



Christoph Mosinz, BSc.

Verfahren zur Herstellung der Fahrbahnträger – Fertigteile im Projekt QUICKWAY

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Mitbetreuender Assistent

Dipl.Ing. Josef Linder

Graz, Mai 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meiner Studienzeit und speziell beim Verfassen meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Großen Dank möchte ich an Dipl. Ing. Dr. techn. Bernhard Freytag aussprechen. Durch seine freundliche und kompetente Art, weckte er mein Interesse zu diesem Thema. Bei den Besprechungen und Verfassen der Arbeit stand er mir stets mit Ratschlägen und hilfreichen Tipps zur Seite. Er ermöglicht mir auch die Räumlichkeiten am LKI rund um die Uhr zu nutzen. Für diese vorbildliche Unterstützung bin ich Ihm sehr dankbar.

Auch an Dipl. Ing. Josef Linder möchte ich mich an dieser Stelle bedanken. Mit seinem Fachwissen konnte er mir bei Unklarheiten weiterhelfen und auch bei sonstigen Fragen fand er stets Rat und Zeit für mich.

Mein Dank gilt ebenfalls allen Mitarbeitern des LKI, des Betonbauinstituts, Holzbauinstituts und Institut für Tragwerksentwurf, die an dieser Arbeit beteiligt waren. Für die freundliche Atmosphäre am Arbeitsplatz, den produktiven Kaffeepausen und der Unterstützung zur Herstellung und Bearbeitung der Bauteile möchte ich mich vielmals bedanken.

Bei meinen Studienkollegen des Geotechnik Zeichensaals und Freunden möchte ich mich für eine unvergessliche Studienzeit in Graz bedanken.

Einen ganz besonderen Dank gebührt meinen Eltern und Geschwistern, die mich während meiner gesamten Ausbildungszeit unterstützt und stets den Rücken gestärkt haben.

Kurzfassung

Der Verkehrsproblematik auf Grund des rapide ansteigenden Bevölkerungswachstums in Großstädten wird derzeit vor allem durch den Bau von U-Bahnen oder anderen Transitsystemen (z.B. Bus Rapid Transit) entgegengewirkt. Diese bestehenden Massenbeförderungssysteme sind jedoch zu wenig flexibel, um die Verkehrssituation zu entschärfen.

Das von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderte Forschungsprojekt „QUICKWAY“ bietet durch ein umfassendes Mobilitätskonzept einen zukunftsweisenden Lösungsansatz. Dieses Konzept basiert auf zusätzlichen Verkehrsflächen in Form von schlanken, kreuzungsfrei geführten Hochfahrwegen für den Individualverkehr. Die dafür notwendige bauliche Infrastruktur muss schnell realisierbar, kostengünstig und dauerhaft sein.

Zu diesem Zweck wurde ein Fertigungskonzept für eine modulare Fertigteilmontage entwickelt. Anhand dieses wird in der vorliegenden Arbeit auf die Herstellung des Fahrbahnträgers aus stahlfaserverstärktem UHPC (Ultra High Performance Concrete) eingegangen.

Da die Ausrichtung der Stahlfasern und damit das Zugtragverhalten des UHPCs stark vom Fließprozess des flüssigen Betons abhängig ist, wird dieser näher untersucht. Dazu wird eine geeignete Befüllmethode erarbeitet und in einer Schalung im Maßstab 1:1 getestet. Zu dessen Überprüfung, werden die Faserorientierung- und Verteilung ermittelt und anschließend analysiert.

Für einen späteren Großversuch wird ein Versuchsträger im Maßstab 1:2 gefertigt. Dazu wird ein geeignetes Schalungssystem entwickelt.

Abstract

Due to the rapid population growth in large cities and the ensuing traffic problems, subways or other transit systems (for example Bus Rapid Transit) are built to counteract this. However, these existing mass transit systems are not flexible enough to defuse the traffic situation.

The research project "QUICKWAY", funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG), provides a comprehensive alternative mobility concept as pioneering solution approach. This concept is based on additional traffic areas in the form elevated roadways without crossroads for the private transport. The necessary building infrastructure must be quickly implemented, cost-effective and durable.

For this purpose, a manufacturing concept for a modular precast construction has been developed. Based on this, the present work deals with the production of the girders made of fiber- reinforced UHPC (Ultra High Performance Concrete).

Since the orientation of the steel fiber and thus the tensile behavior of UHPC are highly dependent on the flow process of the liquid concrete, this is investigated further. For this purpose a suitable casting method is prepared and tested in a formwork in scale 1:1. To verify the method, the fiber ordination and fiber distribution determined and then analysed.

For a later large scale experiment, a test beam in a scale of 1:2 is manufactured. In addition a suitable formwork system is developed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Projekt QUICKWAY [1].....	1
1.1.1	Verkehrssystem (QUICKTRAFFIC) [1]	2
1.1.2	QUICKNET [1]	4
1.1.3	Bauliches Konzept	6
1.1.4	Bauweise [1]	8
1.1.5	Fertigung.....	9
1.1.6	QUICKWAY Zusammenfassung	9
1.2	Aufgabenstellung / Ziel / Abgrenzung	10
2	Stand der Technik	11
2.1	Ultrahochfester Beton	11
2.1.1	Ausgangsstoffe [4]	12
2.1.2	Mischen von UHPC.....	13
2.1.3	Frischbetoneigenschaften	13
2.1.4	Festbetoneigenschaften	15
2.1.5	Einflüsse des Materialverhaltens von faserbewehrtem UHPC	17
2.1.6	Ermittlung der Faserorientierung/ Verteilung	20
2.1.7	Schwinden	25
2.1.8	Kriechen.....	26
2.1.9	Dauerhaftigkeit.....	26
2.2	Schalungsbau allgemein	27
2.2.1	Formgebung.....	27
2.2.2	Konventionelle Schalungsmaterialien	27
2.2.3	Holz- Holzwerkstoffe	28
2.2.4	Kunststoff.....	28
2.2.5	Stahl	28
2.2.6	Papier	28
2.3	Herstellung von Brückenträgern mit Kastenquerschnitt aus Normalbeton.....	29
2.3.1	Freivorbauverfahren – Ortbetonbauweise	29
2.3.2	Freivorbau mit Fertigteilen (Segmentbauweise)	29
2.3.3	Taktschiebeverfahren.....	30
2.4	Brücken aus UHPC.....	31
2.4.1	Segmentbrücken mit Trockenfugen.....	31
2.4.2	Brücken mit Verbundquerschnitten UHPC-Normalbeton	35
3	Fertigungskonzept QUICKWAY - Fahrbahnträger	37
3.1	Herstellungsverfahren für den Fahrbahnträger	38
3.1.1	Außenschalung:	38
3.1.2	Innenschalung:.....	40
3.1.3	Stirnschalung:	41
3.2	Befüllmethoden	43
3.3	Ausschalen	44
4	Experimentelle Untersuchungen zum Befüllvorgang	47
4.1	Ziel der Untersuchungen	47
4.2	Versuchsanordnung und Auswertekonzept (methodisch)	47
4.3	Schalungsbau	49
4.3.1	Acrylglas [27]	51
4.3.2	Einzelteile, Fertigung.....	53
4.3.3	Zusammenbau/Gesamtmontage	54

