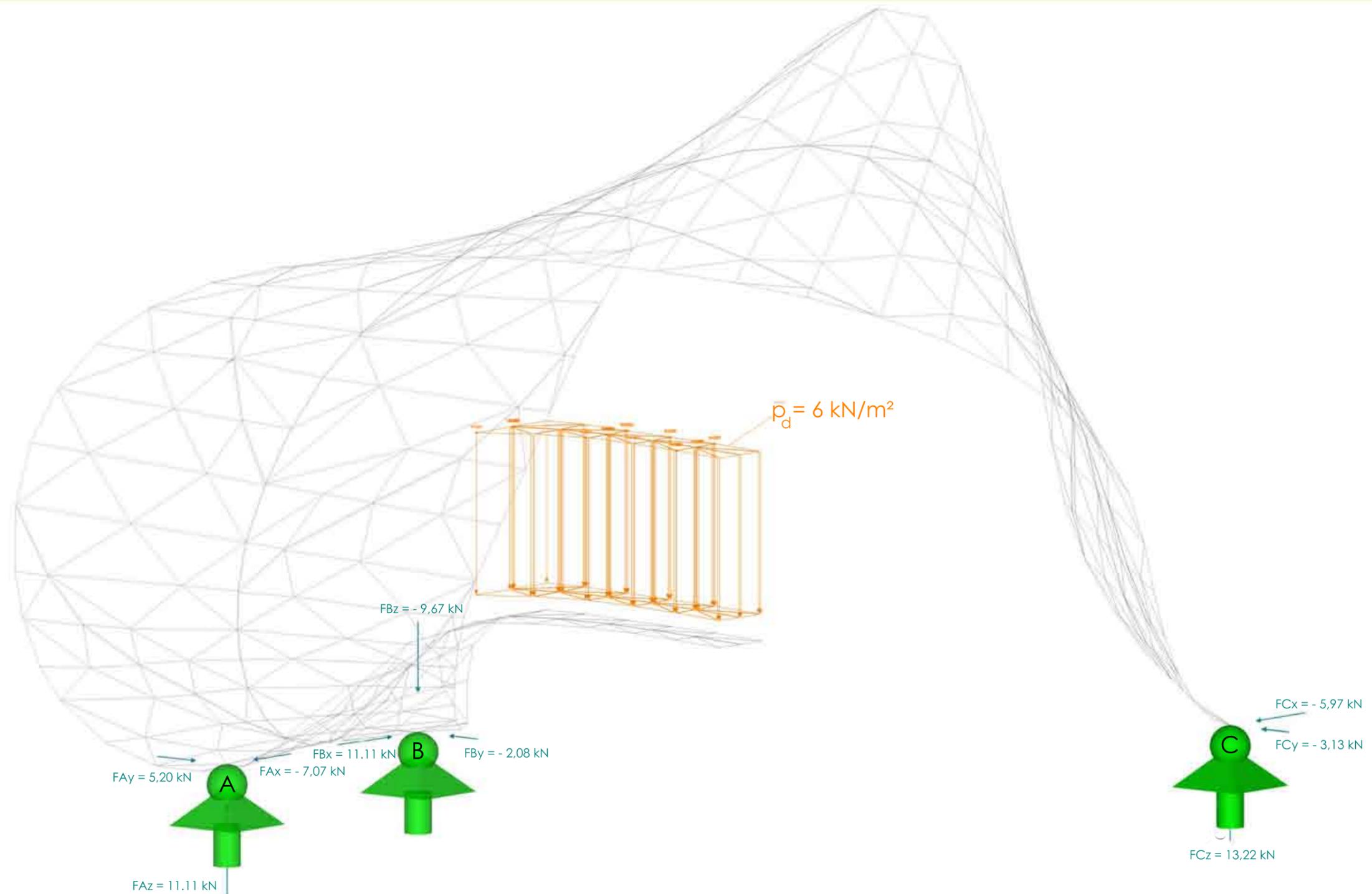
Ultimate Limit State = Grenzzustand der Tragfähigkeit



14. Berechnungsmodell - RFEM - Ergebnisauswertung der Auflager unter ULS (Tragfähigkeitsnachweis)

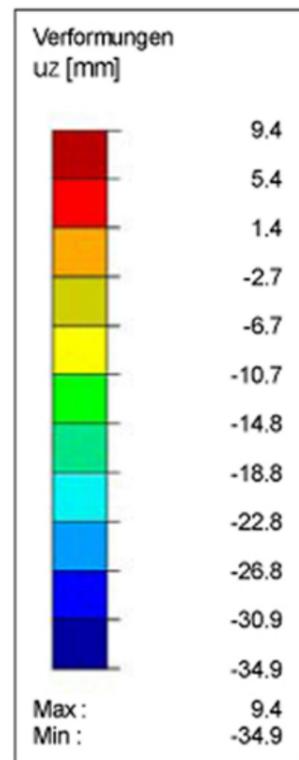
In der unteren Grafik sind die Ergebnisse der Auflagerreaktionen unter ULS dargestellt. Aufgrund der Erkenntnisse der erfolgten Berechnungen können Schlussfolgerungen im Bezug auf die Ausführung der Auflager getroffen werden.

Die Darstellung lässt erkennen, dass das Auflager B unter den Lastfallkombinationen LF1 und LF2 Auftrieb bekommt, weshalb entsprechende Eingriffe hinsichtlich der Ausführung des Fundaments getroffen werden müssen, um dieses Aufsteigen zu unterbinden. Die Maßnahme, das Fundament als Pfahl (fünf bis sechs Meter Tiefe) mit ausreichender Gewichtskraft auszuführen, kann das Auftreiben der Form verhindern. Die genauen Abmaße sowie die Ausführung der Fundamente bzw. der Anschlussdetails zwischen dem concrete leaf und den Pfählen können den nachfolgenden Seiten entnommen werden.

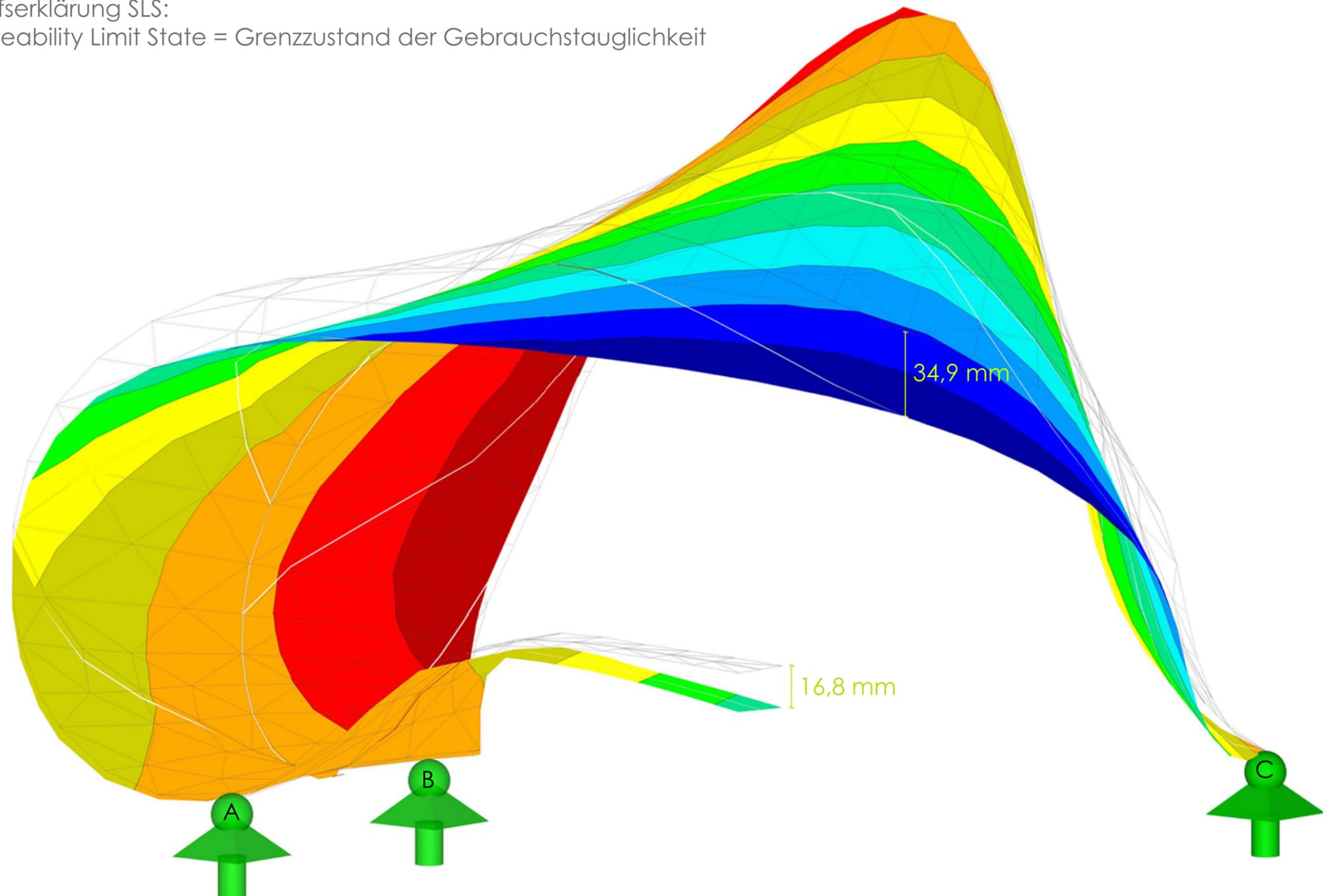


14. Berechnungsmodell - RFEM - Ergebnisauswertung des Verformungsdiagramms unter SLS (Gebrauchstauglichkeitsnachweis)

Die nachfolgende Darstellung zeigt die Veränderung der Form im Belastungsfall. Der Vergleich von der Ursprungsstruktur (graue Darstellung) und der verformten Struktur (färbige Darstellung) darf nicht maßstäblich betrachtet werden, da er nur zur Veranschaulichung des Unterschieds dient. Im Falle eines Gebrauchstauglichkeitsnachweises sind die Teilsicherheitsbeiwerte der Lastfälle LF1 und LF2 mit $\gamma_g = 1$ anzunehmen. Aus den berechneten Ergebnissen lässt sich eine maximale Strukturverformung von 3,5 cm ablesen, die durch die Flexibilität der Verbindungen der Formsegmente aufgenommen werden kann.

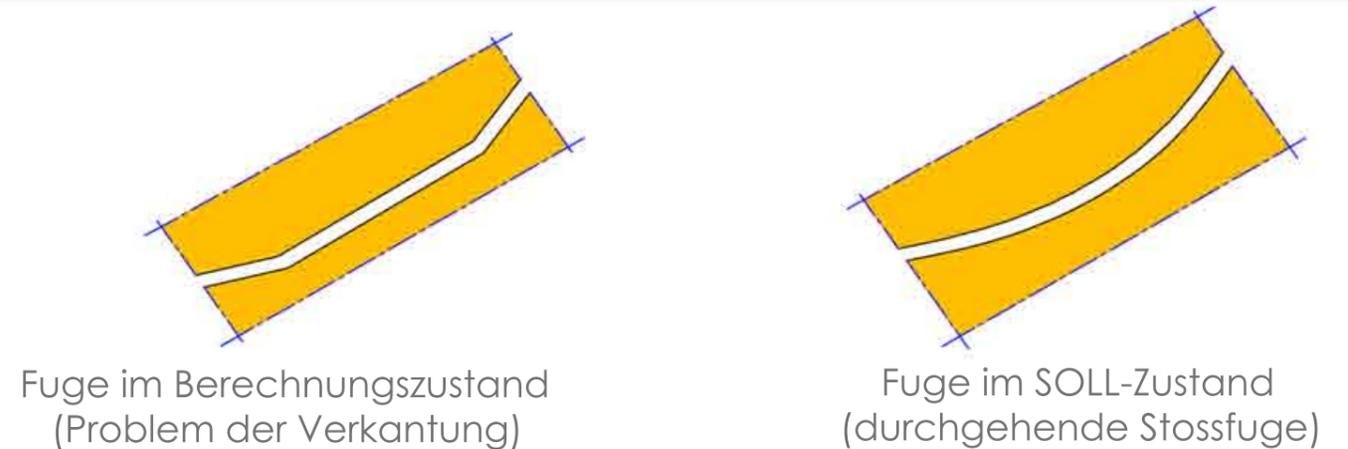
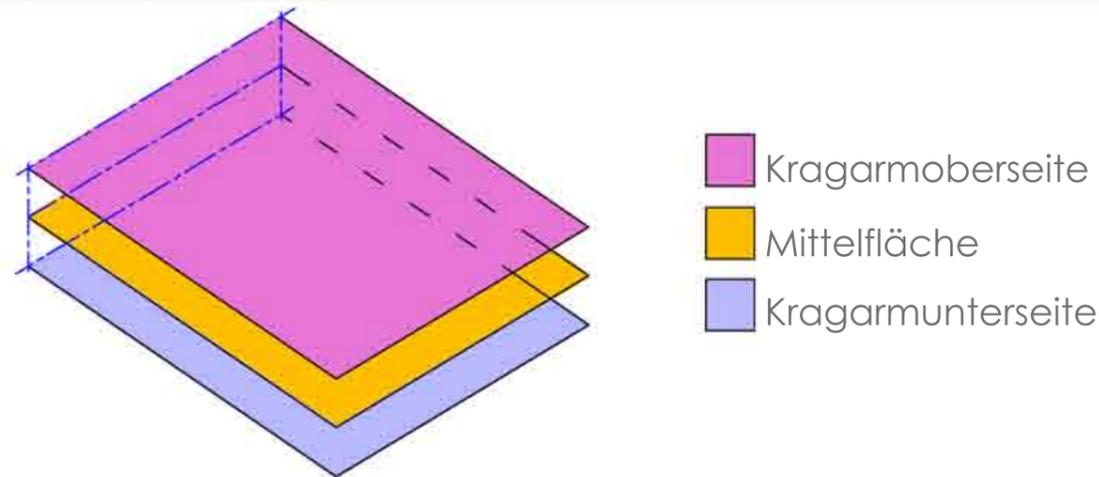


Begriffserklärung SLS:
Serviceability Limit State = Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit



14. Berechnungsmodell - RFEM - Ergebnisauswertung der Spannungen unter ULS

Auf den folgenden Seiten werden die verschiedenen Spannungszustände unter ULS dargestellt. Da das Statikprogramm RFEM immer mit einer Mittel­fläche rechnet und dieser ein Gewicht zugeordnet wird, anstatt mit einem vollständigen Volumenkörper zu rechnen, werden vom tatsächlichen Gebilde die maximalen Zug- und Druckwerte jeweils von der Ober- bzw. Unterseite dargestellt. Da sich das Koordinatensystem der einzelnen Dreiecksflächen, aus denen die gezeichnete Mittelebene besteht, je nach Orientierung, Lage und Winkel verändert, weil sich die Z - Achse der Flächen immer im rechten Winkel zu dieser ausrichtet, verändert sich auch die Bezeichnung Ober- und Unterseite. Als Oberseite bestimmen wir hiermit die obere Fläche des Kragarms (Sitzfläche).



Problem der Verkantung:

Um die Daten vom Rhinoceros in das RFEM zu importieren, mussten wir die Flächen und Fugen als Dreiecke generieren, da sogenannte Splines im RFEM nicht verarbeitet werden können. Das Problem, welches sich nun ergibt ist jenes, dass das Statikprogramm das Aufeinandertreffen einiger Ecken die bei manchen Fugen auftreten, als Verkantung wahrnimmt, wodurch es zu Spannungsspitzen kommt. Da im SOLL-Zustand aber weiche Rundungen mit durchgehenden Stossfugen vorhanden sind, können die Spannungsspitzen an diesen Stellen als nichtig bezeichnet werden. Weiters soll in den Fugen eine Neopren/Gummi-Schicht für einen Ausgleich von eventuellen Unebenheiten sorgen und Regendichtheit garantieren. Es ist nochmals zu erwähnen, dass für eine echte Bemessung empfohlen wird, die Berechnung mit einem FE-Statik-Programm, welches Volumenkörper verarbeiten kann, zu wiederholen, da hierbei genauere Ergebnisse zu erwarten sind. Die errechneten Werte mit dem RFEM können aber durchaus für eine Vorbemessung verwendet werden.

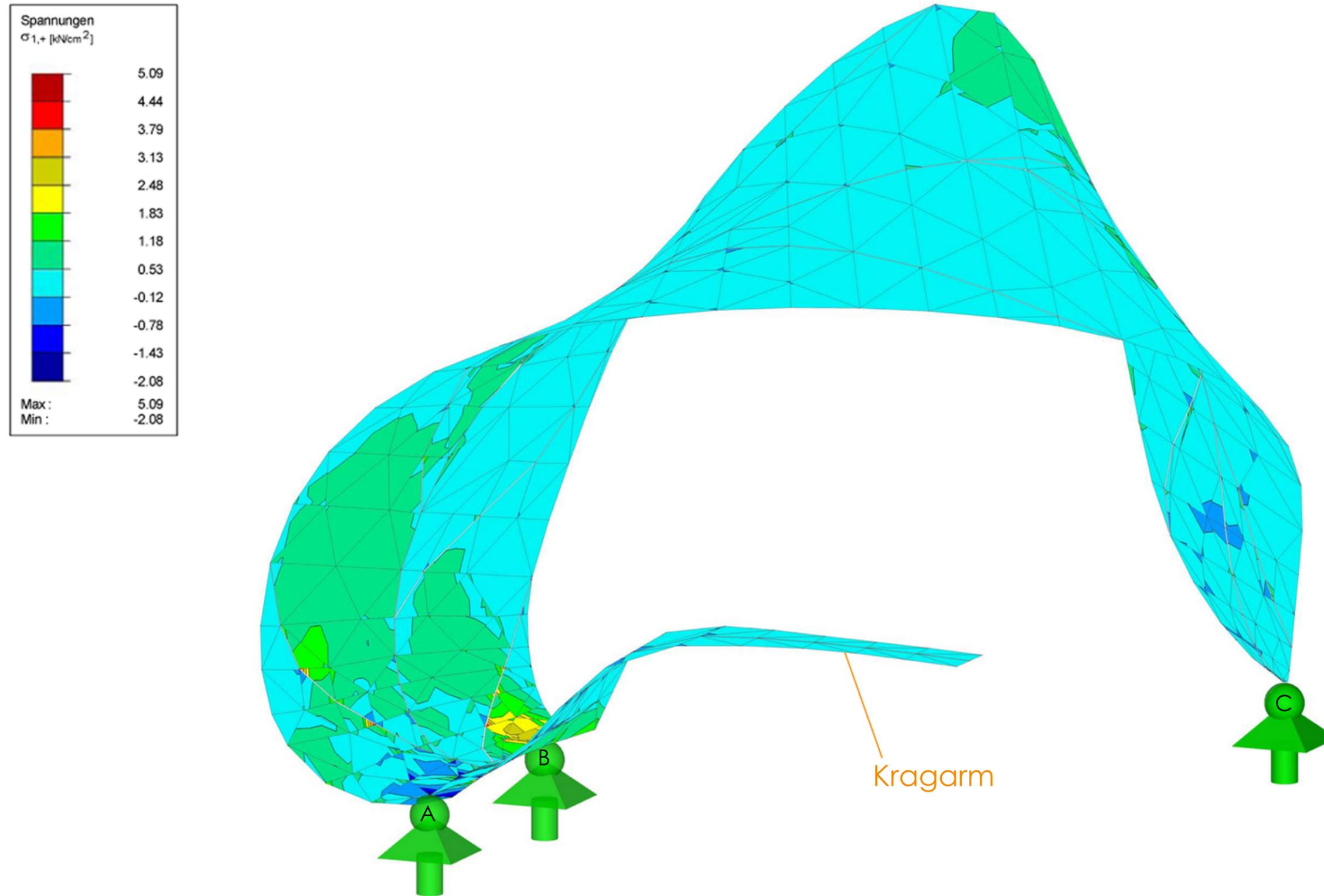
Spannungszustände:

Generell ist von niedrigen Spannungswerten bzw. Spannungsergebnissen der einzelnen Segmente auszugehen, da in der Berechnung die Vorspannung nicht berücksichtigt wurde. Untenstehend stellen wir die max. Zug- u. Druckwerte dar, damit ein Vergleich mit den nachfolgenden Darstellungen ermöglicht wird.

$$\text{Designwert der Druckfestigkeit } f_{cd} : f_{cd} = \frac{\text{mittl. Würfeldruckfestigkeit } f_{cm} \times \text{Umrechnungsfaktor auf die charakt. Druckfestigkeit} \times \text{Umrechnungsfaktor auf die zyl. Druckfestigkeit (Zyl. d=150 h=300)}}{\text{Teilsicherheitsbeiwert}} \quad f_{cd} = \frac{20 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 0,9 \times 0,84}{1,5} \quad \underline{f_{cd} = 10,08 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}$$

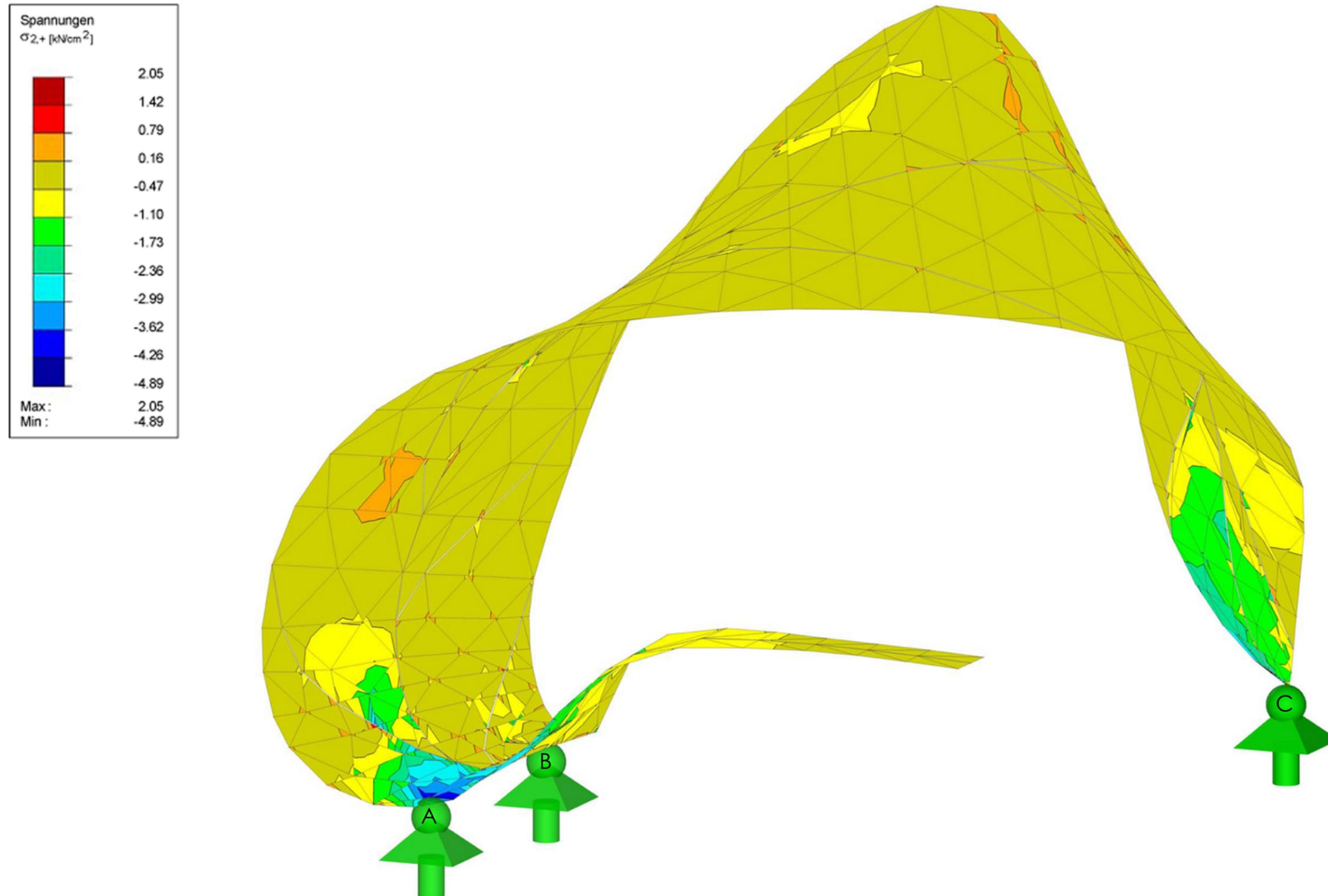
$$\text{Designwert der Biegezugfestigkeit } f_{ctd} : f_{ctd} = \frac{\text{mittl. zentrische Zugfestigkeit } f_{ctm} \times \text{Umrechnungsfaktor auf die Biegezugfestigkeit}}{\text{Teilsicherheitsbeiwert}} \quad f_{ctd} = \frac{0,8 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 2}{1,5} \quad \underline{f_{ctd} = 1,07 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}$$

14. Berechnungsmodell - RFEM - Ergebnisauswertung der Spannungen unter ULS Darstellung der Spannungen an der Kragarmunterseite mit max. Zugwerten und min. Druckwerten



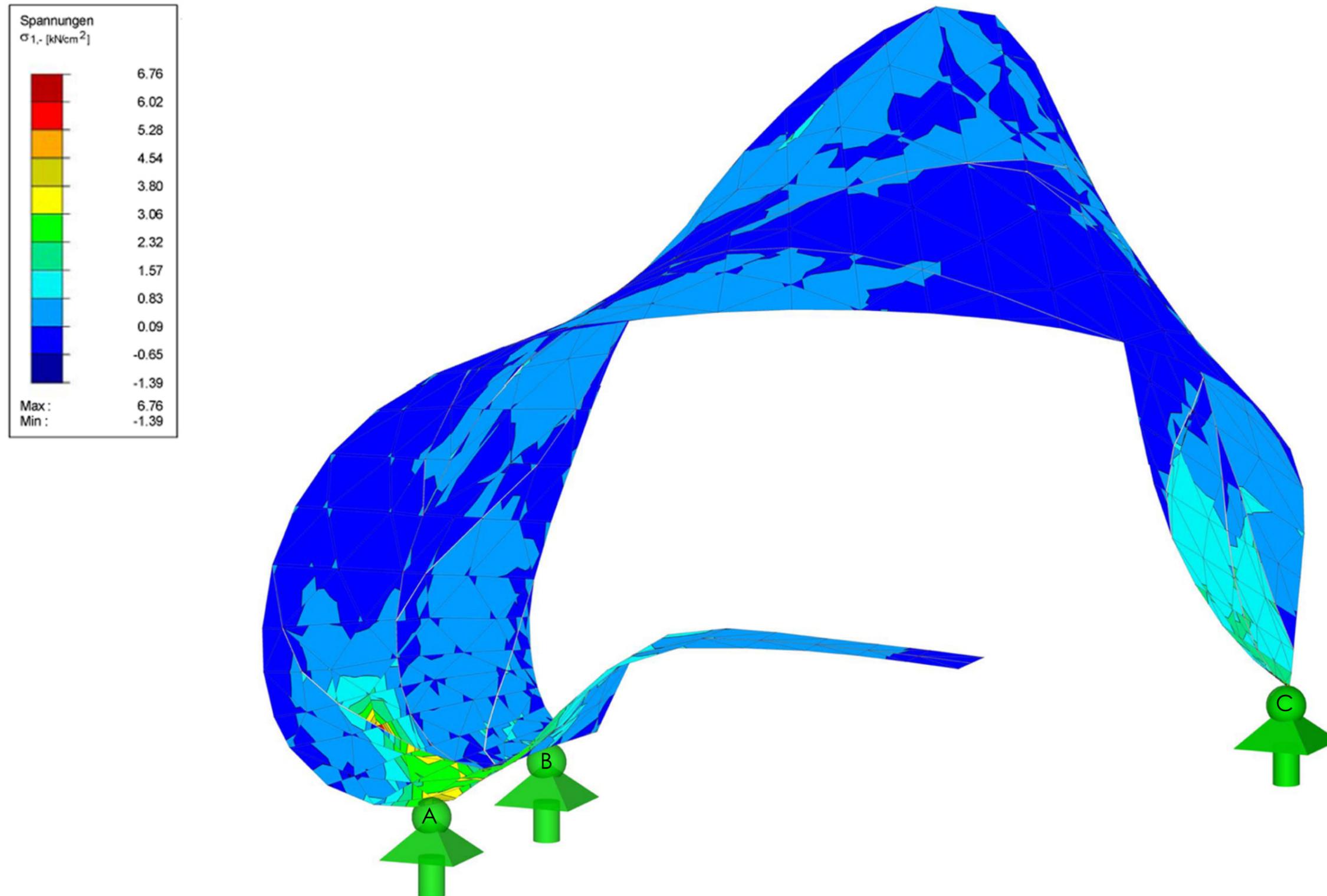
+ Zugspannungen - Druckspannungen

14. Berechnungsmodell - RFEM - Ergebnisauswertung der Spannungen unter ULS
Darstellung der Spannungen an der Kragarmunterseite mit max. Druckwerten und min. Zugwerten



+ Zugspannungen - Druckspannungen

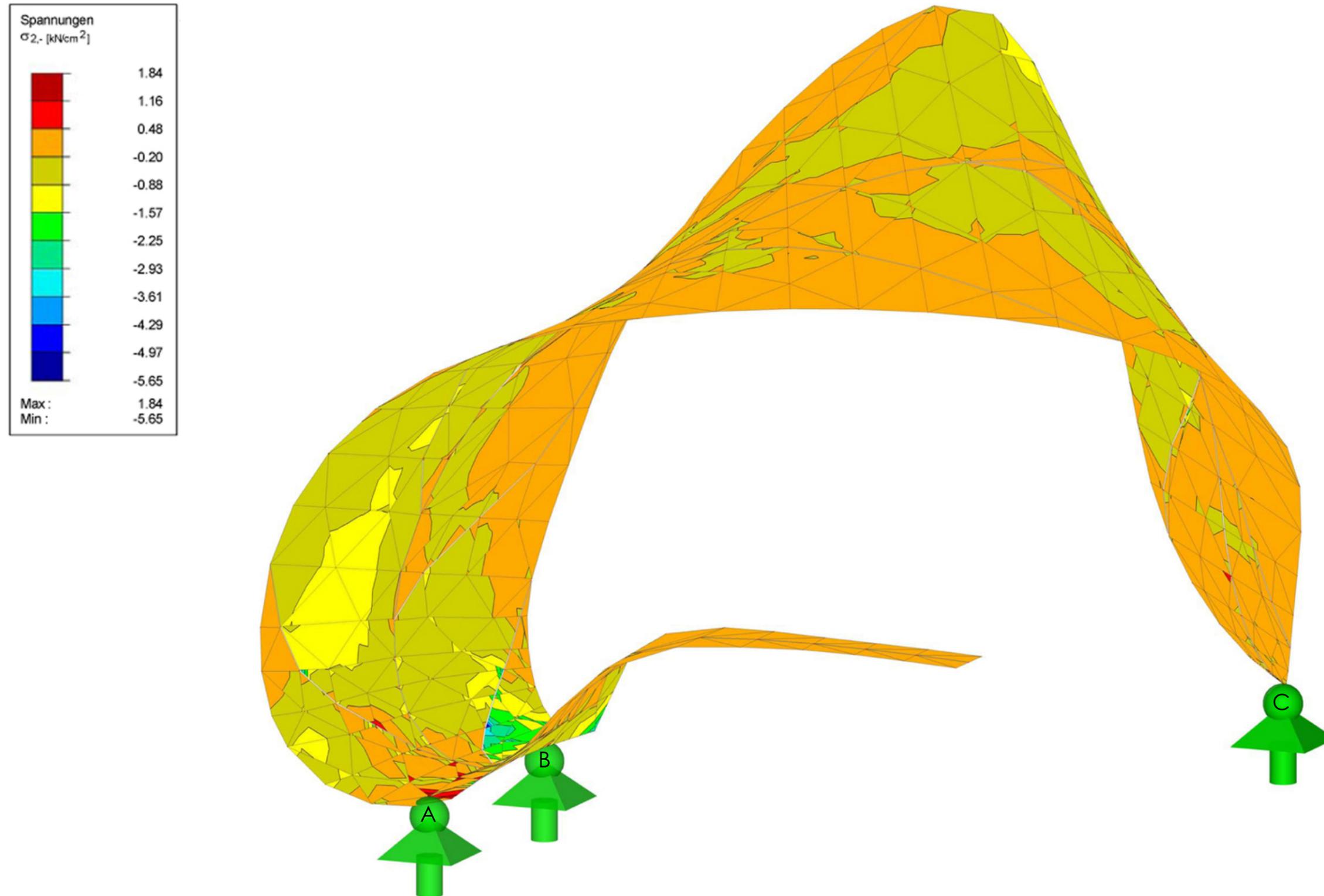
14. Berechnungsmodell - RFEM - Ergebnisauswertung der Spannungen unter ULS
Darstellung der Spannungen an der Kragarmoberseite mit max. Zugwerten und min. Druckwerten



⊕ Zugspannungen ⊖ Druckspannungen

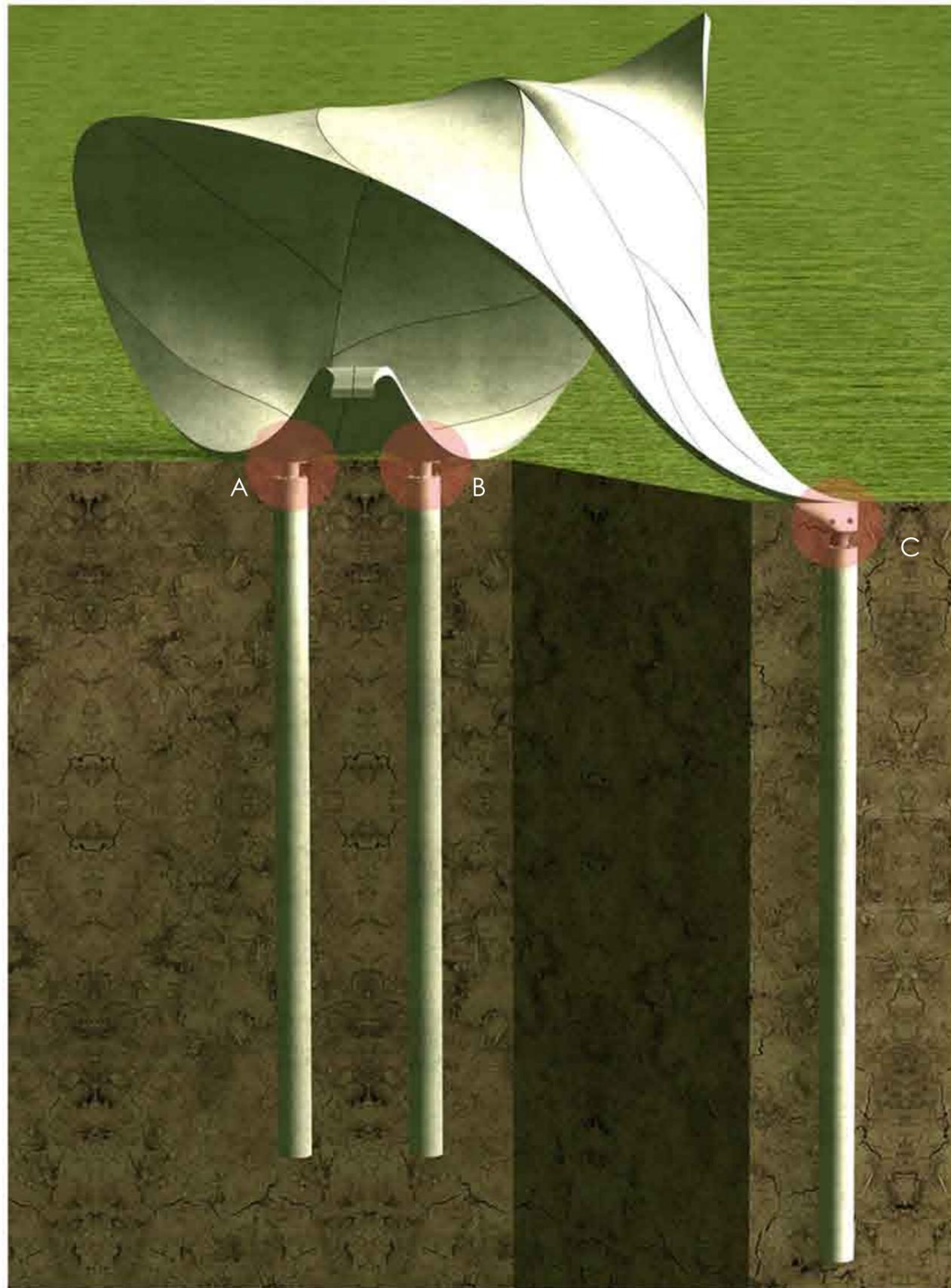
14. Berechnungsmodell - RFEM - Ergebnisauswertung der Spannungen unter ULS

Darstellung der Spannungen an der Kragarmoberseite mit max. Druckwerten und min. Zugwerten



+ Zugspannungen - Druckspannungen

15. Erkenntnisse der Berechnung - Fundamente



In den bisherigen Vorbemessungen mit dem Statikprogramm RFEM hat sich gezeigt, dass in Z-Richtung auf das Auflager A 11,11 kN, auf das Auflager B -9,67 kN und auf das Auflager C 13,22 kN einwirken. Um diese und auch jene in X und Y Richtung wirkenden Lasten des concrete leafs in das Erdreich weiterzuleiten bzw. beim Auflager A ein Abheben der Konstruktion zu verhindern, bedarf es spezieller Detaillösungen, die wir auf den folgenden Seiten erläutern werden. Wie in der nebenstehenden Darstellung zu erkennen ist, haben wir uns für Pfahlfundamente entschieden, da deren Herstellung den geringsten Aufwand bedeutet, um die oben angestrebten Werte zu erreichen. Die Länge der Pfähle wird von den jeweiligen Bodenbedingungen bestimmt, eine Mindestlänge von 3 m ist aufgrund der statischen Vorbemessung aber in jedem Fall erforderlich. Die Punktfundamente können mit Ortbeton ausgegossen werden, dessen verlorene Schalung aus einem kostengünstigen PVC Rohr besteht, oder aber als fertige Elemente angeliefert und in das Erdreich getrieben werden, wobei letzteres dem Gesamtkonzept alle Teile vorzufertigen, entsprechen würde. Die Pfähle haben im Vergleich mit einem Platten- od. Streifenfundament weiters den Vorteil, dass ein Eingriff in die örtlichen Gegebenheiten an nur drei Punkten erfolgen muss und keine großflächige Veränderung zur Folge hat.

Abb. 1: Schnitt zur Erläuterung der Auflager

15. Erkenntnisse der Berechnung - Fundamente - Auflager A und B

Um die nötigen Gegenkräfte zwischen der Freiform und den Pfahlfundamenten zu übertragen, haben wir uns für eine spezielle Ausbildung am Fuß des concrete leafs entschieden. Diese macht es möglich, die auftretenden Lasten auf eine vordefinierte, kreisförmige Fläche zu konzentrieren und über eine Stahlzwischenkonstruktion an die jeweiligen Fundamente weiterzugeben. Die Konstruktion besteht aus einem FR 100/10, welches mit zwei kreisförmigen Platten verschweißt wird. Weiters sind in den Platten jeweils vier Bohrungen mit $d = 20$ mm vorzusehen, um genügend Spielraum für die Ausrichtung der beiden Objekte vor dem Verschrauben der acht M10 Muttern mit den acht mitgeschalteten Gewindeanker zu haben.

Weiters ist zu erwähnen, dass die zwei Freiformteile, die auf den beiden Auflagern A und B aufsitzen, vor der Montage miteinander durch einen zwei-komponentigen Epoxidharzmörtel verklebt und im Anschluss mit einer 5 mm dicken Neoprenscheibe abgedichtet werden. Diese Maßnahmen werden auf den folgenden Seiten näher erläutert.

Legende:	1 Betonfundament, $L = 4$ bis 6 m	4 Neoprenabdichtung, $s = 5$ mm	7 M 10 Gewindestange
	2 Freiformteile des concrete leafs	5 M10 Mutter	8 Durchgangsbohrung, $d = 20$ mm
	3 Stahlkonstruktion, $d = 200$ mm	6 M10 Beilagscheibe	