4.4	Erster Befüllversuch und Ergebnisse.....	59
4.4.1	Betonage	60
4.4.2	Analyse des Fließprozesses.....	61
4.4.3	Ausschalen und Oberfläche	63
4.4.4	Faserorientierung-, Verteilung.....	68
4.4.5	Fazit.....	68
4.5	Zweiter Befüllversuch: (Umlenkconsolen).....	69
4.5.1	Betonage	71
4.5.2	Analyse des Fließprozesses.....	72
4.5.3	Ausschalen und Oberfläche	73
4.5.4	Faserverteilung	77
4.5.5	Brüstung unterer Bereich	78
4.5.6	Hohlkasten Steg.....	79
4.5.7	Fahrbahn	80
4.5.8	Faserorientierung.....	82
4.5.9	Betonfluss Brüstung Fahrbahn	83
4.5.10	Betonfluss Hohlkasten.....	84
4.5.11	Fazit.....	85
5	Entwicklung eines Schalungssystems für den Großversuch	87
5.1	Herstellungskonzept.....	88
5.2	Schalungsbau des ersten Fahrbahnträgers	90
5.2.1	Außenschalung	90
5.2.2	Konterschalung	91
5.2.3	Innenschalungssystem.....	92
5.2.4	Schlauchversuch.....	99
5.2.5	Modifikation an Schlauchvariante	103
5.2.6	Zug-, Drucksicherung.....	104
5.2.7	Einzelteile Fertigung.....	106
5.2.8	Beschichtung	108
5.2.9	Bemessung	109
5.2.10	Zusammenbau/Gesamtmontage	126
5.3	Betonage	132
5.4	Ausschalen	133
5.4.1	Oberfläche	137
5.5	Fazit.....	138
6	Zusammenfassung und Ausblick	139
6.1	Zusammenfassung.....	139
6.2	Ausblick	140
7	Literaturverzeichnis	141
8	Abbildungsverzeichnis	145
9	Tabellenverzeichnis	151
Anhang A.1	Betonage 1.Befüllversuch M1:1	153
A.1.1	Beton	153
A.1.2	Materialien	153
A.1.3	Mischzusammensetzung.....	154
A.1.4	Mischprozess	155
A.1.5	Betonierprotokoll: (QUICKWAY 1. Befüllversuch vollmaßstäblich).....	155

Anhang A.2	Trennmitteltest vor zweiter Betonage	161
A.2.1	Betonage	162
A.2.2	Ausschalen/Analyse	162
A.2.3	Rheofinish 323P	163
A.2.4	PTFE-Trennspray	164
A.2.5	Tectol Formenöl RC 120	165
A.2.6	Tectol Supercast 3100	166
A.2.7	Fazit	167
Anhang A.3	Betonage 2.Befüllversuch M1:1	169
A.3.1	Beton	169
A.3.2	Mischung	169
A.3.3	Mischzusammensetzung	170
A.3.4	Mischprozess	171
A.3.5	Betonierprotokoll: (QUICKWAY 2. Befüllversuch vollmaßstäblich)	171
Anhang A.4	Faserverteilung Datenblätter	175
A.4.1	Messpunkte	175
A.4.2	Messpunkte Stirnseite	175
A.4.3	Brüstung oberer Bereich	176
A.4.4	Brüstung unterer Bereich	177
A.4.5	Bereich Auskragung an Einfüllseite	178
A.4.6	Bereich Auskragung an Austrittseite	179
A.4.7	Fahrbahn Zweigstelle an Einfüllseite	180
A.4.8	Fahrbahn Zweigstelle linke Seite	181
A.4.9	Fahrbahn	182
A.4.10	Hohlkasten Stege	183
A.4.11	Hohlkasten Bodenplatte	184
A.4.12	Umlenkkonsolen	185
A.4.13	Stirnseite Brüstung oberer Bereich	186
A.4.14	Stirnseite Brüstung unterer Bereich	187
A.4.15	Stirnseite Zweigstelle rechte Seite	188
A.4.16	Stirnseite Zweigstelle linke Seite	189
Anhang A.5	Faserorientierung Datenblätter	191
A.5.1	Messpunkte Betonfluss Fahrbahn und Hohlkasten	191
A.5.2	Betonfluss Brüstung Fahrbahn	192
A.5.3	Betonfluss Hohlkasten	194
Anhang A.6	Betonage Versuchsträger M1:2	195
A.6.1	Beton	195
A.6.2	Mischung	195
A.6.3	Betonierprotokoll	195
A.6.4	Mischzusammensetzung	196
A.6.5	Mischprozess	197
A.6.6	Betonierprotokoll: (QUICKWAY Herstellung Versuchsträger)	197
Anhang A.7	Detailpläne	205

1 Einführung

1.1 Projekt QUICKWAY [1]

QUICKWAY ist ein Forschungsprojekt für eine zukunftsweisende Lösung des globalen städtischen Verkehrsproblems. Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, ein effizientes und umweltfreundliches Mobilitätssystem für den Personen- und Kleingüterverkehr zu finden, dessen Umsetzung in kurzer Bauzeit und wirtschaftlich durchführbar ist.

Der Kopf, Ideengeber und Leiter dieses Projektes ist der em. Univ.-Prof. DI. Dr. Lutz Sparowitz, der das QUICKWAY-Konzept entwickelt hat. Gemeinsam mit einer Gruppe von hoch qualifizierten Fachleuten, aus Industrien und Forschungseinrichtungen kommend, strebt dieses Quickway- Team die Entwicklung der notwendigen Technologien bis zur Praxisreife an. Hierfür sind umfangreiche Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf verschiedenen Fachgebieten notwendig, deren Ergebnisse schließlich die Funktionalität des Gesamtsystems sicherstellen sollen.

Das QUICKWAY-System umfasst folgende Bereiche:

- Verkehrssystem (QUICKTRAFFIC)
 - Überdachung
- Verkehrsnetz (QUICKNET)
- Bauliches Konzept
 - Konstruktion
 - Fertigung
 - Bauweise

Der anzustrebende Markt für QUICKWAY liegt nicht in Europa, sondern vor allem in Schwellenländern mit rasch wachsender Bevölkerung. Die Entwicklung der Steuerung für den Verkehrsfluss und der Fahrzeuge sowie die Fertigung des Verkehrssystems soll aber in Österreich durchgeführt werden. Die Infrastruktur zur Errichtung kann dann im Umfeld der QUICKWAY-Städte errichtet werden. Es soll aber gegebenenfalls auch möglich sein, einzelne Segmente in zentralen Fertigungsanlagen zu produzieren und diese dann in Containern weltweit zu verschicken [1].

1.1.1 Verkehrssystem (QUICKTRAFFIC) [1]

Im Wesentlichen beruht das QUICKWAY-System auf zusätzlich zu schaffenden Hochfahrwegen. Diese Hochfahrwege sind mit einem lichtdurchlässigen und witterungsresistenten Textil überdacht, das wie ein riesiger Sonnen- bzw. Regenschirm nicht nur die Hochfahrwege, sondern auch die Fußgänger- und Radwege vor der Witterung schützt (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: geplante Anordnung eines QUICKWAYS [1]

Das QUICKTRAFFIC-System umfasst den Fußgänger-, Zwei-, und Vierrad-Verkehr, wobei ausschließlich handelsübliche Fahrzeuge mit umweltfreundlichen Antriebstechnologien (Elektroantrieb) zum Einsatz kommen.

Unter den Vierradfahrzeugen sind nur Lieferwagen, Kleinbusse, Taxis, Firmen- und Privatautos gemeint, die in ihren Abmessungen ($L \leq 7.0\text{m}$, $B \leq 2.0\text{m}$, $H \leq 3.5\text{m}$) und in ihrem Gewicht ($G \leq 3,5\text{t}$) limitiert sind. Dabei handelt es sich bei all diesen Fahrzeugen, die auf der QUICKWAY-System verkehren, um autonome (selbstfahrende, bzw. fahrerlose) Fahrzeuge. Bei dem Zweiradverkehr sind einfache Fahrräder, E-Mopeds oder E-Roller und E-Motorräder gemeint, die eine leistungsfähige und selbstorganisierende Komponente des QUICKTRAFFIC-Systems sind.