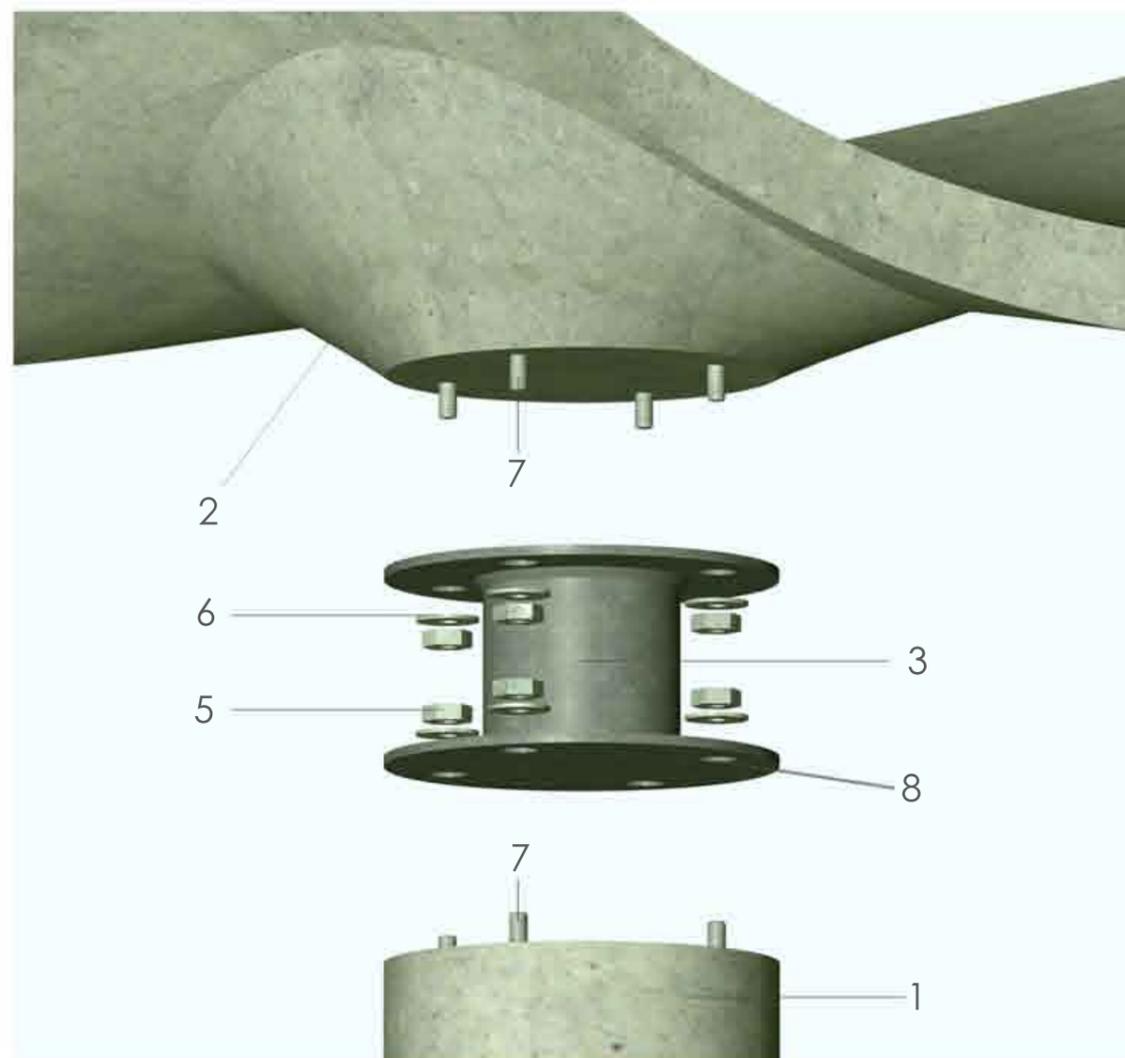


Abb. 1: Explosionszeichnung Auflager B

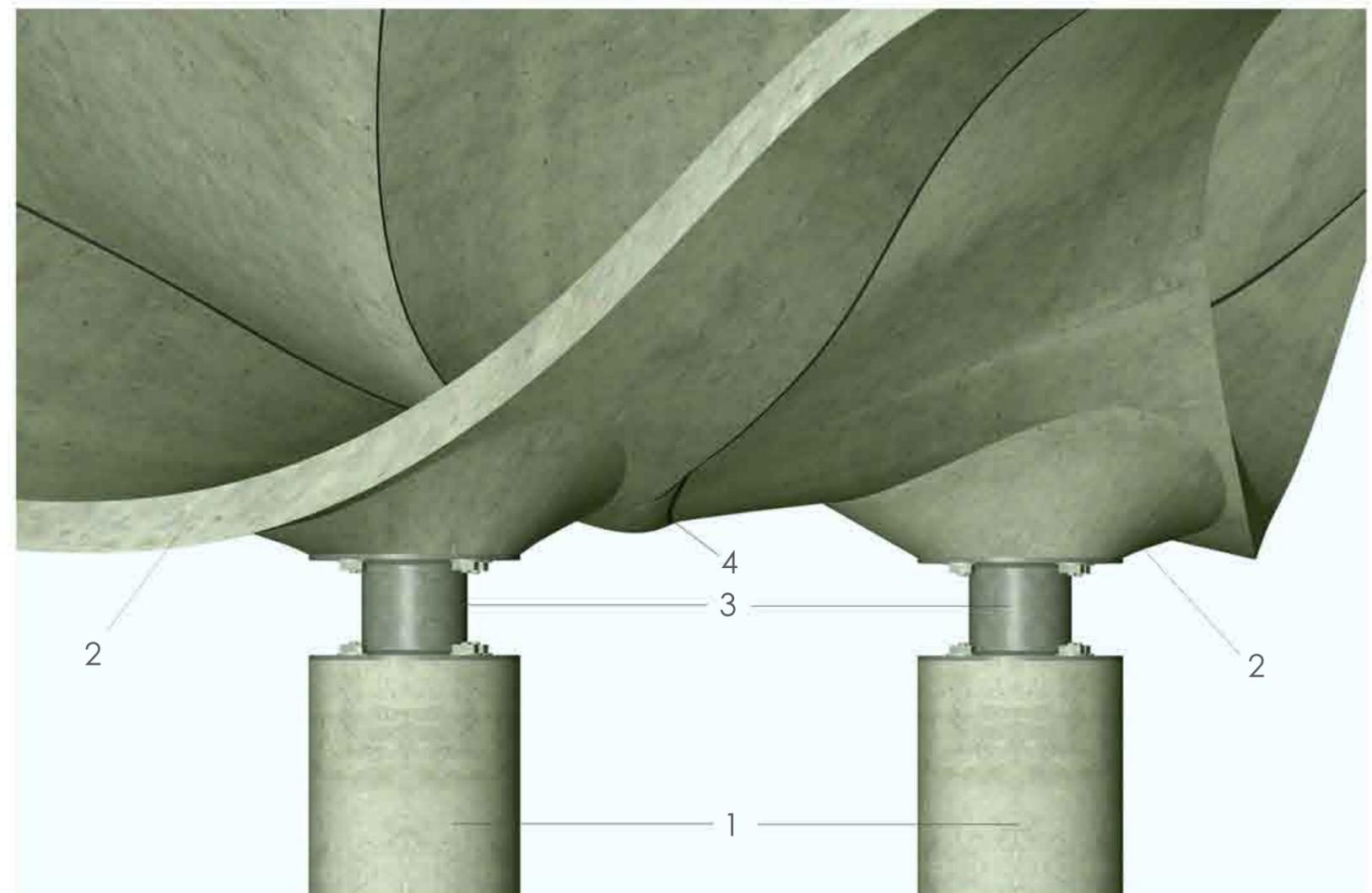


Abb. 2: Auflager B zusammengebaut

15. Erkenntnisse der Berechnung - Fundamente - Auflager C

Um einen Kräftefluss in dieses dritte Auflager des concrete leafs zu gewährleisten und ohne Einbußen bei der Erhaltung der sichtbaren Form zu erfahren, ist diese Auflagerkonstruktion entstanden. Die Positionierung der Stahlkonstruktion ist zwischen dem Betonfundament und den zwei Freiformteilen vorgesehen. Die Verbindung mit den zwei Freiformteilen entsteht zum einen durch das Verschrauben mit den vier mitgegossenen Gewindestangen, die an der Unterseite der Betonteile vertikal herausragen und zum anderen durch zwei Gewindebolzen, für deren horizontale Verbindung in jedem Betonfertigteil zwei Ausnehmungen für Beilagscheibe und Mutter vorgesehen sind und welche mitgeschalt werden. Um anfallende Bewegungen der Freiform aufzunehmen, sind bei der Stahlkonstruktion Langlöcher vorgesehen. Ein Verbinden mit dem Betonfundament geschieht durch das Verschrauben der mitgeschalteten vier Gewindestangen im Betonfundament mit der Stahlkonstruktion. Zusätzlich soll zwischen die Betonfertigteile eine Neoprenschiicht aufgetragen werden, um eine Abdichtung zu erhalten und um das Erscheinungsbild der Struktur der Form zu verstärken. Es ist vorgesehen, die zwei Freiformteile mit zweikomponentigem Epoxidharzmörtel zu verkleben, bevor eine Verbindung mit dem Auflager hergestellt wird.

Legende:

1 Betonfundament L = 4 bis 6 m
2 Freiformteile des concrete leaf
3 Stahlkonstruktion d = 200 mm

4 M10 Schraubbolzen, L angepasst
5 M10 Mutter
6 M10 Beilagscheibe

7 M 10 Gewindestange
8 Langloch d=10 mm, L=30 mm
9 Durchgangsbohrung mit d = 20 mm

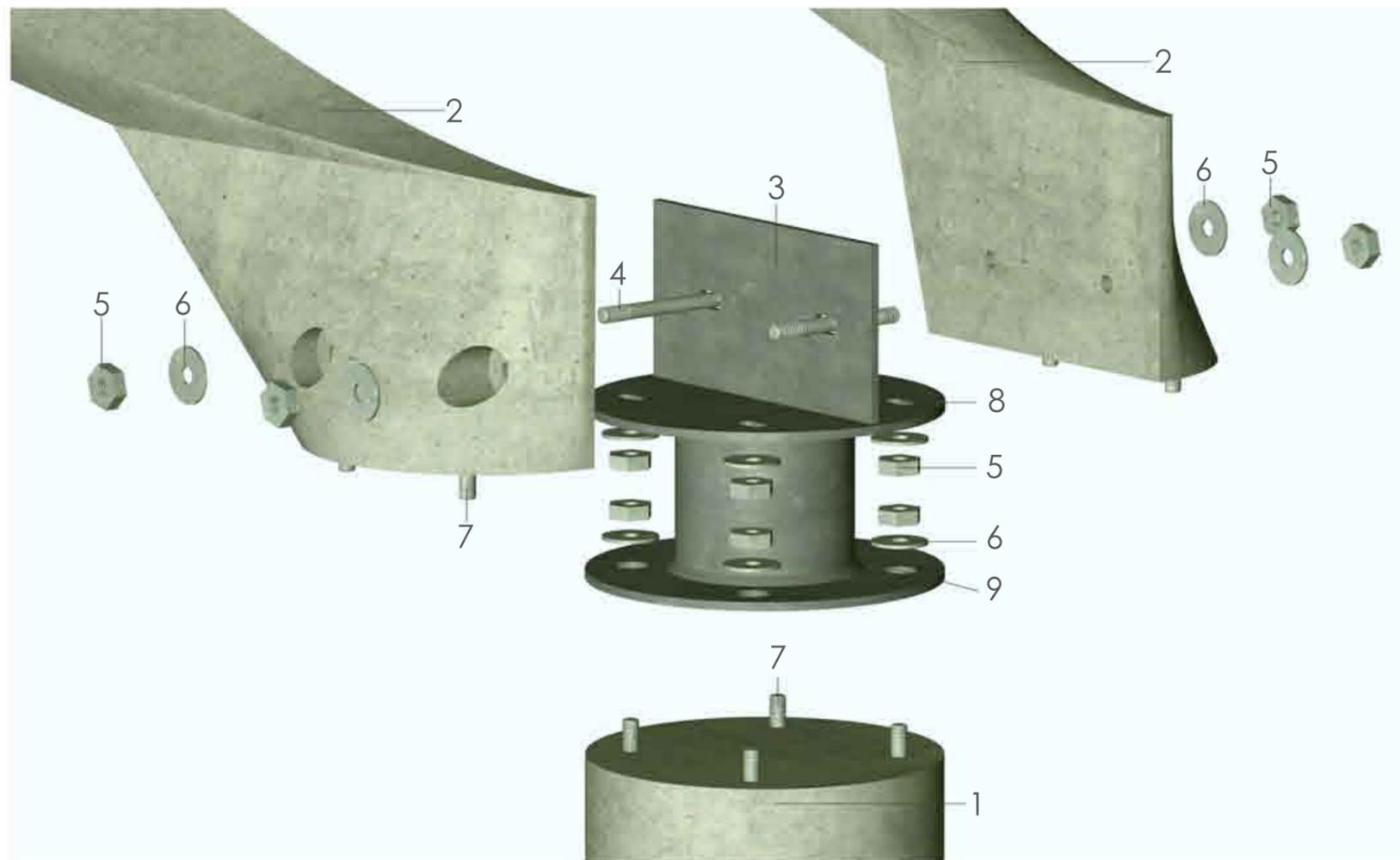


Abb. 1: Explosionszeichnung Auflager C

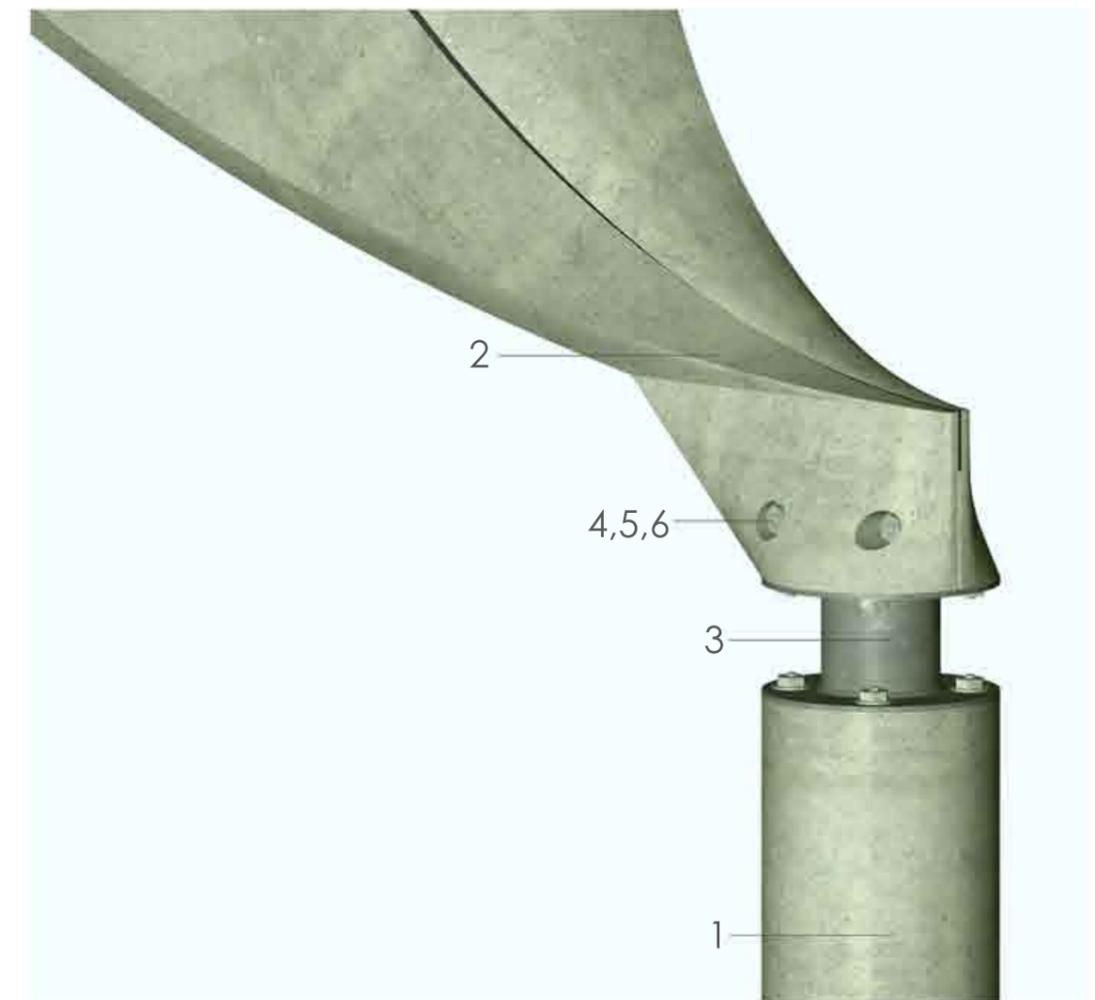


Abb. 2: Auflager C zusammengebaut

15. Erkenntnisse der Berechnung - Änderung des Verbindungsschemas

Wir haben uns nach mehrmaligen Überlegungen dazu entschlossen, das anfängliche Schema alle Freiformteile des concrete leafs durch Seile miteinander zu verbinden, zu ändern. Aus den unten stehenden Begründungen geht hervor, dass ein Verkleben durch zweikomponentigen Epoxidharzmörtel von jeweils zwei Segmenten und dem darauffolgendem Verspannen von jeweils zwei „Verbundkörpern“ mehr Vorteile für die Gesamtstruktur bedeutet. Weiters haben wir ein Schalen von nur einem Segment, welches die Form von derzeit zwei hat, angedacht, da man sich das Kleben vor Ort ersparen könnte. Hierbei überwiegen jedoch die Nachteile des Bauens einer so komplexen Schalung und dessen Schalungsaufwand.

technische Befürwortung:

- Wie bereits im Berechnungsmodell erwähnt, können die auftretenden Zugspannungsspitzen mehrere Gründe haben, dennoch ist davon auszugehen, dass die Verbundwirkung, die durch ein Verkleben erreicht wird, die Spannungsspitzen in der Freiform reduzieren würde.
- Durch ein Weglassen der Seilführungen in eine Richtung wird der Bau der Schalungskörper erleichtert und die Freiformteile in ihrem Querschnitt weniger geschwächt.
- Die „Halbierung“ der Bauteile für die Zugverbindungen reduziert die Fehleranfälligkeit.

gestalterische Befürwortung:

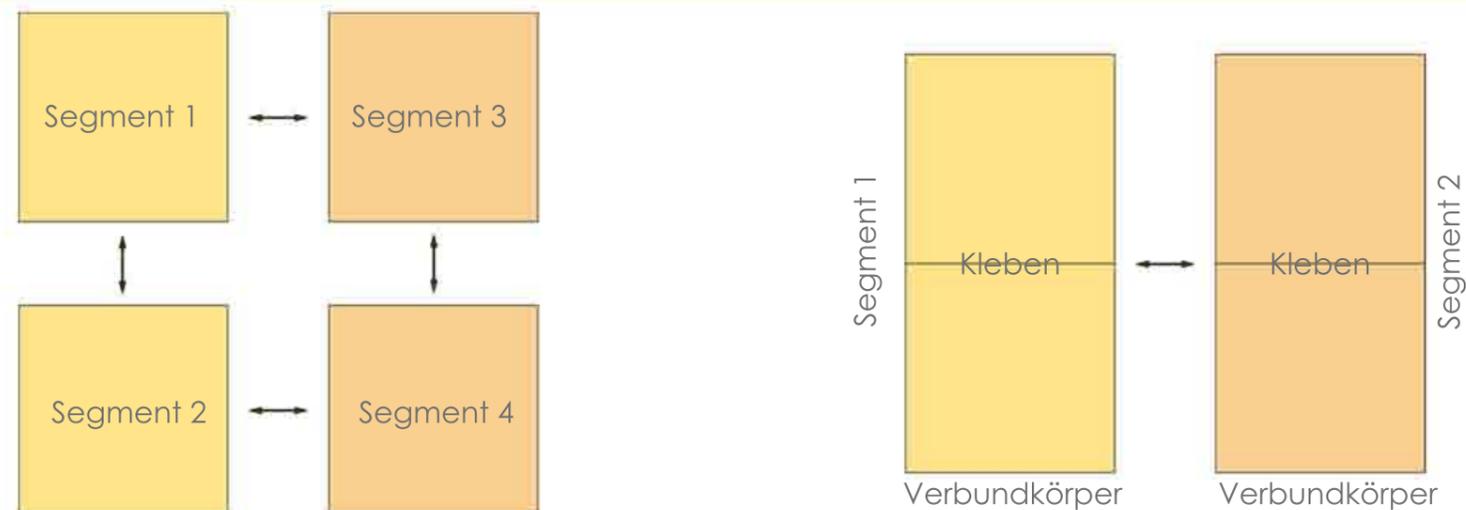
- Die Entscheidung kommt dem Gestaltungsaspekt sehr entgegen, da ohne sie auf der 5 cm hohen Stirnseite kreisförmige Öffnungen, Abdeckbleche oder Abdeckkappen nötig gewesen wären, um die seitliche Spannungsvorrichtung zu schützen. Nun können jedoch die Freiformteile als Ganzes wahrgenommen werden, was dem ursprünglichen Entwurfsgedanken entspricht.

Technische Nachteile:

- Durch die Entscheidung müssen die Stoßfugen der zu verklebenden Elemente so ausgebildet werden, dass dennoch Platz für eine Neoprenleiste an der Ober- und Unterseite vorhanden ist, da aus gestalterischen Gründen durch dieses Element die Freiformteile und ihre Fügung als ein Ganzes ihre Geltung erfahren.

Abb. 1: Schematische Darstellung der Herangehensweise, links = bisher, rechts = neu

↔ Seilverbindungen



15. Erkenntnisse der Berechnung - Konsequenz der Fundamentausbildungen

Wie in den zwei unteren Abbildungen zu erkennen, erreicht die Notwendigkeit dreier Auflager eine Veränderung im Entwurf bzw. im Bereich seiner Baubarkeit. Die eingegangenen Kompromisse für eine Fundamentausbildung sind für uns allerdings durchaus in einem angemessenen Rahmen der Veränderung geblieben, sodass der Entwurfsgedanke auch weiterhin erkennbar ist. Die Ausbildungen in den zwei Hauptfundamenten bilden weiche Übergänge zwischen den Fundamentelementen und den Freiformflächen. Im Auflagerpunkt C (Spitze) war es von Bedeutung eine Lösung zu finden, die den Entwurfsgedanken, einen störungsfreien Übergang zwischen der Freiform und der Umgebung herzustellen, aufrecht erhält. Aus diesem Grund befindet sich jene Ausformung die einen Anschluss an das Fundament ermöglicht, unter der Erdoberfläche.

Durch die Wahl der Verbindungen im Fundamentbereich bleibt die Demontierbarkeit des Systems auch weiterhin erhalten.