Zur Optimierung des Verkehrsflusses soll neben den fahrzeugspezifischen Steuerungssystemen noch ein weiteres übergeordnetes Verkehrssteuerungssystem, das QUICKWAY Navigation System (QNS) existieren. Dieses Navigationssystem koordiniert die Verkehrsflüsse der gesamten Stadt bestmöglichst. Es kennt den Startpunkt und den Zielpunkt, sowie eventuelle Zwischenziele aller gerade aktiv oder passiv im Einsatz befindlichen Fahrzeuge der Stadt. Das QNS übermittelt in Echtzeit allen Fahrzeugen ihre optimale Route. Die autonomen Fahrzeuge werden vom QNS automatisch entlang ihrer Route geführt. Außerdem kommunizieren sie über Sensoren mit den Fahrbahnrandern und mit den anderen Fahrzeugen in ihrem Umfeld. Die konventionellen Fahrzeuge zu ebener Erde folgen ebenfalls den Weisungen des QNS.

Unter den Hochfahrwegen sind Geh- und Radwege angeordnet. Durch die durchgehende Überdachung können der Fußgänger- und Radverkehr ganzjährig witterungsgeschützt betrieben werden.

1.1.1.1 Überdachung [1]

Wie schon zuvor erwähnt, ist über den QUICKWAY eine textile Überdachung. Diese ist nicht nur dazu gedacht, den darunter liegenden Verkehr vor der Witterung zu schützen sondern dient auch der Energiegewinnung. An der Dachoberfläche sind Photovoltaik-Elemente angeordnet, die das Sonnenlicht in elektrische Energie umwandeln. Diese erneuerbare Energiequelle kann dann für den Antrieb der elektrischen Fahrzeuge genutzt werden (siehe Abbildung 2).

Über die darunterliegende Textilfläche ist der Sonnenschutz gegeben. Er reduziert den Energiebedarf für die Klimatisierung der Fahrzeuge und ermöglicht auch das Radfahren in heißen Ländern. Durch eine ausgeklügelte Konstruktion der Überdachung kann das Regenwasser aufgesammelt werden. Das Wasser wird in den Stützen zu Zisternen geleitet und kann beispielsweise für die Bewässerung der Grünflächen verwendet werden (siehe Abbildung 2).

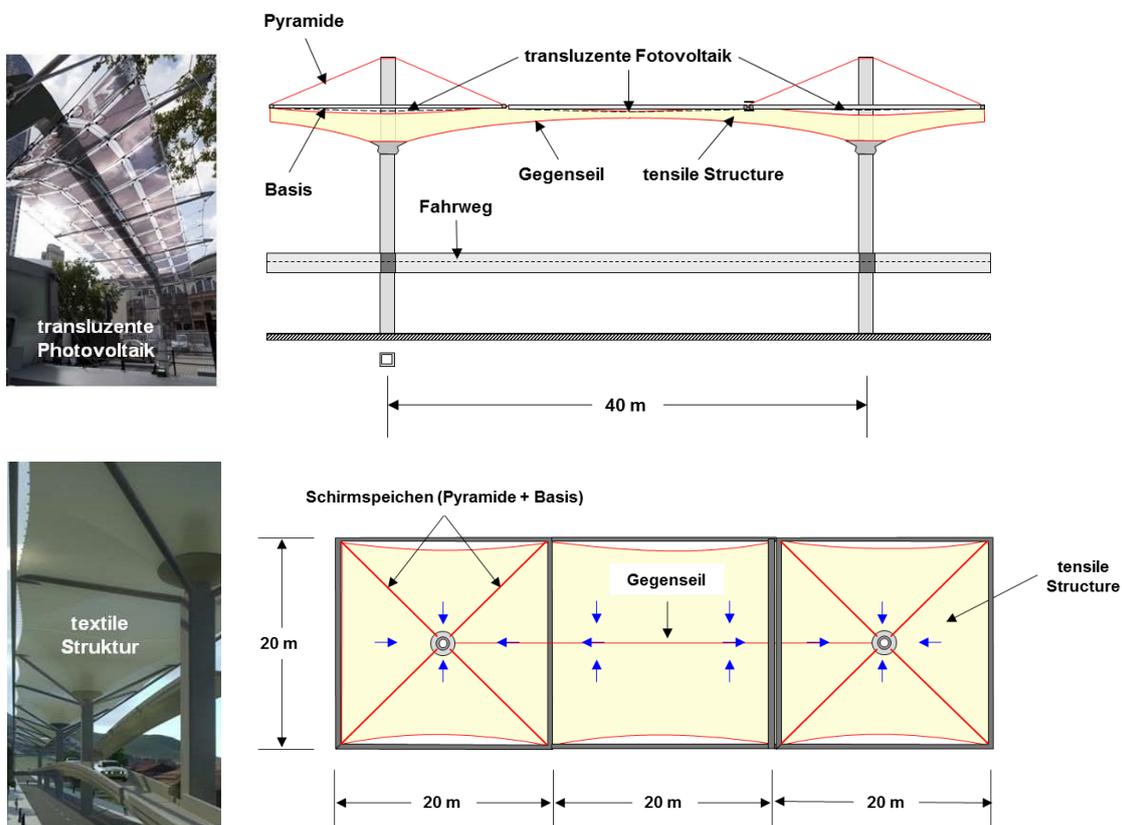


Abbildung 2: Prinzip der Überdachung mit Photovoltaik und Regenwasserableitung [1]

Die Überdachung kann, muss aber nicht errichtet werden, den gegen den Bau sprechen die Kosten, sowie die Tatsache, dass das QUICKTRAFFIC-System auch ohne Überdachung funktioniert (siehe Kapitel 1.1.1). Für die Effizienz des Gesamtsystems ist sie aber unverzichtbar. Es besteht auch die Möglichkeit, die Überdachung erst später zu ergänzen.

1.1.2 QUICKNET [1]

Über der gesamten Stadt wird ein feinmaschiges Netz gelegt (Abbildung 3). Damit sich die Hochfahrwege in das Stadtbild bestmöglich integrieren, sind die QUICKWAY's vorwiegend als Einbahnsystem konzipiert (sekundäres Netz). Lediglich die breiten Durchzugsstraßen (Stadtautobahnen) werden mit zwei gegeneinander orientierten Fahrwegen konzipiert (primäres Netz). Das QUICKNET ersetzt die mehrspurigen Straßen zu ebenen Erde (Level 0), durch einspurige Fahrwege auf den Levels 1 und 2. Am Level 1, in etwa 5.5 m Höhe über der Straße, wird eine neue zusätzliche Verkehrsfläche geschaffen, die den Verkehr zu ebenen Erde wesentlich entlastet. Der konventionelle Verkehr am Level 0 kann weiterhin unter dem QUICKNET weitgehend ungehindert ablaufen. Am Level 0 soll aber letztlich nur der Zubringerverkehr verbleiben.

Das QUICKNET besteht aus längslaufenden Transitspuren und aus querlaufenden Transfer Spuren. Die Fahrrichtung dieser Einbahn-Hochfahrwege (in Abbildung 3 durch türkis und grün unterschieden) wechselt jeweils auf benachbarten Fahrspuren. Die Netzmaschen sind in Abbildung 3 als blau gekennzeichnete Fahrspuren sogenannte Loops eingeschrieben.

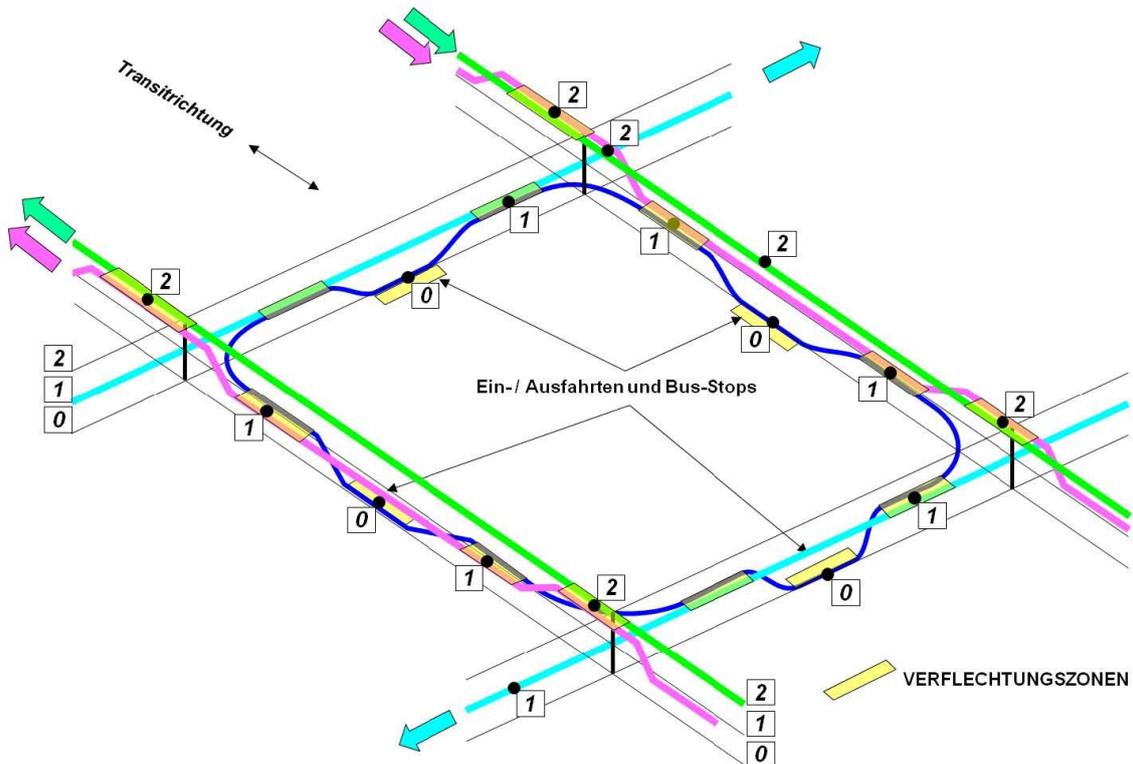


Abbildung 3: Standard QUICKNET-Masche mit Fahrspuren auf den Levels 0, 1 und 2 [1]

An jeder Netzmasche können bis zu acht Verflechtungszonen und bis zu vier Abbiegekurven enthalten sein. Des Weiteren können an allen Seiten einer Netzmasche jeweils eine Abfahrtsrampe zum Level 0, eine Haltestelle für die öffentlichen Verkehrsmittel (siehe Abbildung 4 und eine Auffahrtsrampe vom Level 0 zum Level 1 angeordnet werden.



Abbildung 4: Bushaltestelle [1]

Im Bereich der Kreuzungen wird die Transferspur am Level 2 in 10.5 m Höhe geführt. Diese Transferspur ist vergleichbar mit einer Überführung bei Autobahnen. Dadurch können die beiden Verkehrsströme einander ungehindert gekreuzt werden (Abbildung 5).

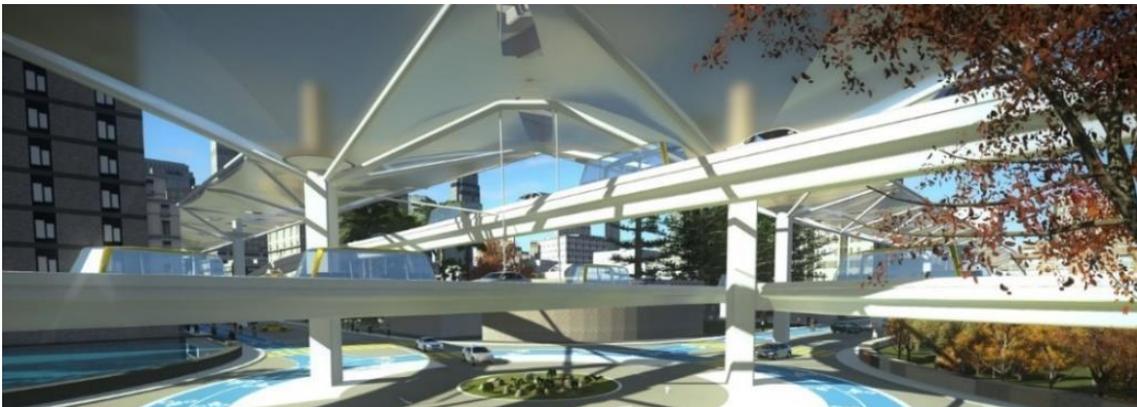


Abbildung 5: Die Fahrwege kreuzen einander auf unterschiedlicher Höhe [1]

Diese Anordnung ist besonders wichtig, da damit der Verkehr flüssig gehalten und die Verkehrsleistung vervielfacht wird. Somit werden die niveaugleichen Kreuzungen in heutigen Städten und den damit verbundenen üblichen „Stop&Go-Verkehr“ im QUICKWAY-System ausnahmslos vermieden.

Bei Bedarf können am Level 3 weitere Hochfahrwege angeordnet werden. Damit lässt sich die Kapazität des Systems entsprechend erhöhen.

1.1.3 Bauliches Konzept

Zum Projekt QUICKWAY gehört nicht nur das Verkehrskonzept sondern auch die gesamte bauliche Infrastruktur, die man für das QUICKNET benötigt. Dabei ist es sehr wichtig, dass das Erscheinungsbild der Hochfahrwege (inklusive Verflechtungszonen, Kurven, Rampen und Haltestellen) höchsten ästhetischen Ansprüchen gerecht wird, damit sich QUICKWAY harmonisch in das Stadtbild einfügt und von der Bevölkerung wohlwollend angenommen wird. Zusätzlich müssen die QUICKWAY's auch strenge Kriterien hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Sicherheit erfüllen. Dafür werden alle Bauteile des QUICKWAY Systems aus UHPFRC bestehen. Die gesamte QUICKWAY-Infrastruktur ist derart konzipiert, dass sie relativ widerstandsfähig gegen Erdbeben und Tsunami ist [1].

1.1.3.1 Konstruktion [1]

Die Konstruktion des QUICKWAY-System beruht auf ein einfaches Baukastensystem. Diese besteht nur aus wenigen UHPC-Fertigteilen (außer die Fundierung), die sich zusammensetzen lassen. Dabei sind alle Teile wieder zerstörungsfrei zerlegbar, um sie, wenn möglich, an anderer Stelle wieder zusammenzubauen. Somit lassen sich Trassenänderungen und Erweiterungen problemlos durchführen.

Die Abbildung 6 zeigt schematisch jene Bauteile, aus denen sich das QUICKWAY-System zusammensetzt. Vom Stützenfuß über die geraden und im Grund- und Aufriss gekrümmten Segmente des Fahrweges, bis hinauf zu den Stäben und Knoten der Dachkonstruktion. Des Weiteren sind noch Rampen und Stationen für das QUICKWAY-System zu fertigen.