Abb. 1: notwendige Ausbildung für den Anschluss an die Fundamente

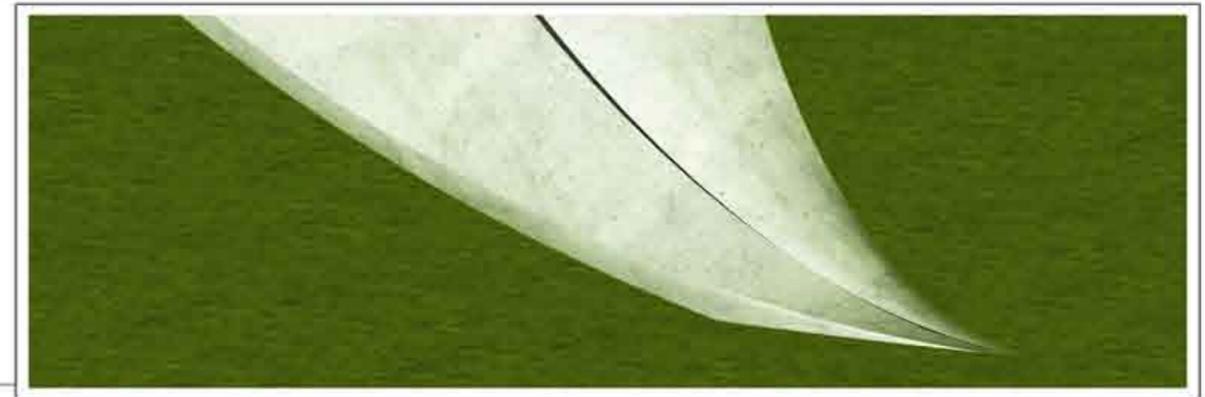
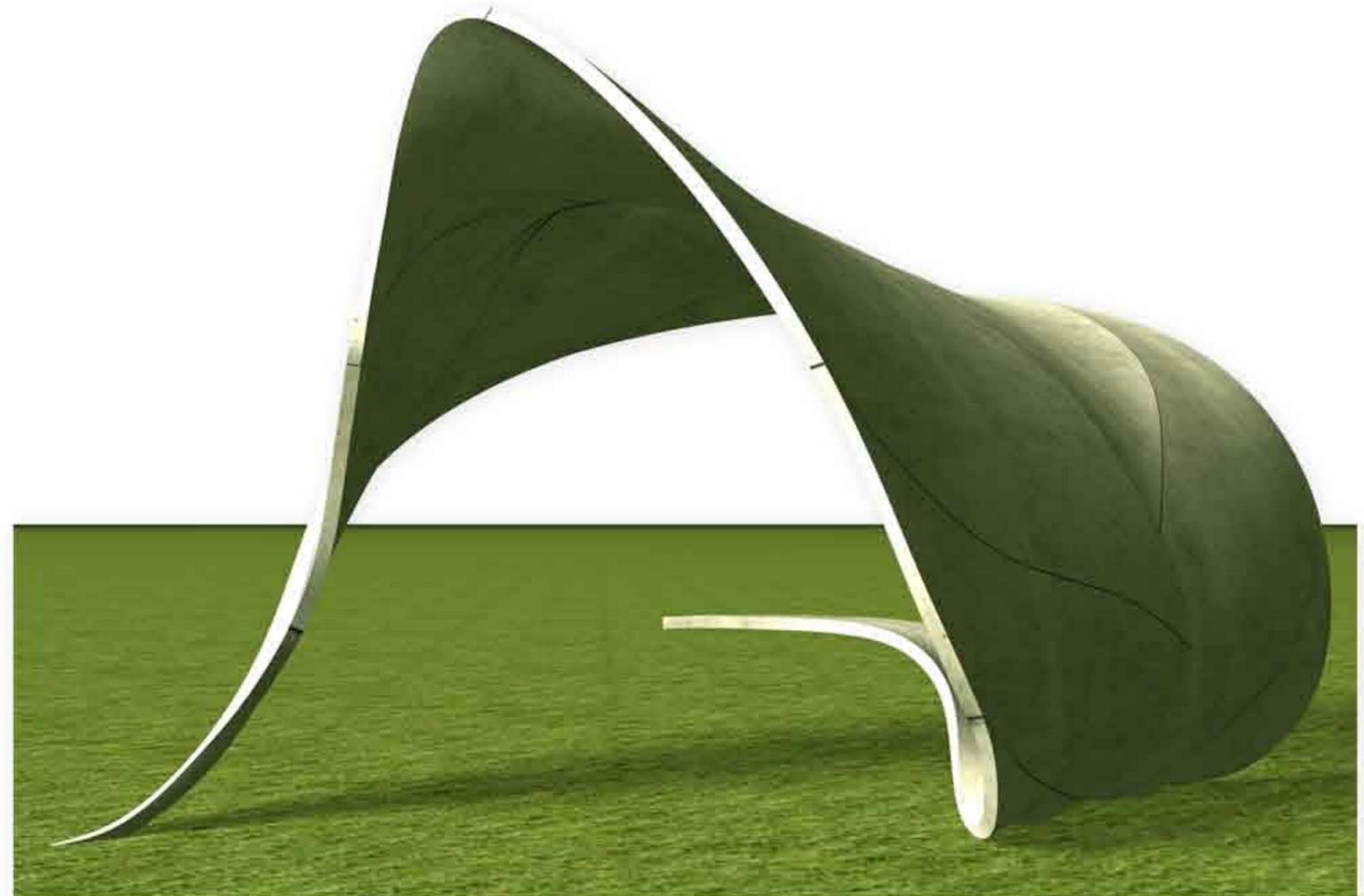


Abb. 2: Übergang des concrete leaf in seine natürliche Umgebung bleibt erhalten



15. Erkenntnisse der Berechnung - Zuganker

Aufgrund der Ergebnisse der Berechnung für die Verbindungselemente und der Erkenntnis, dass es am Markt keinen unseren Forderungen entsprechenden Zuganker gibt, haben wir uns dazu entschieden, einen geeigneten Zuganker zu entwickeln.

Dieser besteht aus einer Innengewindehülse aus Edelstahl, zwei seitlich angeschweißten Betoneisen sowie einem an beiden Enden der Betoneisen angeschweißten Stahlblech, um den Anforderungen der Berechnung 30 kN (3000 kg) Zugkraft auszuhalten, gerecht zu werden.

Zudem ist es möglich, die zwei Betoneisen für jene Positionen, an denen das concrete leaf gewölbt ist, vor der Montage über eine Länge von 60 mm zu verbiegen, um eine Anpassung an die Freiform zu gewährleisten. Die restlichen 40 mm des Ankers die gerade sein müssen, haben die gleiche Länge wie der im System II angedachte Klebeanker. Durch die „kurze“ Gerade des Gewindeterminals und der Gewindehülse ist es daher weiterhin möglich, das „Herrausragen“ des Zugankers zu vermeiden. Die Weiterleitung der Lasten auf den Beton geschieht bei der Konstruktion über die Fläche der Betoneisen und die der angeschweißten Platte, wobei genügend Beton zur Verarbeitung dieser Lasten besteht und ein „Herausreißen“ vermieden wird.

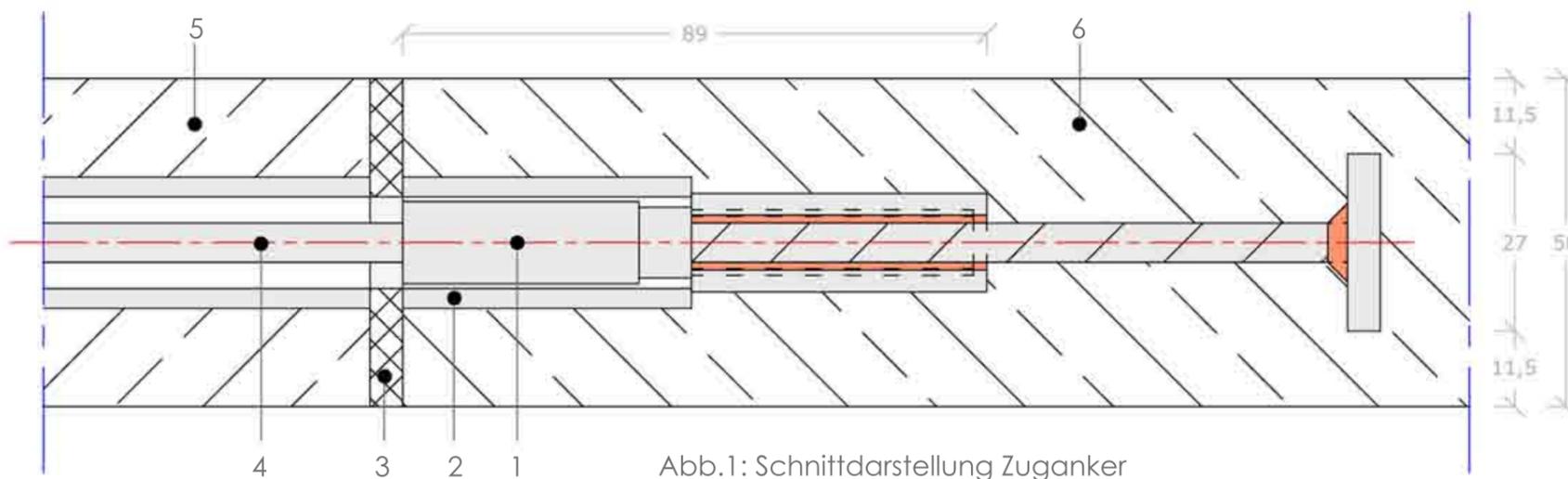


Abb.1: Schnittdarstellung Zuganker

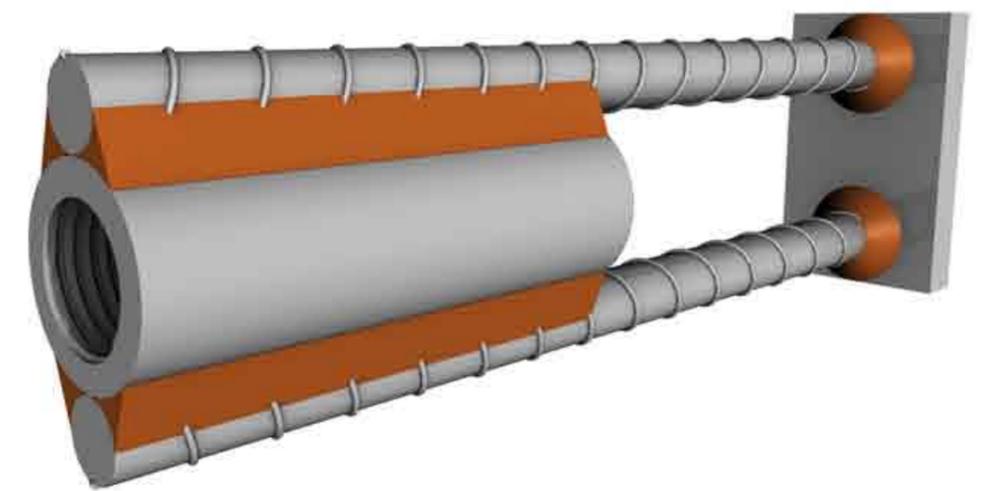


Abb.2: Perspektive

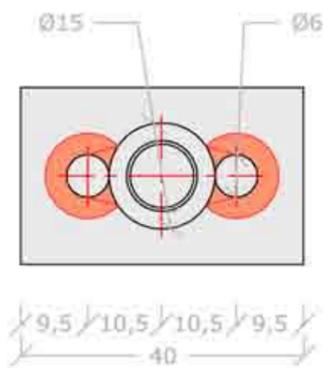


Abb.3: Ansicht v. links

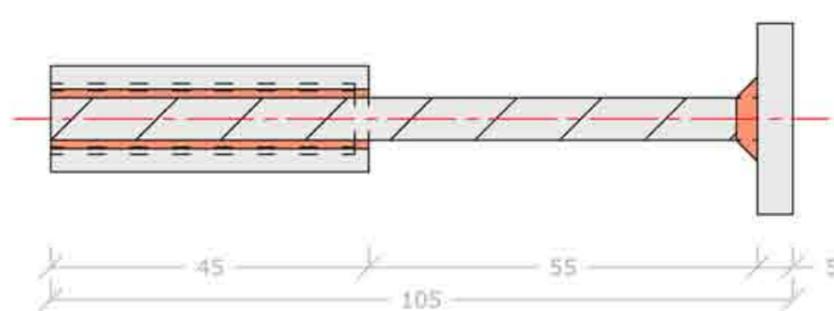


Abb.4: Ansicht v. vorne

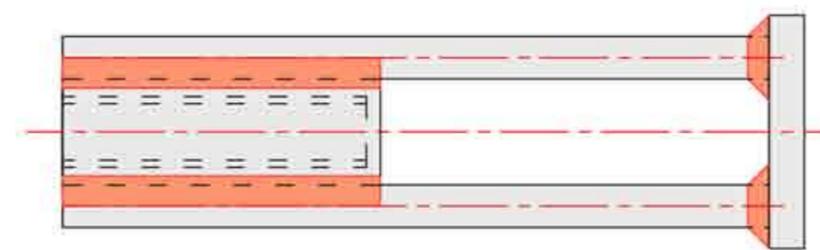


Abb.5: Ansicht v. oben

Legende:

- 1 Gewindeterminale
- 2 Verbundrohr
- 3 Dichtungsschicht
- 4 Niroseil
- 5 Bauteil 1
- 6 Bauteil 2

M=1:1, Alle Maße in mm !

16. Entwicklung System III

System III stellt die dritte Entwicklungsstufe im Detail dar. Die markantesten Veränderungen im Vergleich mit dem System II sind das Hinzuziehen einer wasserabweisenden Ausgleichsschicht in den Fugen, die mithilfe eines 5 mm dicken und 5 cm hohen Neoprenbandes erreicht wird. Dies bietet nicht nur Schutz vor der Witterung, es ermöglicht zudem, dass die Struktur der Fugen und somit ein Kontrast zur Gesamtform wahrgenommen werden kann, was wiederum unserer anfänglichen Entwurfsvorstellung entspricht. Das Blatt wird durch diesen Schritt eindeutig erkennbar.

Die Verwendung eines zugfesteren Betonankers ist die zweite Neuerung im Detail. Sein hinteres 55 mm langes Endstück kann sich dem Bauteil durch eine Kaltverformung vor dem Einbau anpassen. Wichtig war weiters, dass der Gewindeterminal, der in den Betonanker eingeschraubt wird, sich nach der Montage vollständig im Bauteil, in dem der Anker positioniert ist, befindet, um im Falle zweier gebogener Betonelemente keine radiale Anpassung der Seilführungsrohre an beiden Bauteilen durchführen zu müssen, da es hierbei zu einer außermittigen Positionierung kommen kann, wodurch der Mindestquerschnitt verringert wird. Weiters ist im System III die benötigte Gerade auf der rechten Seite um 18 mm reduziert worden.

VT: - Zugfestigkeit des Systems erhöht sich auf 30 kN

- Reduzierung der nötigen Gerade auf 89 mm
- höhere Schaltoleranzen durch Ausgleichsschicht
- regendichte Fuge
- optischer Kontrast zwischen Betonsegmenten und Fugen

NT: - geringe Toleranzen bei Planung, Kontrolle und Ausführung

- Vorfertigung spezifischer Elemente (Kosten)

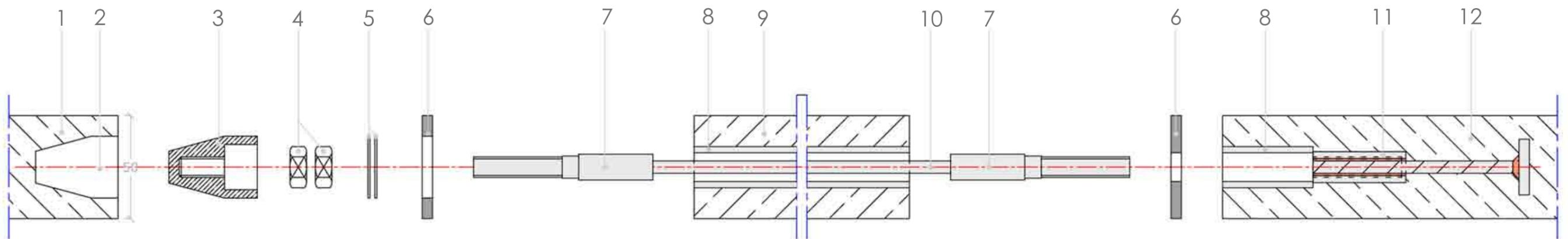
Legende:

1 Betonelement 1
2 mitgeschaltete Öffnung
3 Positionierbolzen

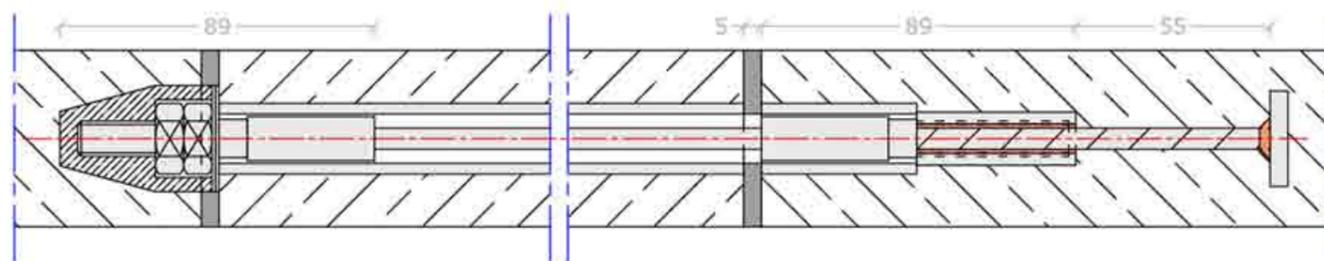
4 M10 Muttern
5 M10 Beilagscheiben
6 Neoprendichtung

7 Gewindeterminal
8 mitgeschaltetes Verbundrohr
9 Betonelement 2

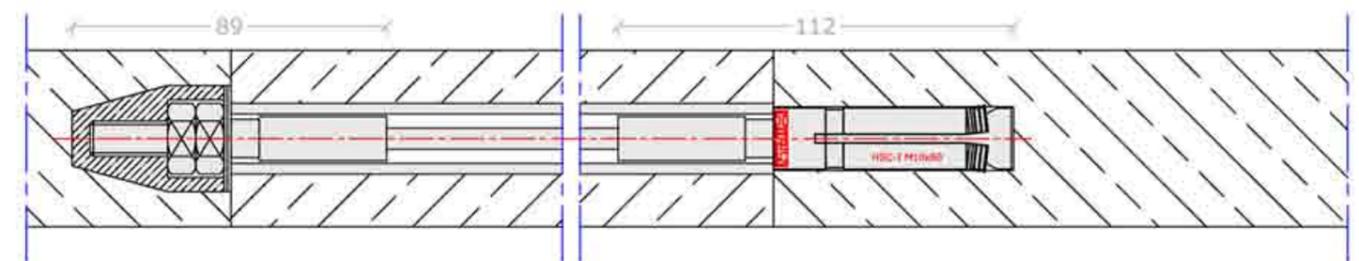
10 Nirostaseil d = 6 mm
11 Betonanker
12 Betonelement 3



Darst. 3: Explosionsschnitt System III



Darst. 1: Vertikalschnitt System III



Darst. 2: Vertikalschnitt System II

M=1:2, Alle Maße in mm !

16. Entwicklung System III - Anwendung bei gewölbten Bauteilen

Wie im Kapitel 17 zu sehen ist, haben wir die komplette Konstruktion im Rhinoceros nachmodelliert. Die Art und Weise wie wir bei den gewölbten Abschnitten mit dem Detail umgegangen sind, lassen die unteren Darstellungen zu. Die Modellierung hat weiters gezeigt, dass sich das System sehr gut den verwundenen Volumenkörpern anpassen kann, ohne Einbußen bei der Statik oder Veränderungen der Form hinnehmen zu müssen. Unten dargestellt sind jeweils vier Situationen, in denen verschiedene Baukörper aufeinander treffen, wobei unter Verwendung desselben Systems spezifisch auf die einzelnen Situationen eingegangen wird.

Darst. 1:
Vertikalschnitt, ein gerades Betonelement,
ein gewölbtes; Endstück ohne Positionier-
bolzen;

Darst. 2:
Vertikalschnitt, ein gerades Betonelement,
ein gewölbtes; Betonanker und Terminal in
einem Segment eingebettet;

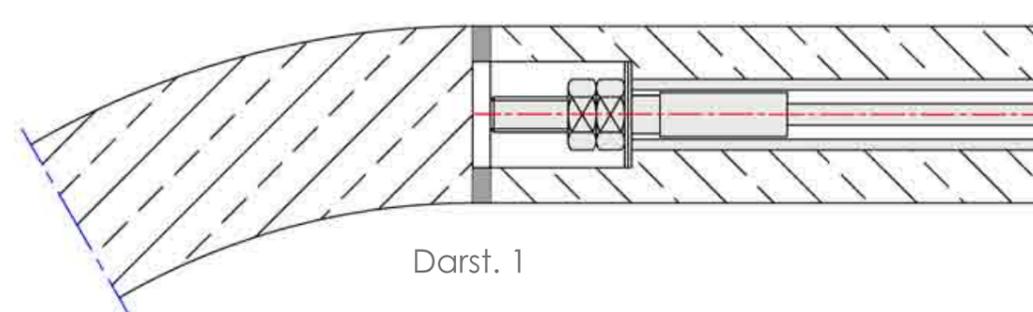
Darst. 3:
Vertikalschnitt, beide Betonelemente sind
gewölbt; Positionierbolzen und Gewindeter-
minal sind mittig angeordnet;

Darst. 4:
Vertikalschnitt, beide Betonelemente sind
gewölbt; Gewindeterminale und Betonanker
sind mittig angeordnet, das Ende des
Betonankers wird gebogen mitgeschalt;

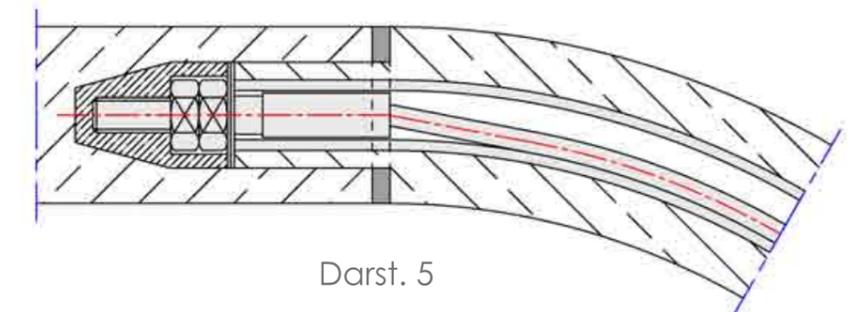
Darst. 5:
Vertikalschnitt, ein gerades Betonelement,
ein gewölbtes; Die Auflagefläche des Po-
sitionierbolzens ragt in das li. Segment,
um die regelm. Wandstärke des re. Segments
zu erhalten;

Darst. 6:
Vertikalschnitt, ein gerades Betonsegment,
ein gewölbtes; Gewindeterminale und Betonanker-
hülse sind mittig angeordnet, Ankerende wird
gebogen mitgeschalt;

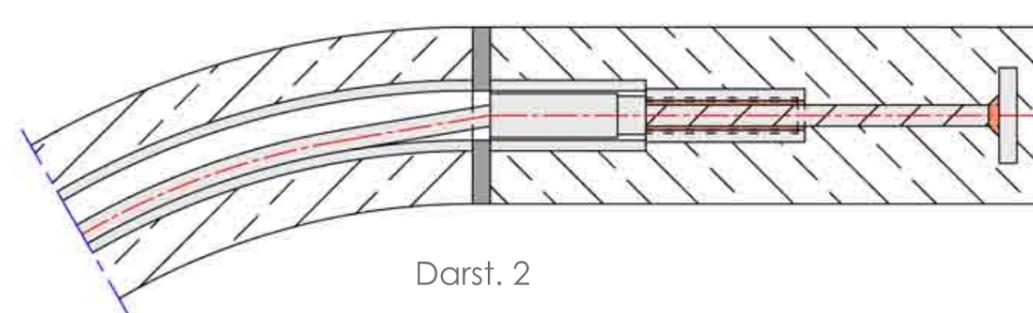
Darst. 7+8:
Standardlösung bei zwei geraden Segmenten;