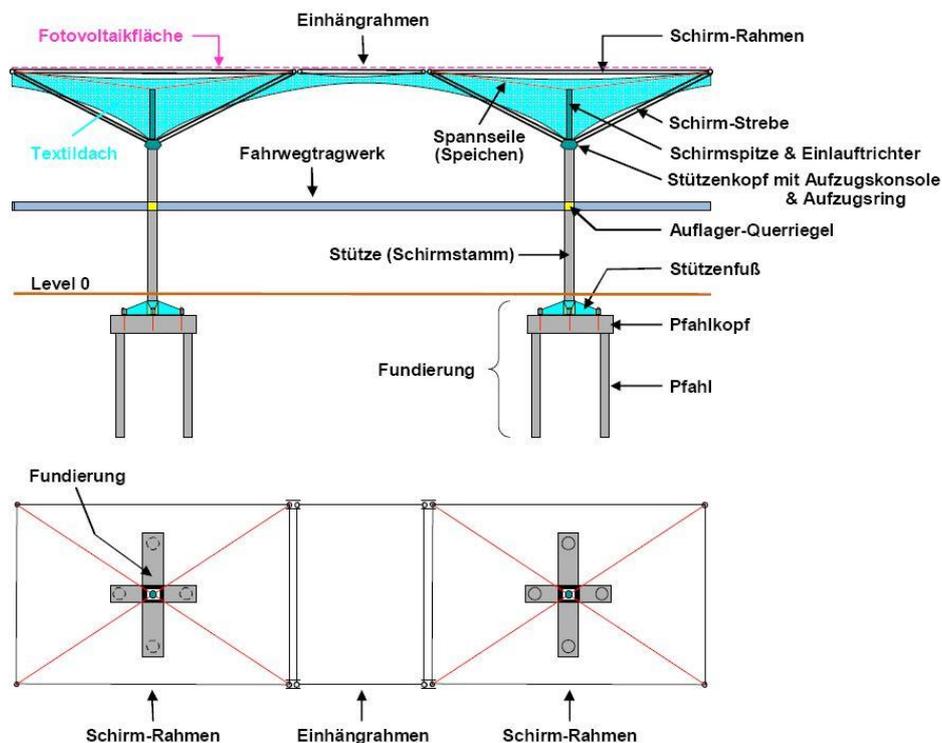


Abbildung 6: Teile des Gesamtsystems [1]

1.1.3.2 Standardquerschnitt [1]

In Abbildung 7 ist der Standardquerschnitt dargestellt. Die Fahrbahn ist beiderseits durch Brüstungen (Leitgeländer) begrenzt. Diese verhindern im Falle eines technischen Defektes ein Abstürzen des Fahrzeuges, indem es wie in einer Bobbahn von ihnen wieder auf die Fahrspur zurückgeführt wird. Die Brüstungen sind auch statisch wirksam. Die Biegedruckzone des Querschnittes befindet sich im verbreiterten oberen Bereich der Brüstungen. Dadurch lässt sich das Tragwerk schlanker gestalten. Die geschlossene Brüstung dämpft außerdem auch die Abrollgeräusche der Fahrzeuge.

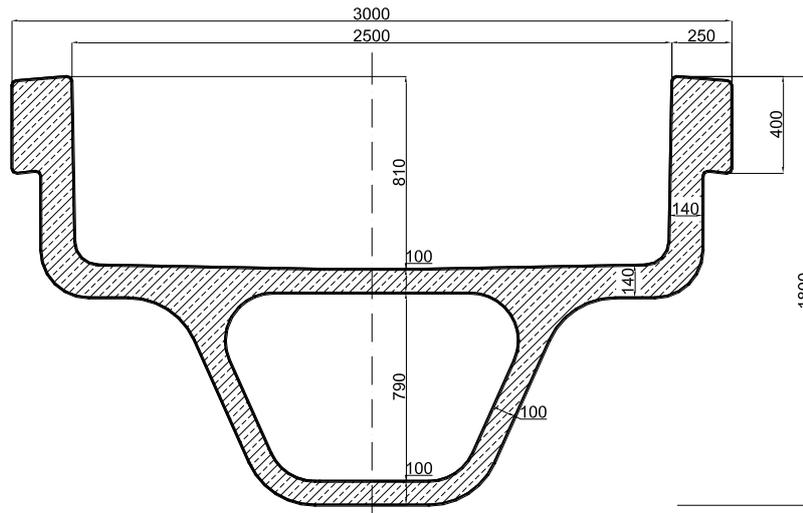


Abbildung 7: Standardquerschnitt

1.1.3.3 Statische System [1]

Das statische System besteht aus einer Aneinanderreihung von Einfeldträgern (Abbildung 8). Diese liegen auf Querriegeln (in Abbildung 8 gelb dargestellt), die von den Stützen auskragen. Bei Kurven werden sie zur Ableitung der Torsionsmomente als Drei- oder Mehrfeldträger ausgeführt. Als Lager dienen Neoprenlager (schwimmende Lagerung). An beiden Enden der Einfeldträger befinden sich Dehnfugen.

Die Standardspannweite der Einfeldträger beträgt ca. 40m. Die Spannweiten können aber zwischen 30m und 50m variieren. Angestrebt wird, mit einer beschränkten Anzahl unterschiedlicher Spannweiten, um die Fertigungszeit niedrig zu halten. Wenn es die örtlichen Gegebenheiten erfordern, können als Sonderanfertigungen natürlich auch Tragwerke mit größeren oder geringeren Spannweiten ausgeführt werden.

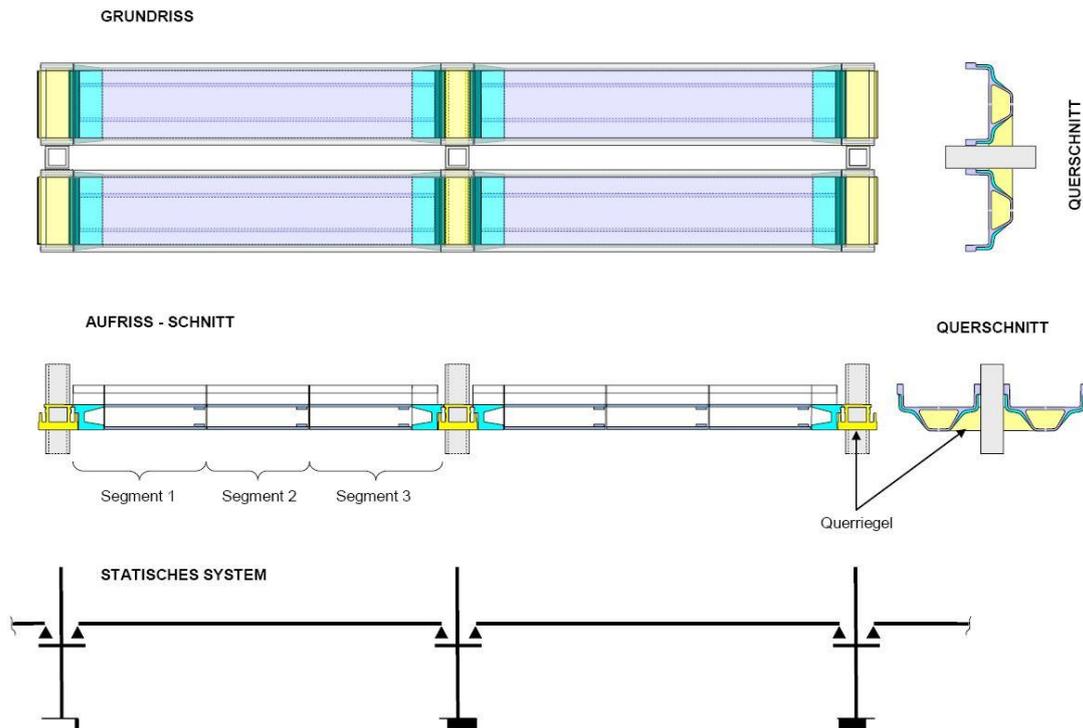


Abbildung 8: Fahrwegträger auf von den Stützen ausragenden Querriegeln aufliegend [2]

1.1.4 Bauweise [1]

Die QUICKWAY-Bauweise ist eine Segmentbauweise, jedoch erstrecken sich die Fahrbahnträger in Längsrichtung über 12,5 m und nicht nur über 2,5 m (wie bei der üblichen Segmentbauweise). Somit muss eine völlig neue Bauweise entwickelt werden. Die Segmente werden auf der Baustelle aneinandergereiht und mittels einer externen Vorspannung gegeneinander gepresst. Die Kontaktflächen zwischen den Segmenten werden als Trockenfugen ausgebildet. Anschließend werden die zusammengespannten Segmente hochgehoben und in die Querriegel eingehängt.

1.1.4.1 Bauzeit [1]

Geplant ist eine Bauzeit von max. 5 Jahren für das gesamte Netz. Das ist eine extrem kurze Bauzeit, wenn man bedenkt wie groß das QUICKWAY-Netz für Singapur (ca. 1277km) ist. Das entspricht einer Tagesleistung von mindestens 700 lfm/Tag. Dies ist nur bei einer Aufteilung auf ca. 10 Baustellen möglich, wobei in etwa 2 Felder pro Kalendertag und Baustelle fertiggestellt werden sollen (siehe Abbildung 9)

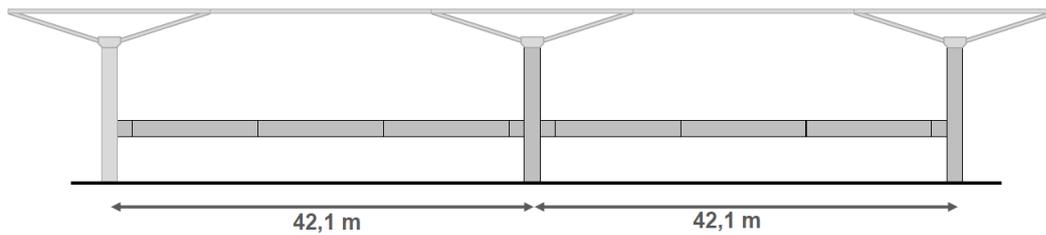


Abbildung 9: Zwei Felder einer Baustelle

1.1.5 Fertigung

Wie schon zuvor erwähnt, bestehen die Fertigteile aus UHPC, genaugenommen aus UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete). Dadurch lassen sich besonders dünnwandige und damit leichte und elegante Tragkonstruktionen entwerfen

Dieses Material zeichnet sich durch seine hohe Festigkeit und Dauerhaftigkeit aus und besitzt ein extrem dichtes Gefüge bzw. einen sehr geringen Porenanteil. Richtig konstruierte UHPFRC-Tragwerke können mit einem minimalen Wartungsaufwand eine Nutzungsdauer von mehr als 200 Jahren erreichen.

Aufgrund der Materialeigenschaften (UHPC mit Stahlfasern), der schlanken Konstruktion, der Segmentbauweise und der kurzen Bauzeit, ist ein Fertigungskonzept für die Fahrbanträgerfertigteile entwickelt worden (siehe Kapitel 3).

1.1.6 QUICKWAY Zusammenfassung

QUICKWAY ist ein zukunftsweisender Lösungsansatz für die erhöhte Verkehrsproblematik. Mit den angewendeten Technologien ist es umweltfreundlich, trägt zur Energiegewinnung und Wasserspeicherung bei und steigert die Lebensqualität in Großstädten.

Grundsätzlich könnte man das QUICKNET- System auch unterirdisch realisieren. Dies würde aber wie bei U-Bahnen zu einer wesentlichen Erhöhung der Herstellungskosten und zu einer gravierenden Verlängerung der Bauzeit führen. Diese Lösung wäre eventuell im Stadtzentrum denkbar. Der direkte Vergleich des QUICKWAY Verkehrssystems mit einem Untergrundbahn-System ist insofern nicht möglich, da das QUICKWAY nahezu alle üblichen Fahrzeugtypen umfasst, wogegen Untergrund-Bahnen (Metros) lediglich den öffentlichen Massenverkehr abdecken.

Ein ganz wesentlicher Aspekt zu den Hochfahrwegen liegt darin, dass sich die Passagiere am QUICKWAY bei Tageslicht und mit Aussicht, wie bei einer Sightseeing-Tour bewegen. Dies steigert die Lebensqualität der Verkehrsteilnehmer.

1.2 Aufgabenstellung / Ziel / Abgrenzung

Im Rahmen des von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten Projekts QUICKWAY soll ein Baukastensystem entwickelt werden, mit dem ein Hochfahrwegenetz in Großstädten in kurzer Bauzeit realisiert werden kann. Die Stützen, Fahrbahnträger und Auflagerträger sollen als Fertigteile aus stahlfaserverstärktem UHPC hergestellt werden.

Fokus der vorliegenden Diplomarbeit ist die Fertigung der ca. 12m langen Fahrbahnträger mit Hohlquerschnitt. Dazu wird ein Schalungssystem, das den hohen Anforderungen an Komplexität, Robustheit, und kurzer Schal- und Entschalzeiten entspricht, entwickelt.

Da das Zugtragverhalten des faserbewehrten UHPCs vom Fließvorgang des Frischbetons während der Betonage stark beeinflusst wird, wird eine geeignete Befüllmethode erarbeitet und untersucht. Die Untersuchungen befassen sich mit der Ermittlung und Analyse der Faserorientierung- und -verteilung.

Aus Materialeinsparungsgründen sollen diese Entwicklungen an einem kleineren Versuchsträger (Maßstab 1:2) Anwendung finden und zeigen, dass diese auch an einem Fahrbahnträger im Maßstab 1:1 realisierbar und durchführbar sind. Der hergestellte Versuchsträger dient für einen späteren Großversuch, der in dieser Diplomarbeit nicht bearbeitet wird.

Diese Diplomarbeit befasst sich nur mit der Fertigung (Schalungssystem, Befüllmethode) der Fahrbahnträger. Auf die Anforderung der Fahrbahnoberfläche und Betonoberflächen, wird verzichtet, bzw. in einer anderen Diplomarbeit abgehandelt.

2 Stand der Technik

2.1 Ultrahochfester Beton

Ultrahochfeste Betone weisen grundsätzlich eine Druckfestigkeit von über 145 N/mm² auf. Nach der französischen Norm „NF P 18-470“ ist stahlfaserverstärkter UHPC in mehrere Druckfestigkeitsklassen unterteilt und geregelt. Als Beispiel, die höchste Druckfestigkeitsklasse ist die BFUP 250/265, dabei steht der erste Wert für die Zylinder-, der zweite Wert für die Würfeldruckfestigkeit [3].

Der maximale Größtkorndurchmesser für typischen UHPC liegt bei ca. 2 mm (Feinkornbeton bei 1 mm). Das liegt daran, dass große Körner Spannungskonzentrationen hervorrufen, die zu einer Reduktion der Festigkeit des Betons führen. Es wurden jedoch ultrahochfeste Betone entwickelt, die bei einem Größtkorndurchmesser von 8 – 16 mm, annähernd gleiche Festbetoneigenschaften aufweisen [4].