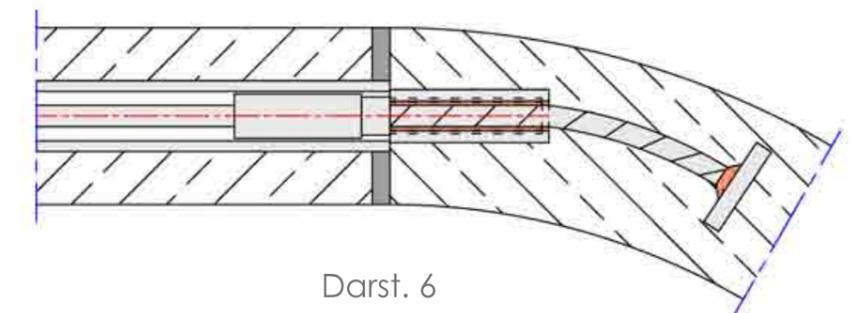
Darst. 1



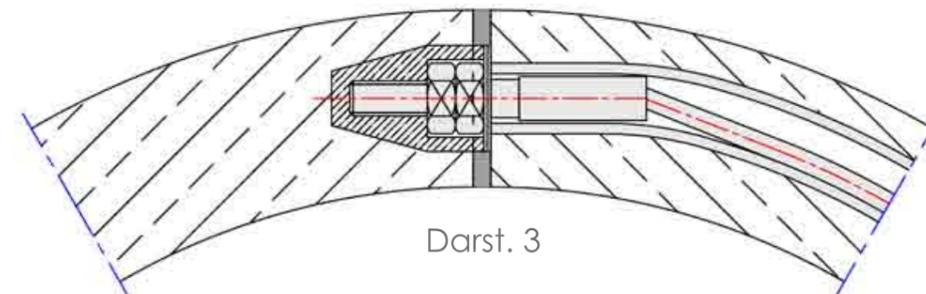
Darst. 5



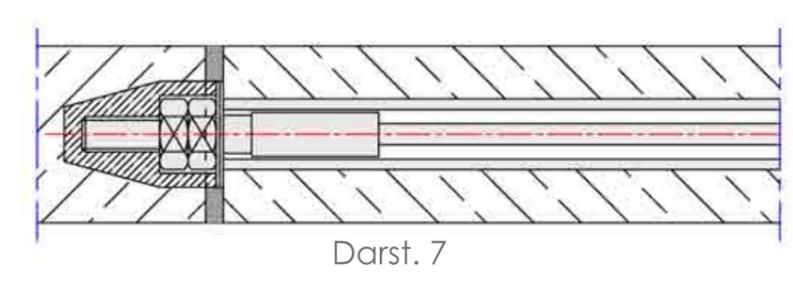
Darst. 2



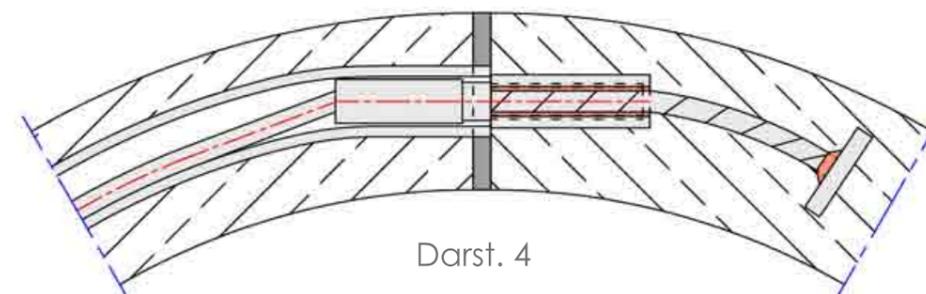
Darst. 6



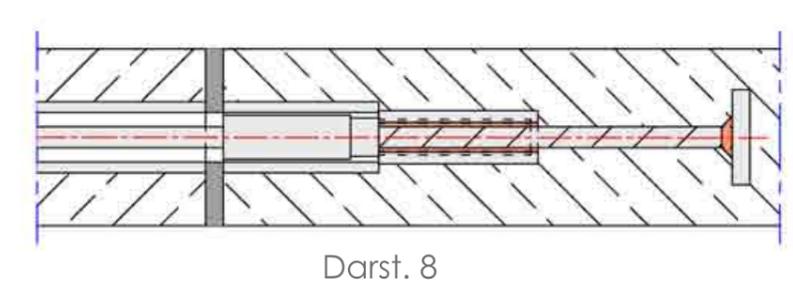
Darst. 3



Darst. 7



Darst. 4



Darst. 8

M=1:2

16. Entwicklung System III - Anwendung bei gewölbten Bauteilen

In Kapitel 12 haben wir die Herleitung des Mindestradius der Betonfertigteile durchgeführt, wobei das Hauptkriterium der durchzusteckende und bereits auf das Seil aufgepresste Gewindeterminale war. Das Ergebnis hierbei lag bei mind. 383,38 mm, verteilt über den gesamten Bauteilquerschnitt. Durch die Eigenschaft, dass im System III ein Gewindeterminale im sekundären Betonfertigteile seinen Halt findet und die Annahme, dass man erst vor Ort die Seile mit den Terminalen verpresst, lässt die Möglichkeit zu, dass der primäre Betonfertigteile nur an einem Ende über den oben genannten Mindestradius verfügen muss. Der restliche Betonkörper kann nahezu frei geformt werden, da sich das Nirostaseil zur Gänze dem Baukörper anpassen kann. Zur Vereinfachung ist diese Länge x als Gerade in der Darstellung 1 zu erkennen.

VT: - zusätzliche gestalterische Möglichkeiten durch Reduzierung der Mindestradien bzw. deren Bogenlänge

NT: - zusätzliche Montageschritte (Kosten)

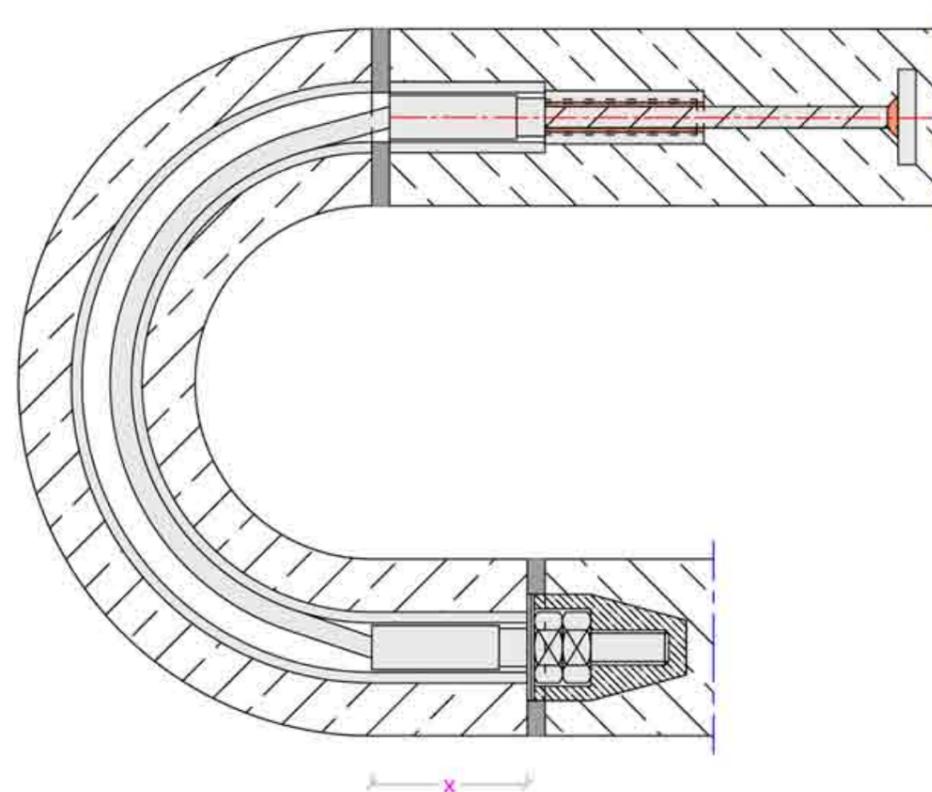
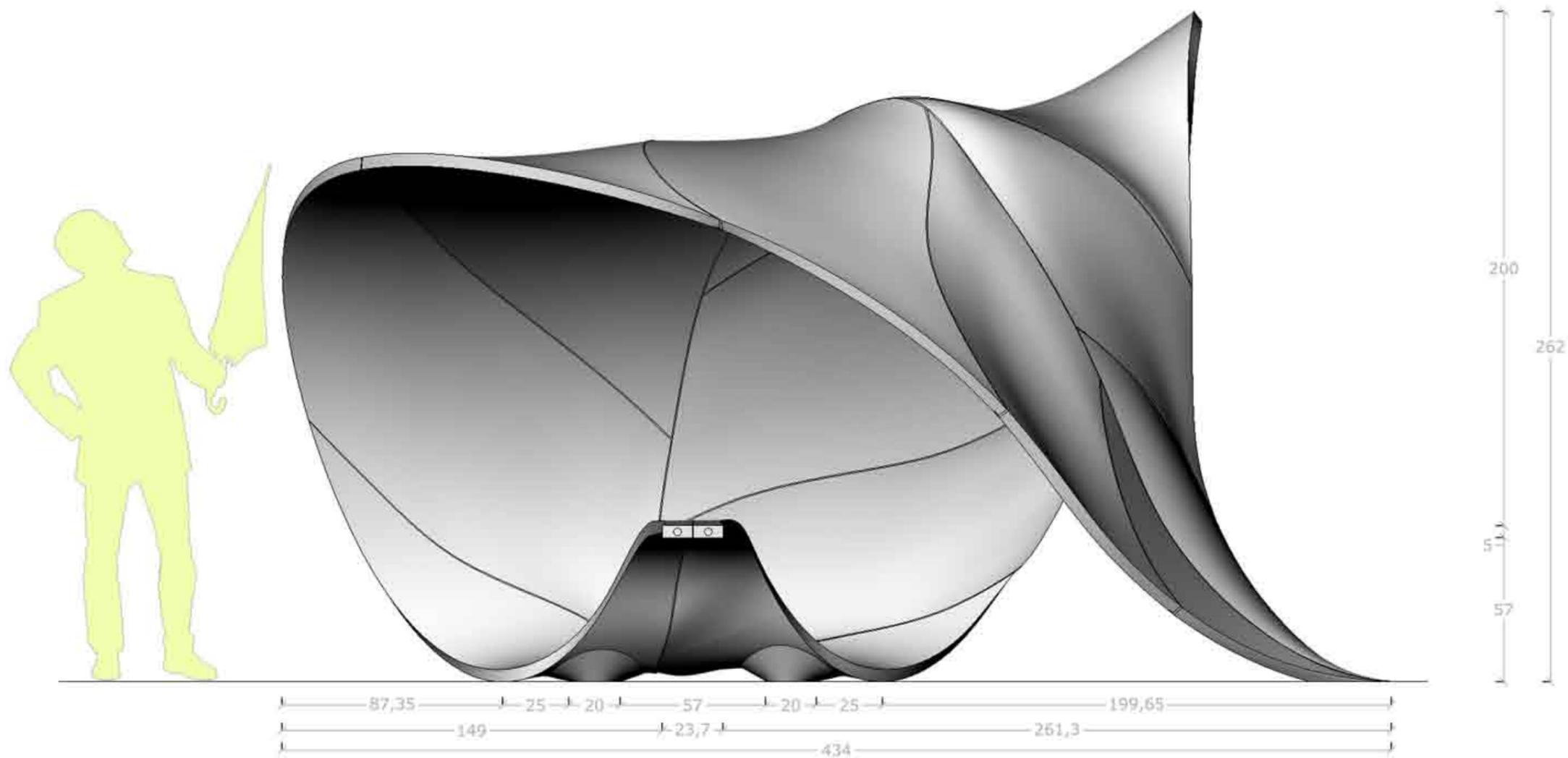


Abb. 1: Vertikalschnitt System III; der benötigte Mindestradius reduziert sich auf ein Bauteilende statt wie bisher auf den ganzen Bauteil

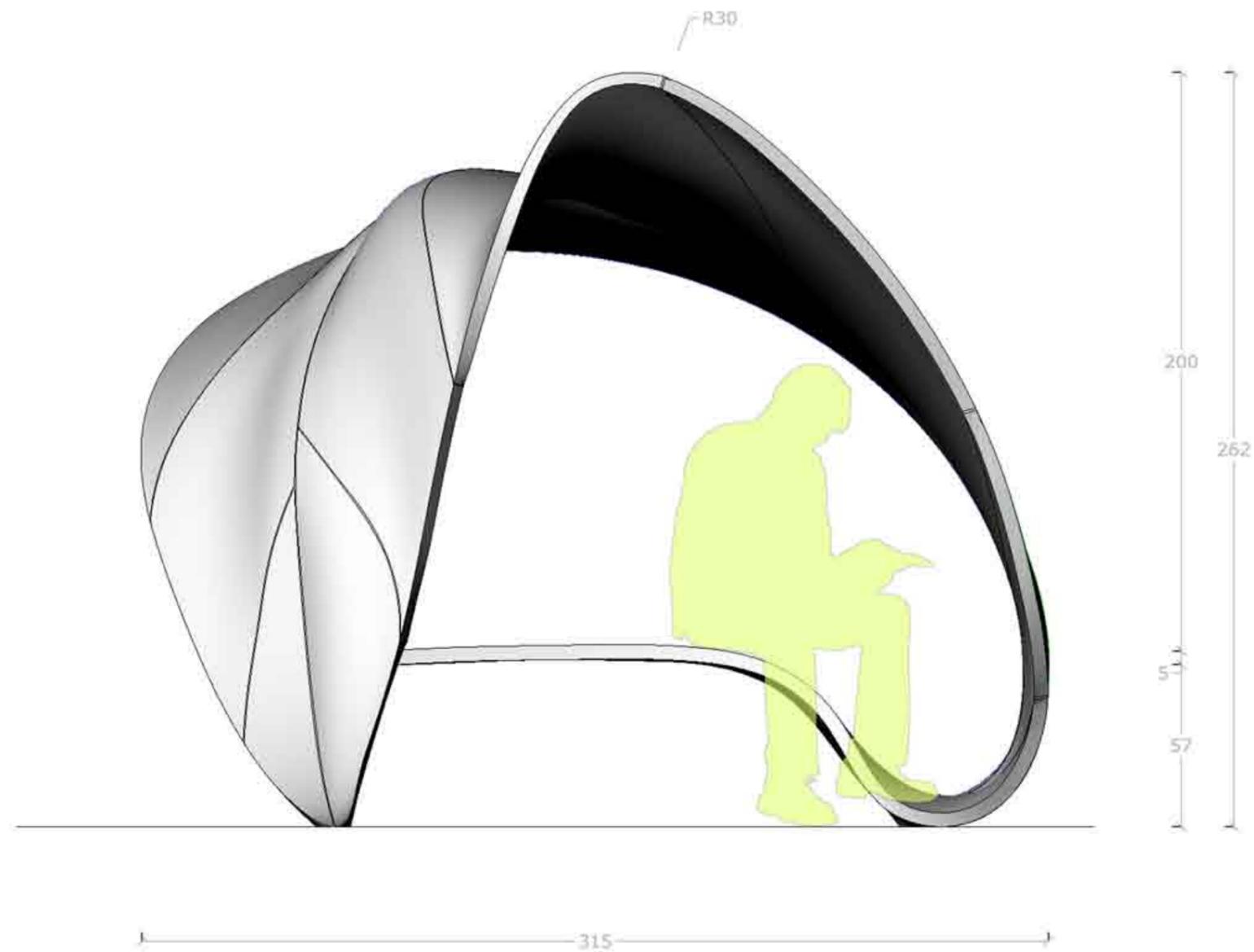
M=1:2

17. ergänzende Darstellungen - Ansicht von vorne



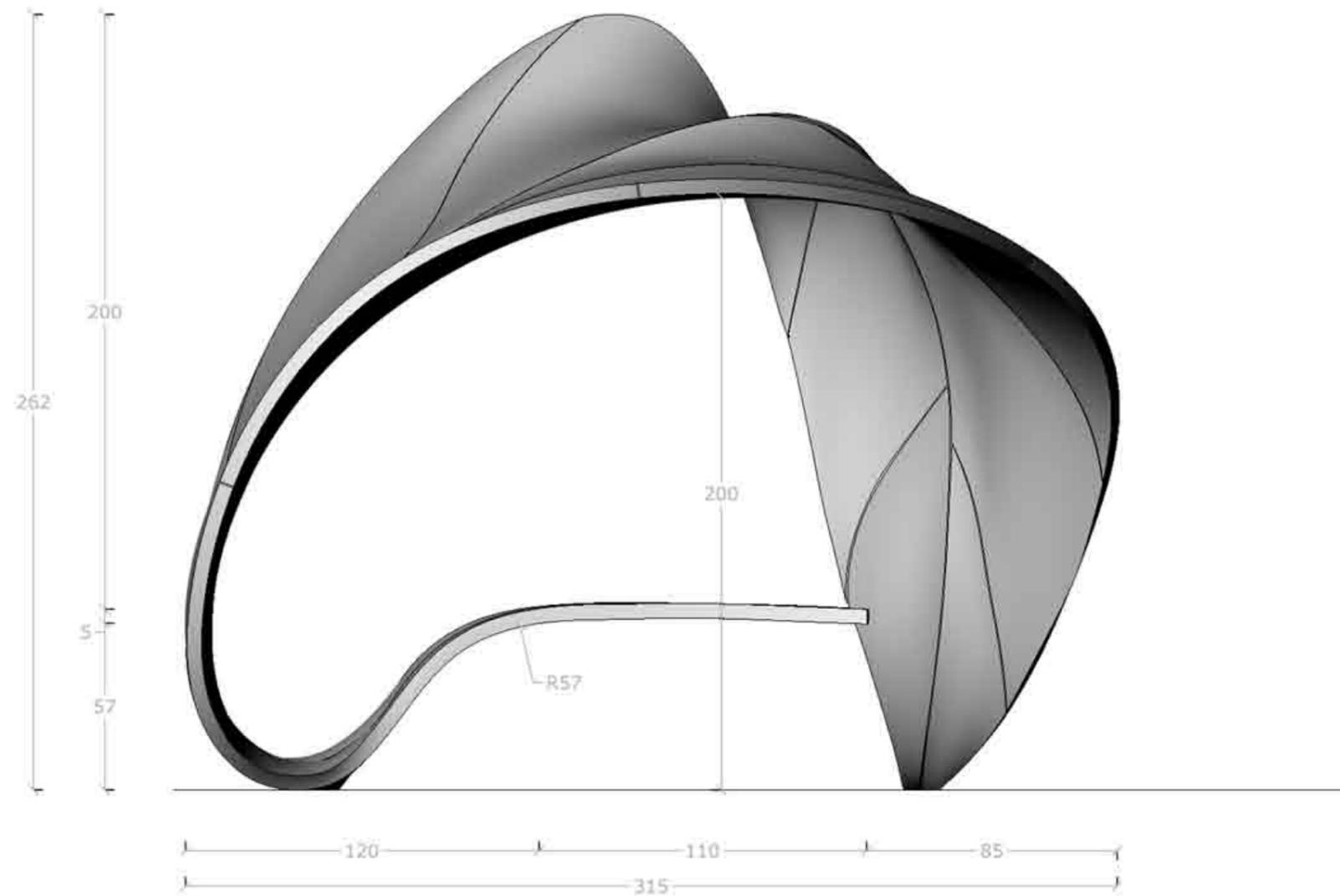
Alle Maße in cm, M = 1 : 20

17. ergänzende Darstellungen - Ansicht von rechts



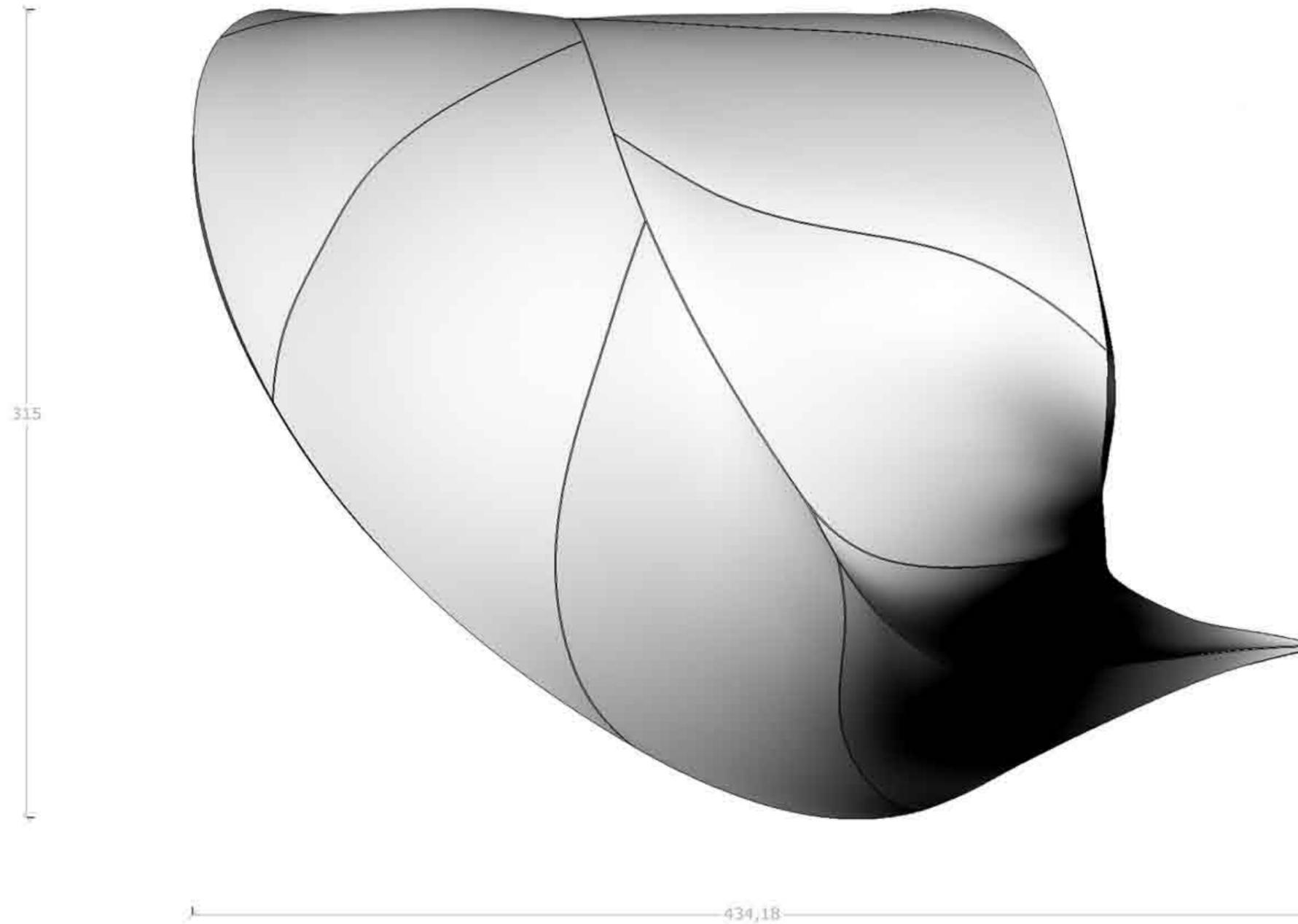
Alle Maße in cm, M = 1 : 20

17. ergänzende Darstellungen - Ansicht von links



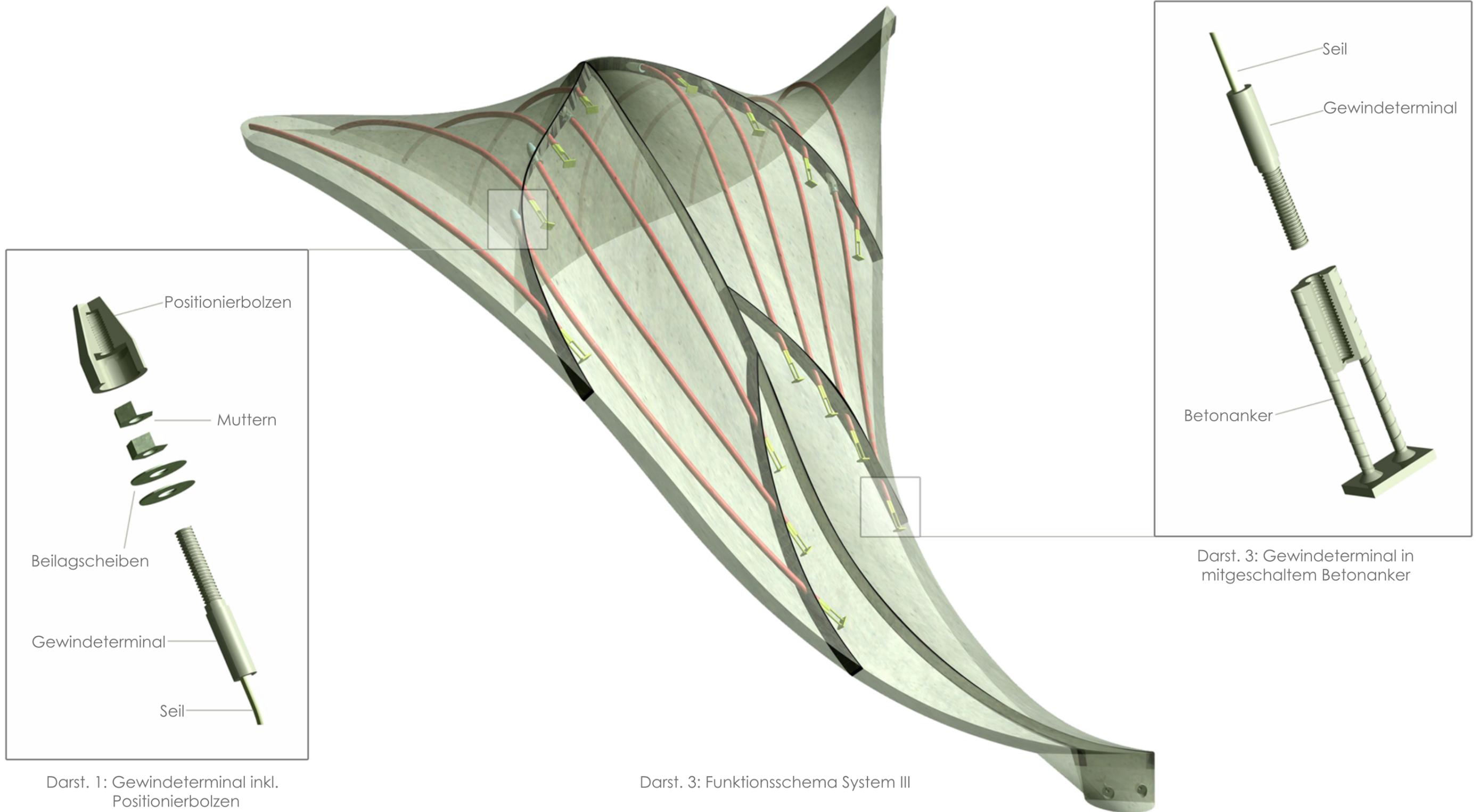
Alle Maße in cm, M = 1 : 20

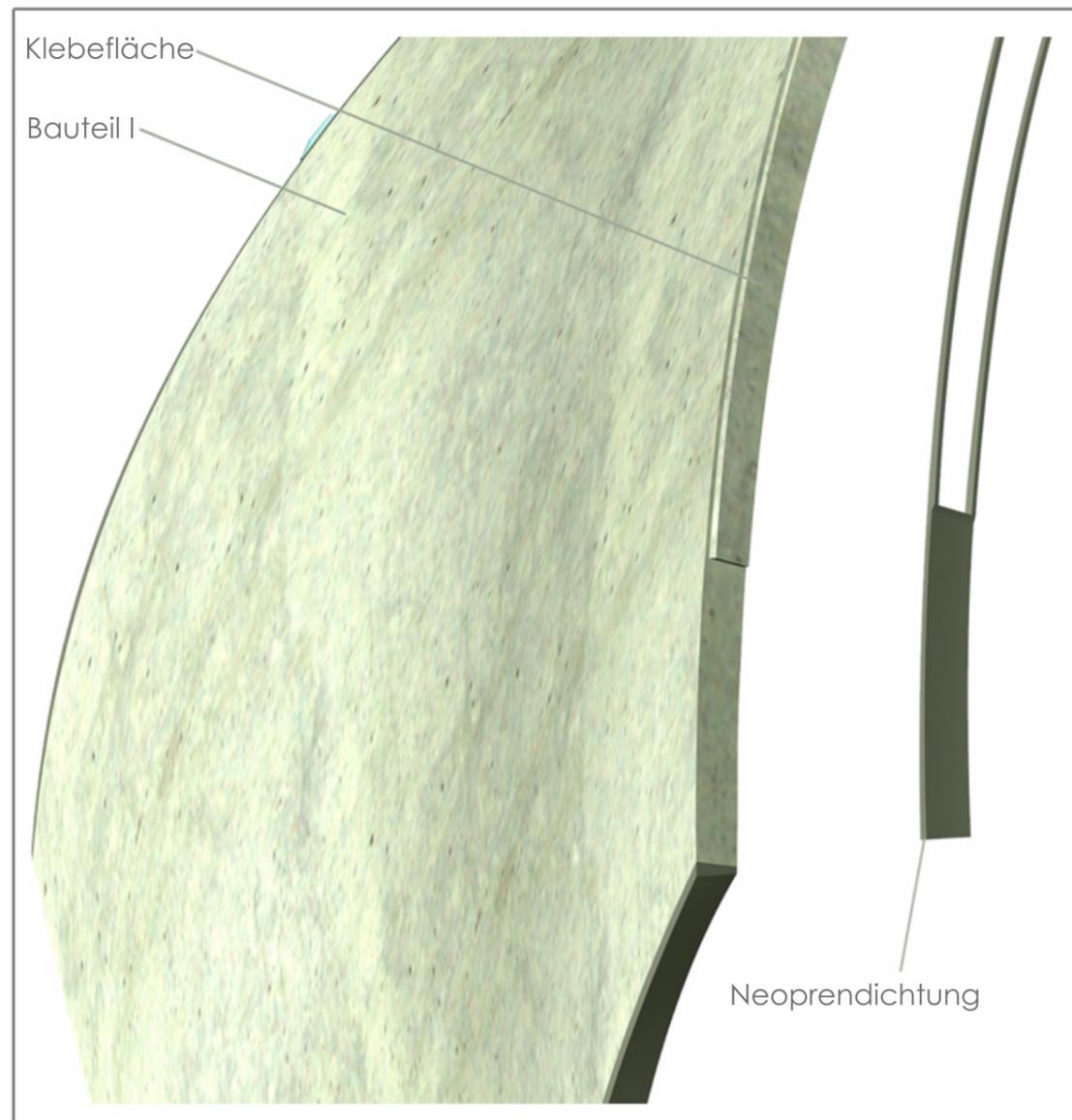
17. ergänzende Darstellungen - Ansicht von oben



Alle Maße in cm, M = 1 : 20

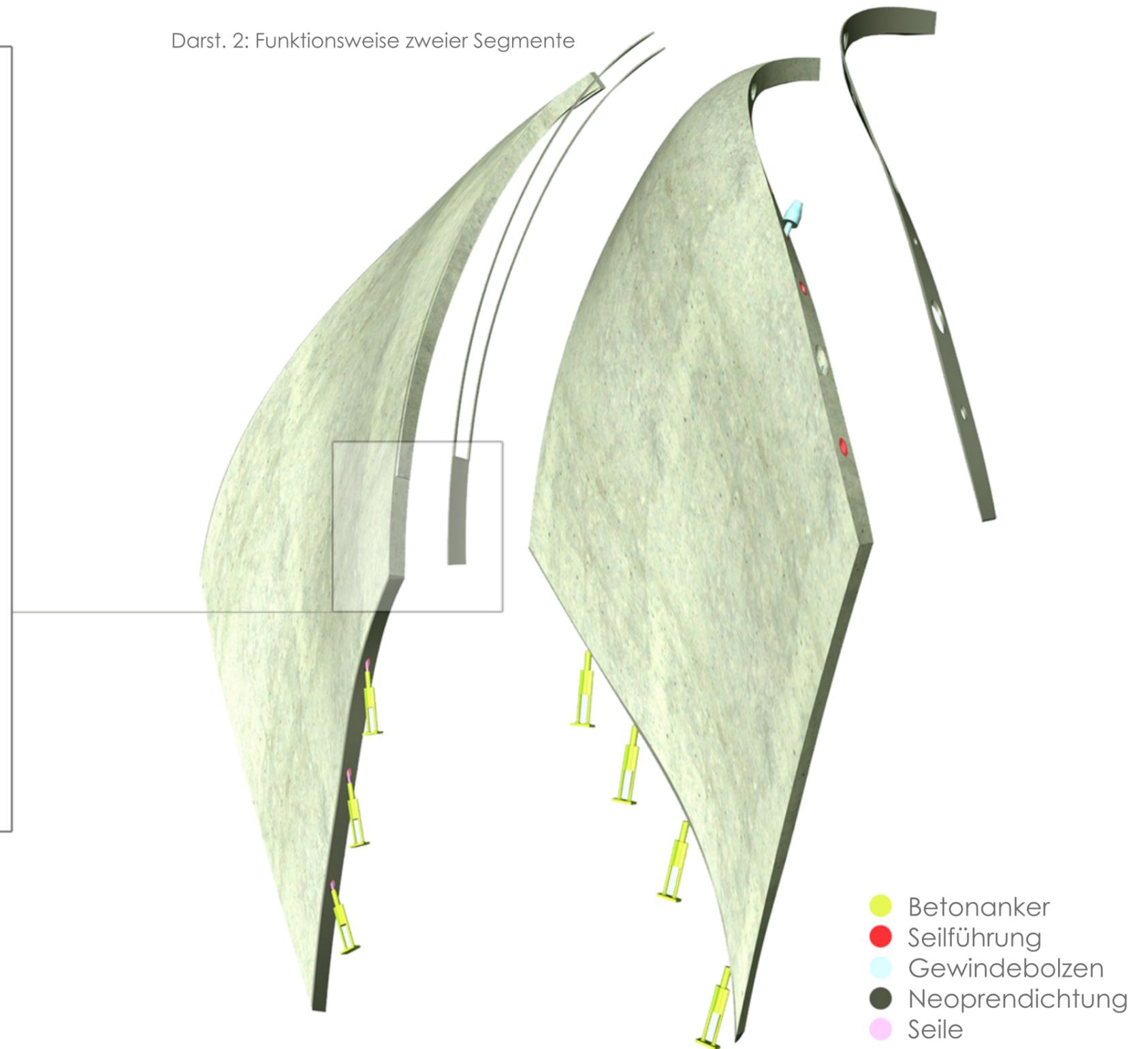
17. ergänzende Darstellungen - Funktionsschema der Verbindungen unter Verwendung des Verbindungssystems III





Darst. 1: Klebefläche auf Segment

Darst. 2: Funktionsweise zweier Segmente



17. ergänzende Darstellungen - Thematik der Vorspannung

Die Seile in unserem System dienen im Eigentlichen der Verbindung einzelner Segmente. Durch die Position und Orientierung der Seilführungen wird in all jenen Fällen bei denen eine Krümmung der Seilführung innerhalb der Verlaufsachse der Segmente besteht, eine Vorspannung erzeugt, wodurch es teilweise zu Reduzierungen der Zugbeanspruchungen der Betonsegmente kommt. In Abb. 2 wird dieses Vorspannprinzip verdeutlicht. Der gekrümmte Verlauf des Seils und die Zugkraft verdichten den Beton an der Krümmungsinnenseite, wodurch zwar eine Erhöhung der Druckbelastung, aber auch eine Reduzierung der Zugbelastung entsteht. Da mit keiner Überschreitung der Druckbelastung des verwendeten Betons zu rechnen ist, weil UHFB hier sehr hohe Werte aufweist, kann die Verwendung der Vorspannung als weiterer Vorteil gesehen werden.

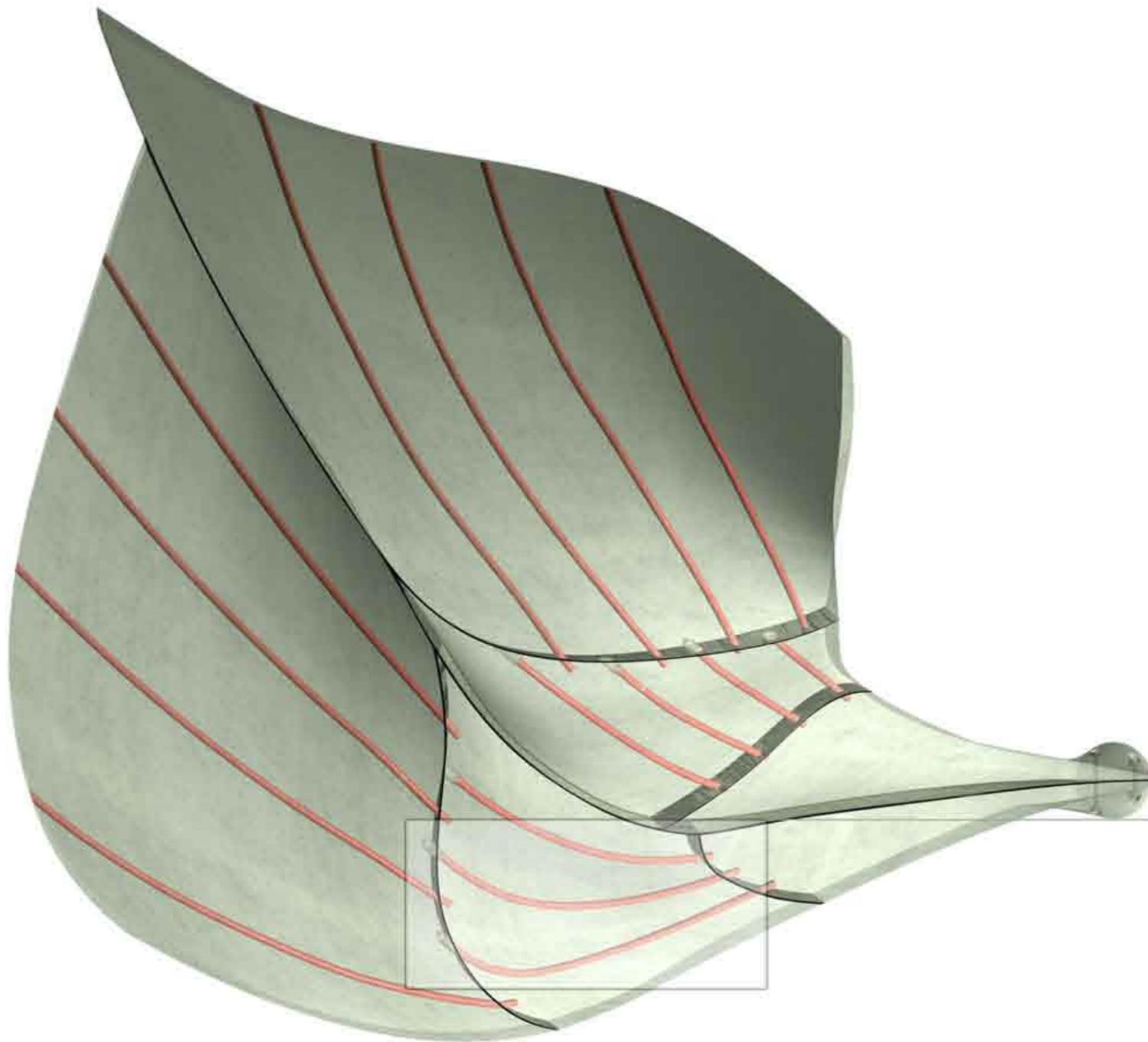
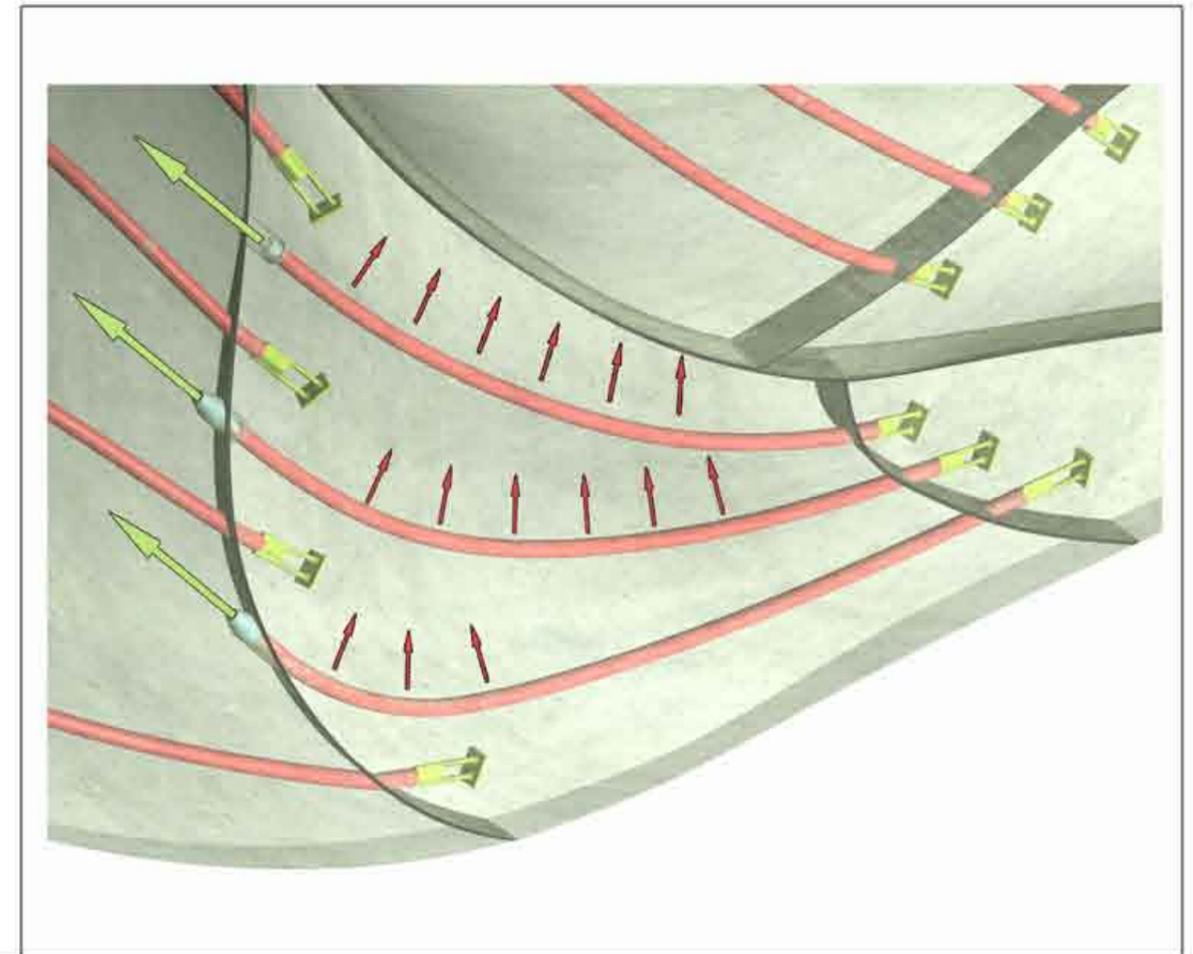


Abb. 1: Ansicht von oben auf einen Teilausschnitt der Seilführung des concrete leafs dargestellt mit transparentem Material

Abb. 2: Teilausschnitt mit schematisch eingezeichnetem Kräfteverlauf der durch die Vorspannung entsteht (rot = Druck, grün = Zug)



18. Schalungsplanung

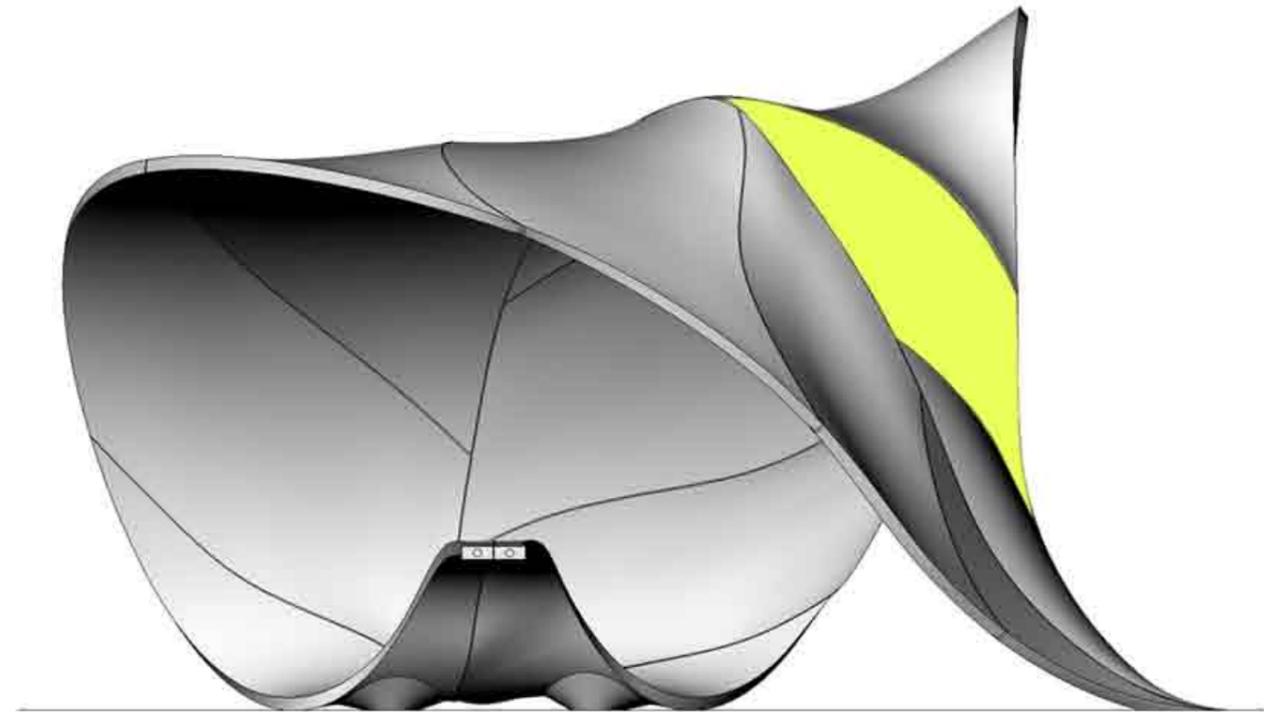
Dieses Kapitel widmet sich der Schalungsplanung des concrete leafs. Anhand eines Fertigteils wird das Funktionsprinzip der Schalung dargelegt.