Die um ein Vielfaches erhöhte Druckfestigkeit des UHPC gegenüber dem Normalbeton (ca. 5 - 10 mal) basiert im Wesentlichen auf ein sehr, dichtes, praktisch kapillarporenfrees Gefüge, das durch die Optimierung der Zusammensetzung der abgestimmten Kornmatrix erreicht werden kann [4].

Dabei werden die Gesteinskörnung und die Bestandteile der Mörtelmatrix so aufeinander abgestimmt, dass die resultierende Packungsdichte möglichst hoch und der verbleibende Hohlraum möglichst gering ist. Die Hohlräume werden mit feinen Zusatzstoffen aufgefüllt, die im Idealfall nicht nur als Mikrofüller, sondern auch als Bindemittel wirken. Als Bindemittel werden neben Zementen hoher Festigkeitsklassen reaktive Zusatzstoffe, die zusätzlich festigkeitssteigernd wirken, indem sie sich an der hydraulischen Reaktion beteiligen wie z.B. Silikastaube, Mikrosilika, Feinflugaschen, verwendet [4].

Des Weiteren spielt zum Erreichen eines kompakten, dichten Gefüges der W/B - Wert eine wichtige Rolle. Der W/B - Wert von UHPC liegt bei etwa 0,20. Dadurch ist die Betonmatrix praktisch frei von Kapillarporen und dementsprechend diffusionsdicht [4].

Aufgrund des niedrigen W/B - Wertes, nimmt der Verarbeitbarkeit des frischen UHPCs stark ab. Für eine entsprechend verarbeitbare Frischbetonkonsistenz werden dem Beton Hochleistungsflyasche auf PCE-Basis (Polycarboxylateher) zugegeben [4].

Nach der Schweizer Norm prSIA 2052: 2014-04 ist UHPC beim Einbau in der Regel selbstverdichtend. Dadurch kann sich der UHPC vollständig entlüften, was eine Voraussetzung für ein homogenes, dichtes Mikrogefüge ist.

Aufgrund seines dichten Gefüges ist der UHPC sehr viel homogener als Normalbeton und wird durch äußere Lasten wesentlich gleichmäßiger beansprucht [4]. Durch die steigende Homogenität und der sinkenden Porosität erhöht sich die Festigkeit der Matrix des Betons. Allerdings zeigt das Material durch die ansteigende Packungsdichte zunehmend linear-elastische Eigenschaften, was mit einem spröden, schlagartigen Materialversagen einhergeht. Erst durch die Zugabe von Stahlfasern lässt sich eine gewisse Duktilität des Betons erreichen. Die Abbildung 10 zeigt einen Vergleich von σ - ε Beziehungen unter Druck mit steigender Festigkeit verschiedener Betonsorten [5].

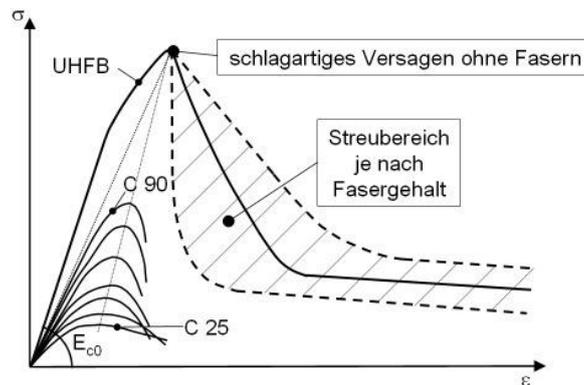


Abbildung 10: Qualitativer Vergleich von σ - ϵ Beziehungen unter Druck mit steigender Festigkeit [5]

Auch die Zugfestigkeit von UHPC kann mit Stahlfasern verbessert und abgesichert werden, sodass zugbeanspruchte Bauteile auch ohne weitere Bewehrung auskommen [4].

Eine weitere Steigerung der Druckfestigkeit, sowie auch der Biegezugfestigkeit werden mit Hilfe einer Wärmebehandlung (ca. 80-90°C) nach dem Erhärten des Betons erzielt. Dadurch wird das Gefüge noch dichter. Zusätzlich ist nach der Wärmebehandlung das Schwinden abgeschlossen [4].

Aufgrund der hohen Druckfestigkeiten und des dichten Gefüges lassen sich Stahlbetonbauteile aus UHPC deutlich filigraner herstellen als mit normal- oder hochfestem Beton. Um daraus auch noch einen wirtschaftlichen Vorteil zu bekommen, müssen allerdings noch die Entwurfs- und Konstruktionskriterien an die Eigenschaften dieses High-Tech-Werkstoffs angepasst werden. Einige Anwendungen von UHPC in der Praxis haben gezeigt, dass in bestimmten Anwendungsfällen auf eine konventionelle Betonstahlbewehrung verzichtet werden kann [6]. Forschungsarbeiten am LKI der TU Graz belegen, dass z.B. Scheiben aus UHPC mit einer Dicke von nur 2,5 cm ohne konventionelle Bewehrung ausgeführt werden können und dass diese unter Druck- und Schubbeanspruchung dennoch ein duktileres Last-Verformungsverhalten aufweisen (vgl. [7], und [8]).

2.1.1 Ausgangsstoffe [4]

Für die Herstellung von UHPC werden z.B. folgende Materialien verwendet:

- Zement
- Quarzsand
- Quarzmehl
- Silikastaub (Microsilika)
- Wasser und Fließmittel
- Stahlfasern
- Zusatzmittel (Verzögerer)

2.1.2 Mischen von UHPC

Durch den hohen Feinkornanteil, den geringen W/B- Wert, den Stahlfasergehalt und der geforderten Homogenität des UHPCs werden an die Mischtechnologie hohe Anforderungen gestellt. Voraussetzung für eine gute Durchmischung der Materialien ist ein Mischer mit sehr hoher Mischintensität. Zusätzliche Wirbler erleichtern den Homogenisierungsprozess. Mit sogenannten Intensivmischern können gute Ergebnisse erzielt werden (siehe Abbildung 11) [4].



Abbildung 11: Intensivmischer

2.1.3 Frischbetoneigenschaften

Die Überprüfung der Frischbetoneigenschaften werden nach der ÖNORM EN 12350-1 bis 12 durchgeführt, wobei die ÖNORM EN 12350-1 nur festlegt, wie eine Probeentnahme zu erfolgen hat. Die einzelnen zu überprüfenden Eigenschaften und deren Durchführung können der Literatur [9] entnommen werden:

Im Folgenden werden nun drei Prüfverfahren näher erklärt, die im Rahmen dieser Diplomarbeit zum Einsatz kamen. Dabei handelt es sich um das Prüfverfahren zur Bestimmung des Rohdichte gemäß ÖNORM EN 12350-6, die Bestimmung des Luftporengehalts am verdichteten Frischbeton mit Hilfe des Druckausgleichsverfahrens gemäß ÖNORM EN 12350-7 und die Bestimmung der Konsistenz des selbstverdichteten Frischbetons durch die Ermittlung des Setzfließmaßes (im Protokoll als Ausbreitfließmaß angegeben) gemäß ÖNORM EN 12350-8.