Die Anregungen bezüglich des Schalungsbaus verdanken wir der Firma Idee und Design, welche auf das Fräsen von amorphen Bauteilen im Innenbereich spezialisiert ist. Die hierfür verwendeten Styroporelemente werden mit einer speziellen Beschichtung versehen, welche eine glatte und stabile Oberfläche garantiert. Dieses System kann aber auch wie Versuche von Idee und Design gezeigt haben, für amorphe Betonbauteile Anwendung finden.

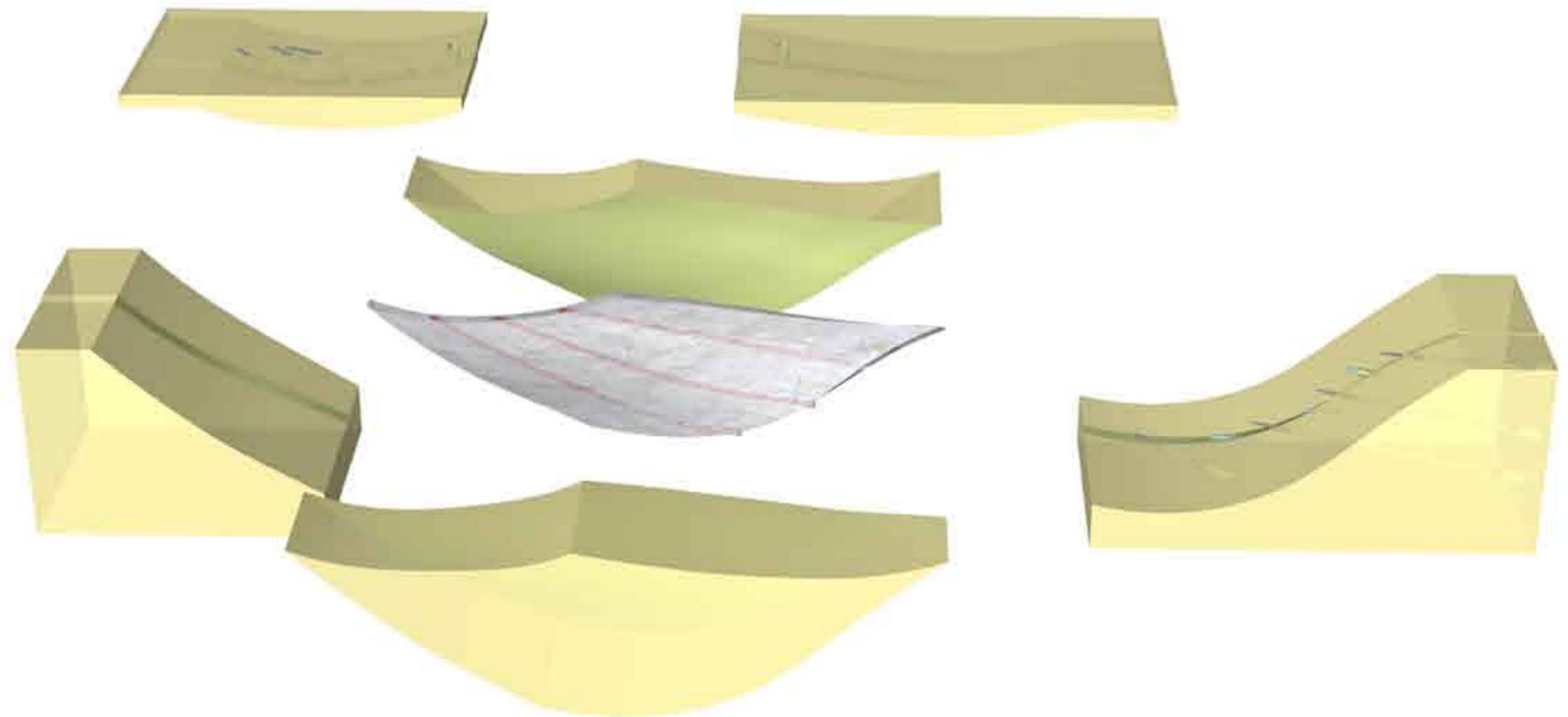
Bezüglich unseres Versuchs zwei gerade Testobjekte mithilfe einer Styrodurschalung zu erzeugen gab es zwar Fehler, dies lag aber hauptsächlich daran, dass das verwendete Material in Kombination mit der Beschichtung nicht optimal für unseren Zweck ein Betonbauteil auszuschalen, geeignet war. Doch die im Rechercheteil aufgeführten Referenzobjekte sowie die Versuche von Idee und Design haben bestätigt, dass der anfängliche Gedanke, die Schalung aus Polystrol – Hartschaum – Elementen zu fräsen und danach zu beschichten, richtig war. Deshalb haben wir uns schließlich entschieden, dieses Prinzip für unser concrete leaf anzuwenden.

Aufbau Schalung

Grundsätzlich besteht ein Schalungskörper aus mehreren Einzelteilen. Die Schalungen wurden so geplant, dass die Innenseiten als Negativform des Betonelements ausgeformt sind, die Außenseiten sind im Gegensatz dazu, um eine einfache Handhabung zu garantieren, eben ausgeführt.



Darst. 2: Ansicht von vorne, exemplarisch gewähltes Element (grün)



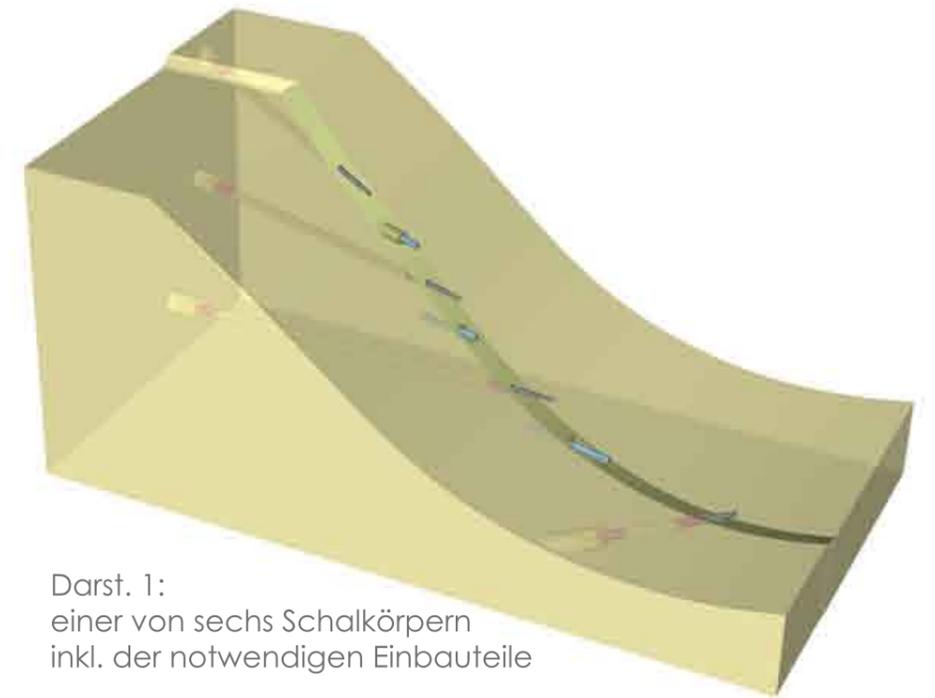
Darst. 1: sechs zerlegte Schalsegmente der Schalung inkl. aller Einbauten, fertiges Betonsegment mit eingeschalteter Seilführungen und Betonanker

18. Schalungsplanung - Funktionsweise der Komponentenpositionierungen

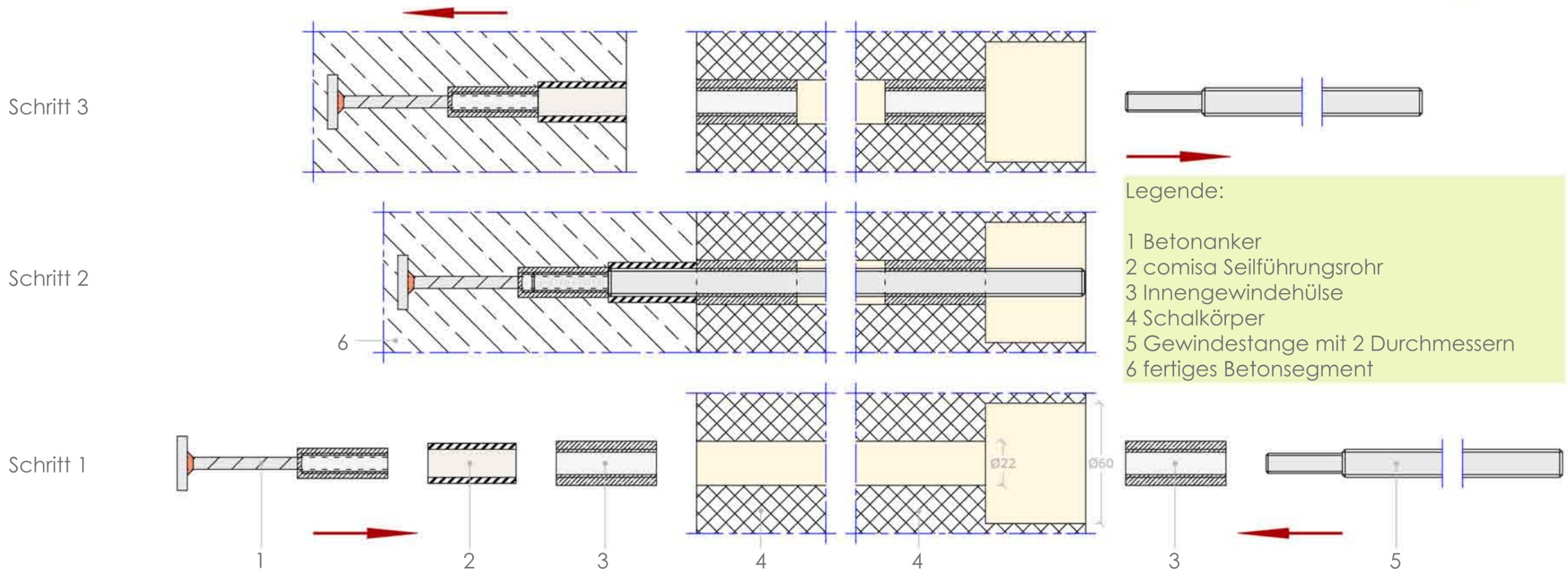
Um die mitzuschalenden Betonanker zu positionieren, bedarf es einer zusätzlichen Bearbeitung der betreffenden Schalkörper (4). Zunächst müssen exakte Bohrungen durchgeführt werden, um das Einkleben von zwei Innengewindehülsen (3) zu ermöglichen. In diese soll nun eine Gewindestange (5) vom hinteren Teil der Schalung aus, eingeführt werden. Durch ihre Fixierung und den nötigen Überstand auf der Schalkörperinnenseite ist es möglich, das mitzuschalende Seilführungsrohr (2) aufzustecken und im Anschluss die Betonanker mit ihren aufgeschweißten Innengewindehülsen (1) auf die Gewindestange (5) aufzuschrauben.

Nachdem die Schalkörper mit Beton ausgefüllt sind, kann die Gewindestange von der Rückseite ohne Probleme wieder herausgedreht werden. Dem Entfernen aller Schalkörper vom fertigen Betonsegment steht nun nichts mehr im Wege.

Generell ist zu erwähnen, dass die unterschiedlichen Winkel der benötigten Bohrungen immer auf die jeweilige Situation hin angepasst sein müssen, um einen Überstand an der Rückseite zu verhindern. Weiters ist ein individuelles Zuschneiden der Seilführungsrohrenden wegen der entsprechenden Winkel der Auflageflächen der Schalung nötig. Diese Schritte sollten jedoch ohne großen Aufwand zu bewerkstelligen sein.



Darst. 1:
einer von sechs Schalkörpern
inkl. der notwendigen Einbauteile



M=1:2, alle Maße in mm

18. Schalungsplanung - Allgemeines

Fräsvorgang:

Die Fräse setzt exakte 3D Daten der Einzelelemente voraus, welche anschließend verarbeitet werden. Für diesen Zweck eingesetzte Fräsmaschinen kommen, soweit uns bekannt ist, mit Rhino Dateien gut zurecht, weshalb die von uns erstellten Daten keine Transferprobleme verursachen würden.

Bearbeitung Styroporblöcke:

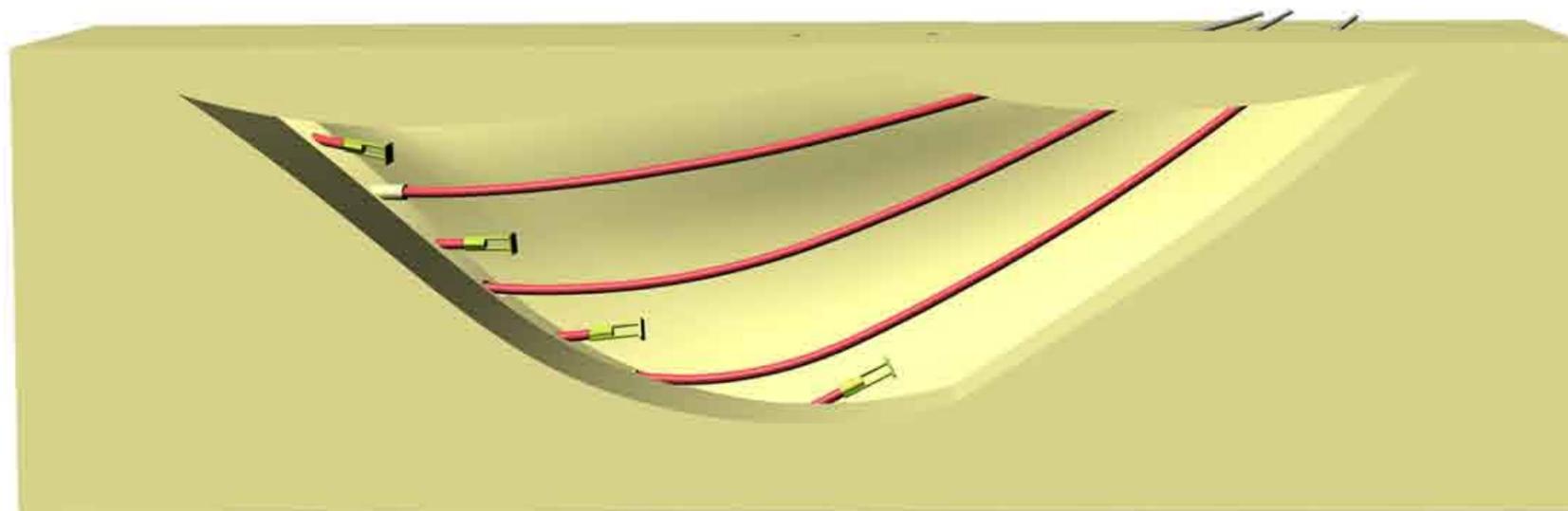
Die einzelnen Styroporelemente müssen nach dem Fräsvorgang mit einer Beschichtung versehen werden. Dies garantiert einerseits eine ebene Oberfläche und andererseits wird ein Eindringen der Form durch den Beton verhindert. Laut „Idee und Design“ eignet sich eine Kombination aus abwechselnden Spachteln und Schleifen eines gewissen Beschichtungsmaterials, welches uns nicht genau bekannt ist, für eine glatte und robuste Oberfläche. Dieser Vorgang ist reine Handarbeit und wird mehrere Male wiederholt, bis eine entsprechende Schichtdicke erreicht ist.

Zusammensetzung der einzelnen Schalungselemente:

Die einzelnen Schalungselemente können mittels eines Stecksystems, welches von der Firma Idee und Design entwickelt wurde und aus diesem Grund nicht näher erläutert wird, miteinander verbunden werden. Es wäre aber auch möglich, die Elemente mithilfe von an der Rückseite ebenen Platten, welche miteinander verschraubt oder zusammen gespannt werden, zusammenzuhalten. Grundsätzlich könnte aber auch unser für die Verbindung von Betonteilen entwickeltes System hier zur Anwendung kommen.

Schalvorgang und Nachbearbeitung:

Der Schalvorgang erfolgt, wie die unten stehende Grafik zeigt, stehend. Die Einfüllöffnungen sind also an der Oberseite angebracht. Die stehende Schalung geht aus den von uns durchgeführten Versuchen mit geraden Betonelementen hervor, wo die Unterseite des Betonelements quasi an der Schalung kleben blieb. Es ist zu beachten, dass der Beton unter zusätzlichem Druck in die Schalung eingebracht wird bzw. in der Schalung eventuell sogar ein leichter Unterdruck vorherrscht. Dadurch kann von einer blasenfreien Oberfläche an der obersten Fläche des Betonfertigteils ausgegangen werden. Für den Fall, dass dennoch Unregelmäßigkeiten an der besagten Stelle auftreten sollten, können diese nach dem Ausschalen nachbearbeitet werden. Hierfür würde sich ein, auf Betonnachbearbeitung spezialisierter Fräsroboter eignen. Die Wahl der obersten Fläche des in der Schalung stehenden Betonelementes fiel auf die Stirnseite des Objektes, die ohnehin einerseits mit einer Neoprendichtung versehen wird und andererseits als Klebefläche für die Verbindung mit einem anderen Betonfertigteil dient, aufgrund dessen können sehr leichte Unebenheiten belassen werden.



Darst. 1: fünf zusammengebaute Schalsegmente zur Darstellung der benötigten Positionierung der Einbauteile (Seilführungsrohre und Gewindeanker)

19. Anwendungsmöglichkeiten von amorphen Betonfertigteilen

Dieses Kapitel widmet sich der Thematik der Anwendung von amorphen Betonobjekten, bestehend aus High – Tech Beton. Vorerst werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten dargestellt, da sie als Kriterium für die Anwendung gelten.

Es gilt hier also das entwickelte Verbindungssystem, im Falle einer demontierbaren Anforderung, aufzuzeigen. Doch auch fixe Installationen, welche aus verklebten Betonelementen bestehen, sollen nachfolgend betrachtet werden. Zudem wird die Kombination beider Möglichkeiten, verbinden und verkleben, wie dies anhand des Prototyps vorgestellt wurde, nochmals aufgeführt. Als Letztes wird die Eventualität von Betonobjekten, welche keine Verbindung benötigen und quasi als Einzelteile fungieren, gezeigt.

Möglichkeit 1: UHFB + Verbindungssystem

Vorteile:

- Flexibilität aufgrund von: Montage/Demontage & Standortunabhängigkeit
- hohe Dauerhaftigkeit wegen der Materialeigenschaften
- Anwendung im Innen- und Außenbereich
- aufgrund der erzeugten Vorspannung, können die Zugkräfte des ultrahochfesten Betons besser ausgenutzt werden

Nachteile:

- Werkstoffstärke wird vom Verbindungssystem mitbestimmt (mind. 5 cm)
- wird das Verbindungssystem in 2 Richtungen gespannt, d.h. die Seile überkreuzen sich, kann eine unsichtbare Verbindung nicht mehr gewährleistet werden, auf einer Seite des Elements wären die Enden der Verbindungen also sichtbar (Abdeckkappen nötig)

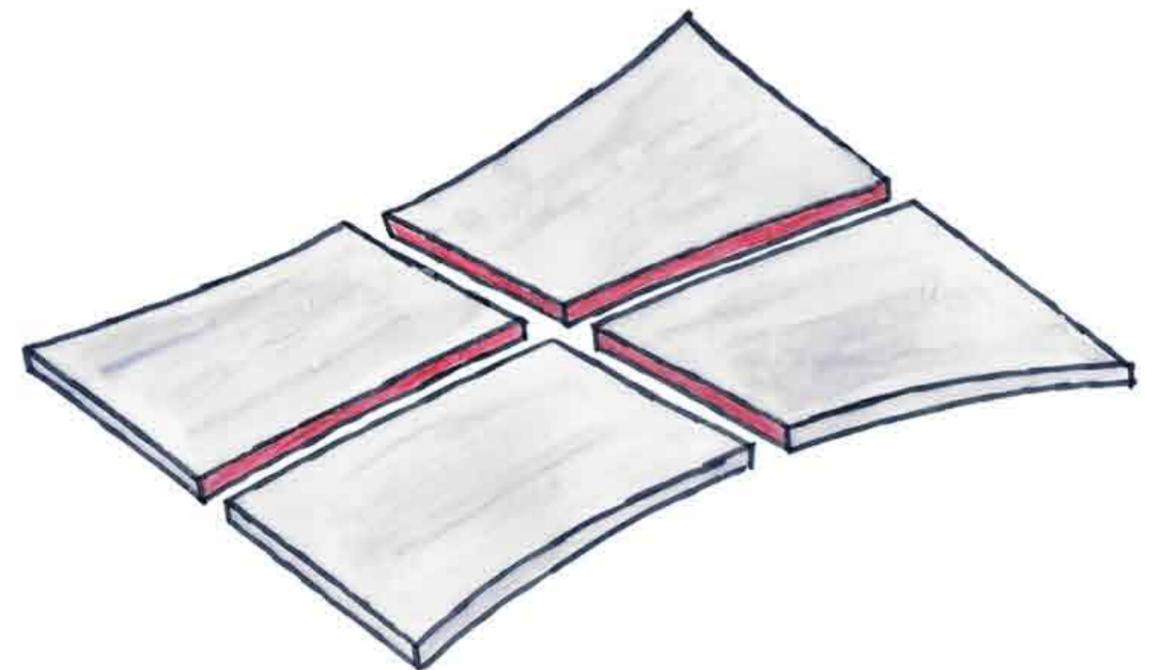
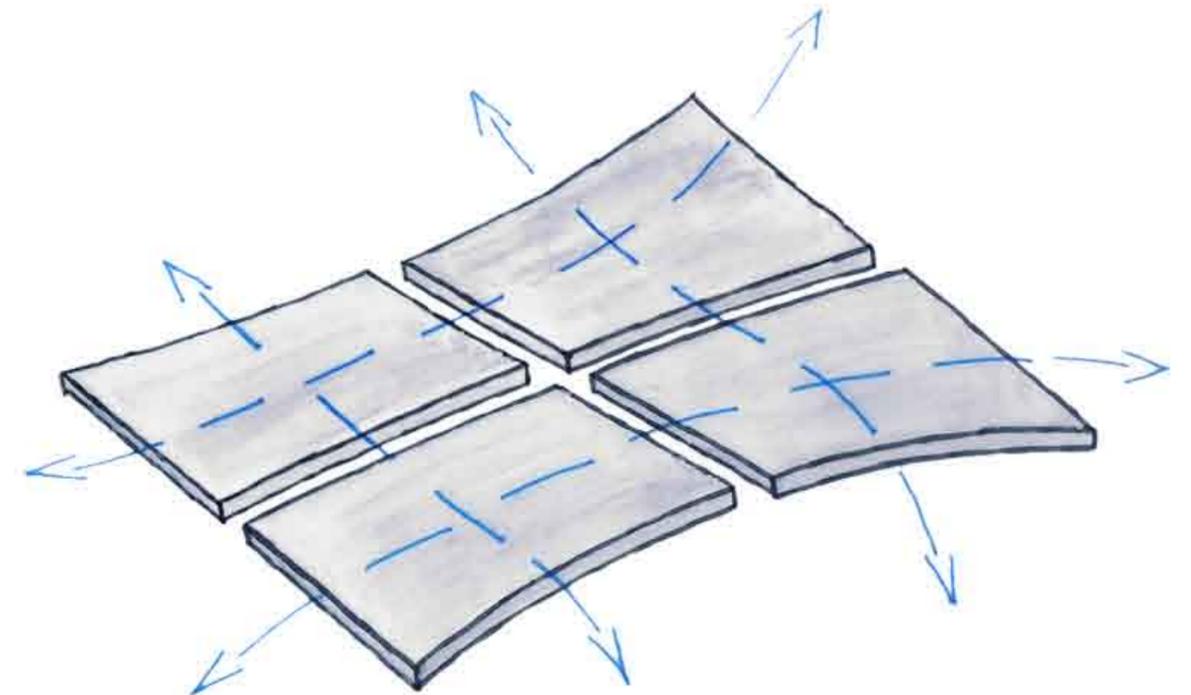
Möglichkeit 2: UHFB + Epoxidharzkleber | Textilbeton + Epoxidharzkleber

Vorteile:

- hohe Dauerhaftigkeit wegen der Materialeigenschaften
- Anwendung im Innen- und Außenbereich
- Werkstoffstärke wird nicht vom Verbindungssystem mitbestimmt, daher sind dünnerer Betonstärken möglich (UHFB ab ca. 3 cm, Textilbeton ab ca.1 cm)
- Verbindung ist nicht sichtbar

Nachteile:

- keine Flexibilität, fixe Installation, da ab einer gewissen Größe ein Transport nicht mehr möglich ist



19. Anwendungsmöglichkeiten von amorphen Betonfertigteilen

Möglichkeit 3: UHFB + Verbindungssystem + Epoxidharzkleber

Diese Kombination kam im Falle unseres concrete leafs zum Einsatz, da Vorteile von den ersten beiden genannten Punkten genutzt werden und die von uns gestellten Anforderungen an das Objekt mit dieser Variante am besten erfüllt werden konnten.

Vorteile:

- Flexibilität aufgrund von:
 - Montage/Demontage
 - Standortunabhängigkeit
- hohe Dauerhaftigkeit wegen der Materialeigenschaften
- Anwendung im Innen- und Außenbereich
- aufgrund der erzeugten Vorspannung können die Zugkräfte des ultrahochfesten Betons besser ausgenutzt werden
- Verbindung ist nicht sichtbar

Nachteile:

- Werkstoffstärke wird vom Verbindungssystem mitbestimmt (mind. 5 cm)

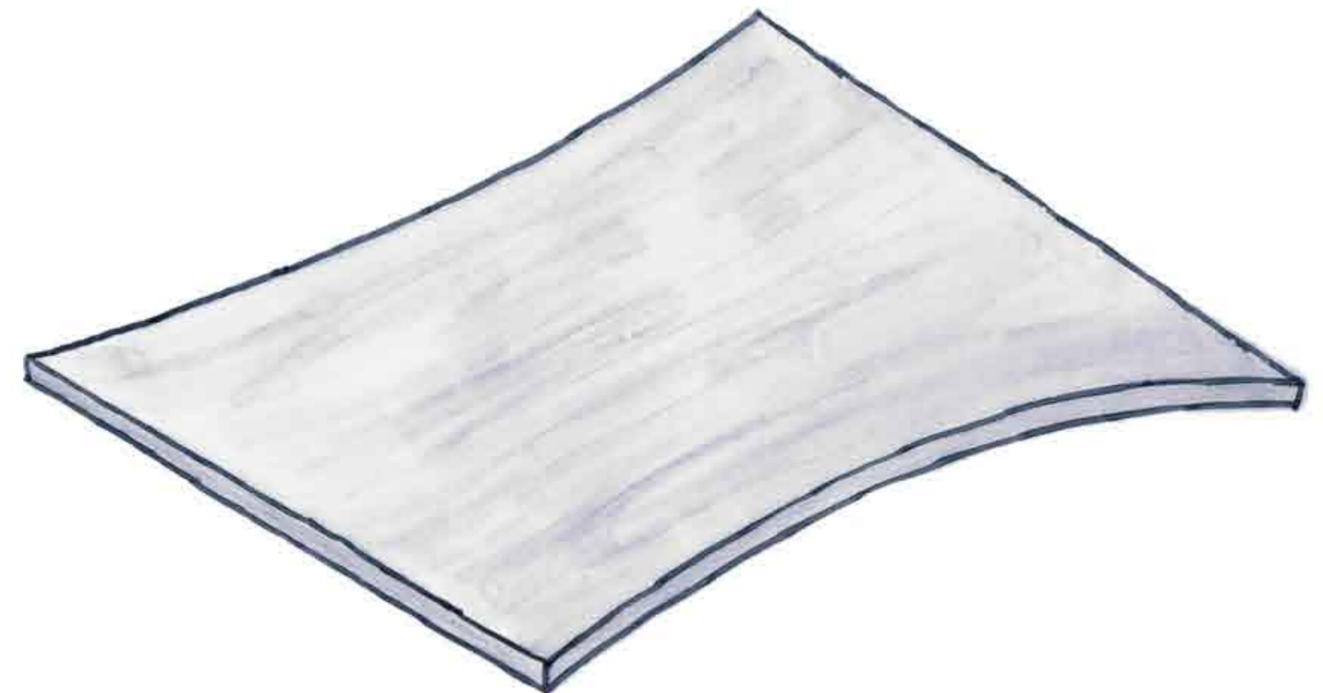
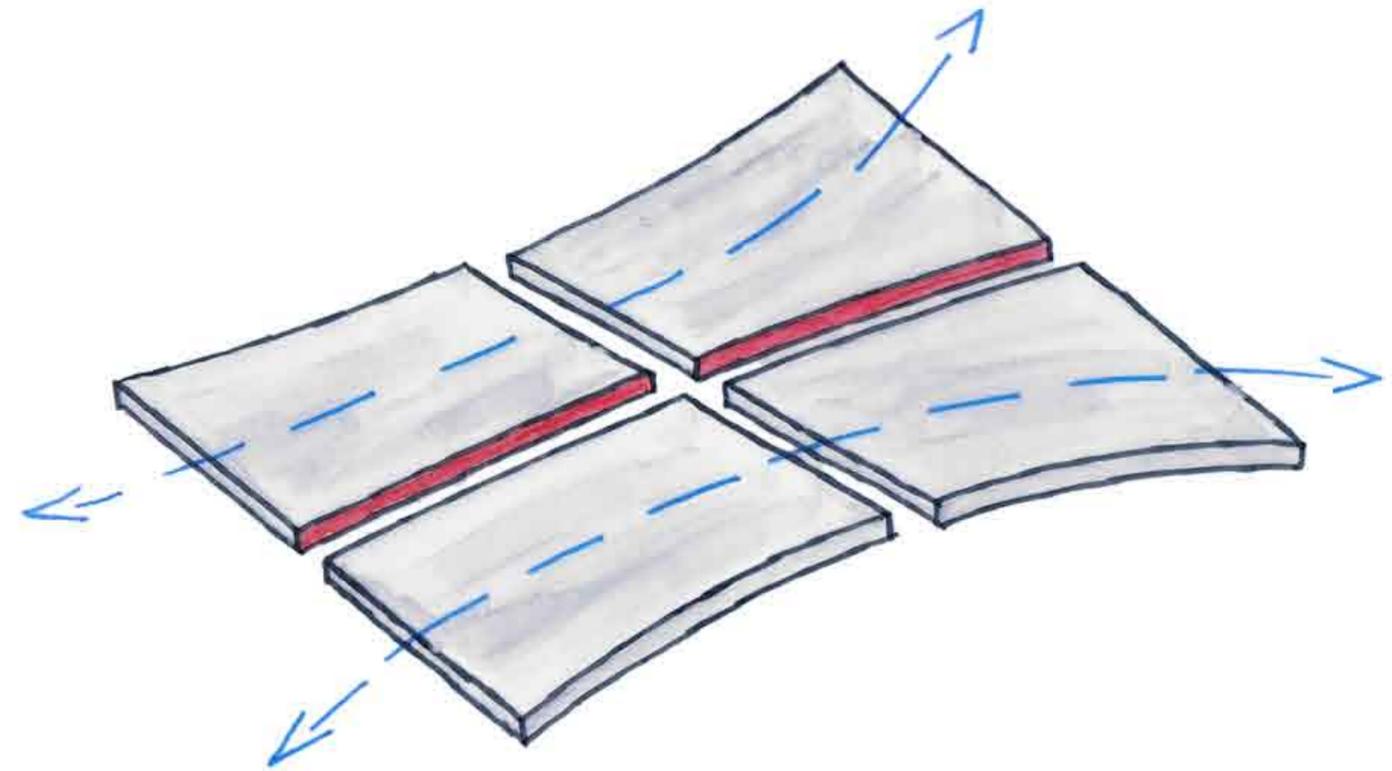
Möglichkeit 4: UHFB/Textilbeton als Einzelelement

Vorteile:

- Flexibilität aufgrund von:
 - Montage/Demontage
 - Standortunabhängigkeit
- hohe Dauerhaftigkeit wegen der Materialeigenschaften
- Anwendung im Innen- und Außenbereich

Nachteile:

- Größenbeschränkung aufgrund von Transport und Schalungsmöglichkeit



19. Anwendungsmöglichkeiten von amorphen Betonfertigteilen

Die in den vorderen Seiten angeführten Möglichkeiten sind je nach Anforderung anzuwenden, nachfolgend werden nun einige Anwendungsbereiche aufgezeigt.

Demontierbare Systeme für:

- Messebau
- Ausstellungen
- Museen

Demontierbare oder fixe Überdachungen für:

- Bus-, Bahn-, Straßenbahnhaltestellen
- Carport
- Radüberdachung

Demontierbares oder fixes Mobiliar für den Innen- u. Außenbereich:

- Sitzmöglichkeiten (Stühle, Bänke, Variationen von beiden...)
- Tische

Demontierbare oder fixe Kunst- und Designobjekte im Innen- und Außenbereich:

- Skulpturen
- Dekorelemente
- Leuchten

Demontierbar oder fixe:

- Fassadenelemente
- Verkleidungen
- Wand- u. Deckenbeleuchtung



Abb. 1: Entwurfsstudie einer Park + Ride Anlage Wien

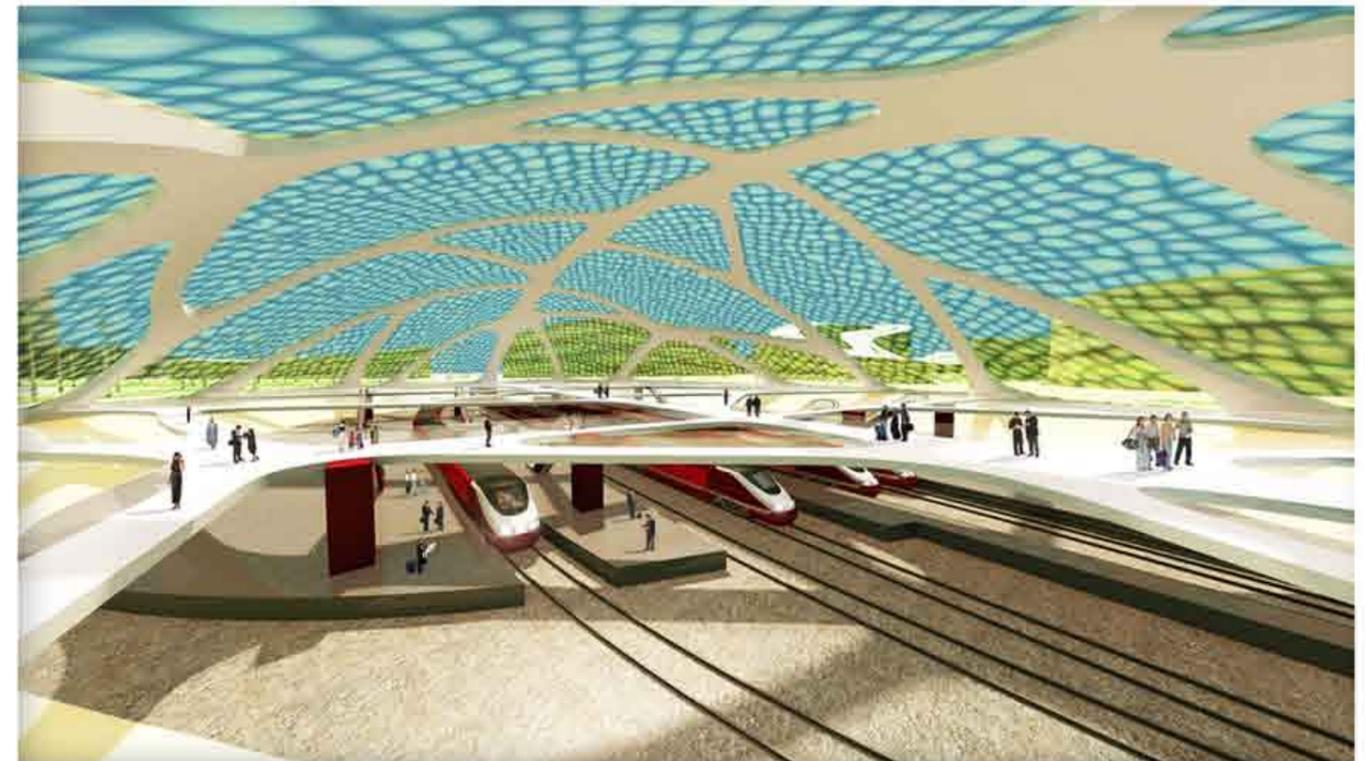


Abb. 3: Entwurfsstudie Bahnhof Graz

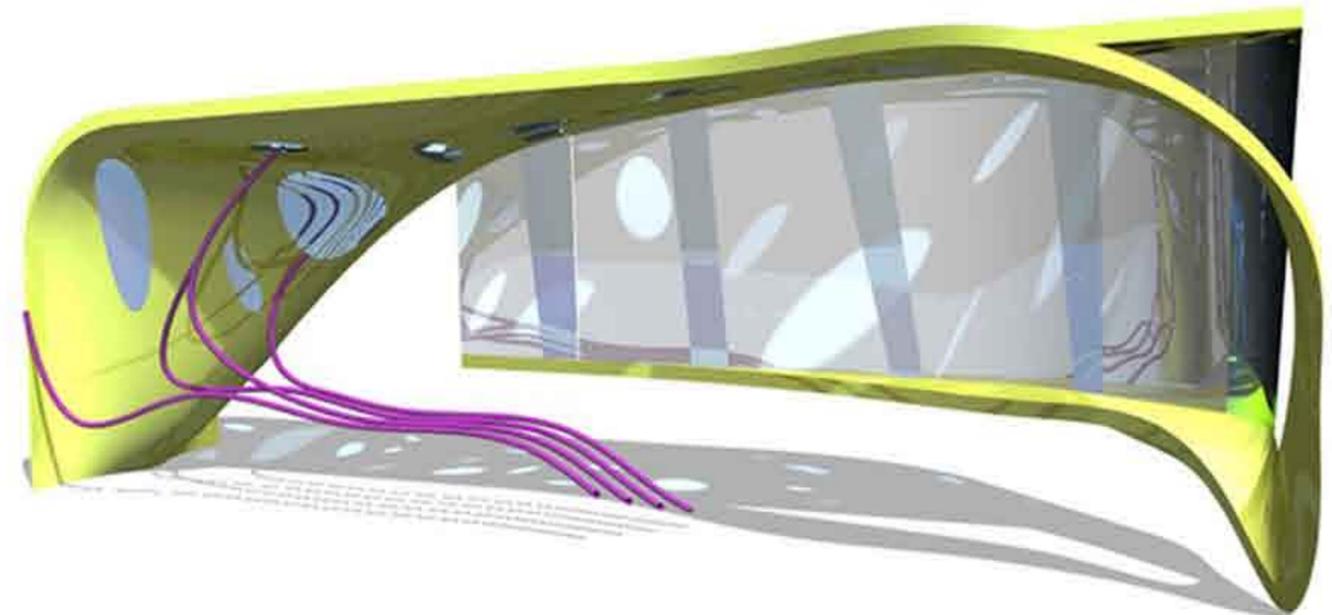


Abb. 2: Entwurfsstudie einer Bushaltestelle

20. Resümee

Die Zielsetzung dieser Diplomarbeit kann mit der dokumentarischen und von Versuchen begleiteten Prozessbeschreibung eines amorphen Objektes aus ultrahochfestem Beton von der Planung bis zum Bau beschrieben werden. Die Komplexität lag einerseits darin, schon erfolgte Abläufe, welche sich mit dieser Thematik beschäftigen, nachzuvollziehen und daraufhin deren Schwachstellen aufzuzeigen und andererseits in der Aufgabe neue Lösungsschemata zu finden und anzuwenden. Standardisierte Verfahren hatten im Gebiet des Bauens von frei im Raum gekrümmten Betonelementen bisher keine Gültigkeit, da jeder seine eigenen Wege beschritten hat. Uns war es wichtig mittels eines entworfenen Objektes, dem concrete leaf, solch einen Prozessablauf wiederzugeben, um eine Basis für diese Thematik zu schaffen. Parallel dazu konnte anhand der Entwicklung eines Fertigteilensystems für amorphe Betonbauteile eine praktikable Lösung aufgezeigt werden. Die von uns geforderte Flexibilität dieses Systems kann aufgrund seiner Demontierbarkeit gewährleistet werden. Doch auch der fixen Installation wurde Sorge getragen sowie auch der Verbindung dieser beiden Varianten.

Die anfangs definierte Zielsetzung, eine effiziente Möglichkeit für die Herstellung amorpher Betonbauteile zu finden, konnte schließlich gewährleistet werden. Der ineinander verschachtelte und teilweise äußerst komplizierte Ablauf bezüglich diverser Punkte hat jedoch letztendlich die Realisierung eines anfänglich geplanten amorphen Prototyps, welcher den Prozess nochmals untermauern sollte, verhindert. Doch die begleitenden Versuche, gemeint sind hier der Bau der Schalung für die geraden Testkörper, die Beschichtungsexperimente bezüglich dieser, der Test des Verbindungssystems in der ersten Phase sowie aber auch der anschließende Betoniervorgang mit UHFB haben zumindestens bei diesen Schritten realistische und haptisch fassbare Ergebnisse geliefert. Zudem wurde auf die Wiedergabe und Nachvollziehbarkeit der einzelnen Punkte besonderer Wert gelegt, um ein Verständnis der Arbeit auch ohne gebautem amorphen Prototyp zu gewährleisten.