2.1.3.1 Bestimmung der Rohdichte gemäß ÖNORM EN 12350-6 [10]

In einem zuvor abgewogenen Behälter (Masse m_1) mit einem bestimmten Volumen V wird in mehreren Lagen Frischbeton eingefüllt und verdichtet. Anschließend wird der Behälter nochmal gewogen und die Masse m_2 bestimmt. Die Frischbetonrohddichte ρ_{FB} wird folgend berechnet:

$$\rho_{FB} [kg/m^3] = \frac{(m_2 - m_1) [kg]}{V [m^3]}$$

2.1.3.2 Bestimmung des Luftporengehalts gemäß ÖNORM EN 12350-7 [11]

Wie schon zuvor erwähnt, wird der Luftporengehalt des Frischbetons mit dem Druckausgleichverfahren bestimmt. Dabei wird eine Betonprobe nach ÖNORM EN 12350-1 in einen Luftporentopf (siehe Abbildung 12) gegeben und mittels einem Rütteltisch oder Stampfer verdichtet. Nun wird der LP-Topf luftdicht verschlossen und mit Wasser aufgefüllt. Anschließend wird Druckluft in die Kammer gepumpt. Dabei entsteht ein vom Luftporengehalt des Frischbetons abhängiger Luftdruck, welcher mittels einem justierten Manometers gemessen wird. Dieser Wert kann direkt in Vol.-% abgelesen werden.

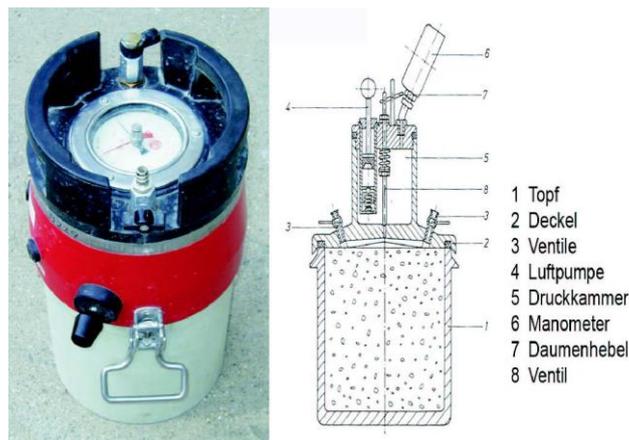


Abbildung 12: Luftporentopf [12]

2.1.3.3 Bestimmung der Konsistenz gemäß ÖNORM EN 12350-8 [13]

Wie schon zuvor erwähnt, wird die Konsistenz des Frischbetons durch die Ermittlung des Setzfließmaßes bestimmt. Zuerst wird ein kegelförmiger Trichter gemäß ÖNORM EN 12350-2 auf einem angefeuchteten Ausbreittisch mittig platziert und mit Beton befüllt. Anschließend wird der Kegel in einer Bewegung innerhalb von 3 Sekunden angehoben, ohne dabei den Betonfluss zu beeinträchtigen. Sobald der Beton einen Ausbreitdurchmesser von 500mm erreicht hat, wird die Zeit t_{500} ermittelt, falls notwendig. Nachdem sich der Betonfluss stabilisiert hat, wird der größte Ausbreitdurchmesser an zwei zueinander parallelen Stellen gemessen und gemittelt.

$$SF [mm] = \frac{(d_1 + d_2) [mm]}{2}$$



Abbildung 13: Anheben des Trichters

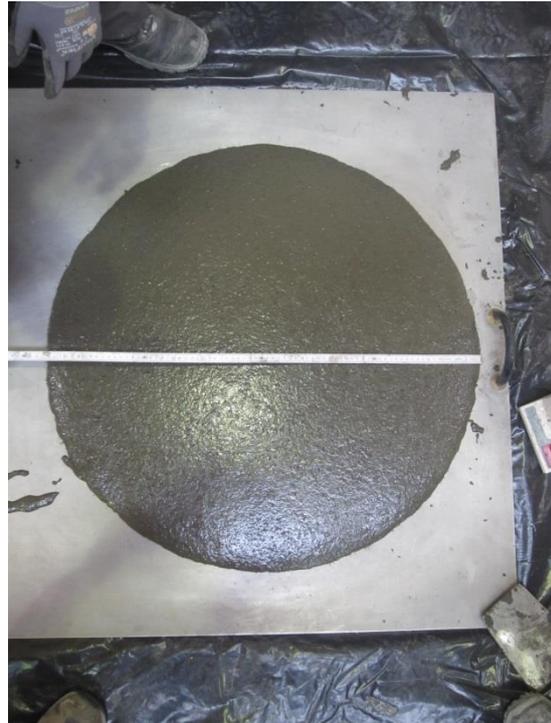


Abbildung 14: Messung des Ausbreitmaßes

2.1.4 Festbetoneigenschaften

Unter Druckbeanspruchung verhält sich UHPC ohne Fasern bis 60 - 80 % der Maximaldruckfestigkeit linear-elastisch. Danach erfolgt das Druckversagen schlagartig und ohne abfallenden Ast im Spannungs-Dehnungs-Diagramm. UHPC mit Fasern aus Stahl oder Kunststoff weist unter Druckbeanspruchung ein wesentlich verbessertes Verhalten im Nachbruchbereich auf. Der ansteigende Ast der Spannungs-Dehnungs-Linie verläuft zunächst wie bei einem faserlosen UHPC. Danach werden die Fasern im UHPC wirksam und eine plastische Verformung des Baustoffs ist erkennbar. Bei einer üblichen Faserzugabe von 2,5 Vol.-% können bei sonst unveränderter Mischungszusammensetzung bis zu 15 % höhere Druckfestigkeiten erzielt werden. Die Abbildung 15 zeigt einen qualitativen Spannungs-Dehnungs-Verlauf von normalfestem und hochfestem Beton sowie UHPC mit und ohne Fasern unter Druckbeanspruchung von einem Zylinderprüfkörper [14].

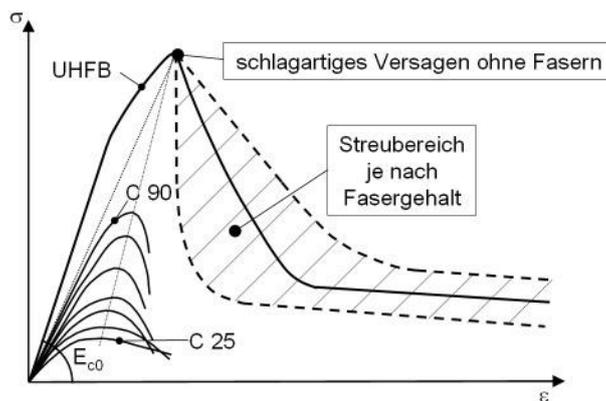


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Linien von normalfestem und hochfestem Beton sowie von UHPC mit und ohne Fasern [5]

Die Zugfestigkeiten von UHPC ohne Fasern liegen zwischen 5 bis 10 N/mm² (zum Vergleich C25/30 $\rightarrow f_{ctm} = 2,6$ N/mm²). Dabei kommt es unter Zugbeanspruchung mit Einsetzen der Rissbildung zu einem extrem spröden Versagen. Es bildet sich dabei kein abfallender Ast der Spannungs-Dehnungs-Linie aus. Das Selbe Verhalten gilt gleichermaßen für grob- und feinkörnigen UHPC. Durch die Faserzugabe weist der UHPC eine deutlich höhere einaxiale Zugfestigkeit und ein ausgeprägtes Nachbruchverhalten auf. Auch die Biegezugfestigkeit wird durch die Zugabe von Fasern erheblich gesteigert. Dieses Verhalten ist stark von dem jeweiligen Fasergehalt, der Fasergeometrie und der Faserorientierung abhängig [14].

Allgemeingültige Angaben zum Zugtragverhalten von stahlfaserbewehrten UHPC können in der Literatur [15] und [16] nachgeschlagen werden.

Durch das dichte Gefüge weist UHPC einen höheren E-Modul als Normalbeton auf (ca. 45.000 bis 55.000 N/mm²) [14]. Der Elastizitätsmodul nimmt mit steigender Druckfestigkeit des Betons nur gering zu. Indem man dem UHPC sehr steife Zuschlagstoffe beigibt, kann der E-Modul bis auf 70.000 MPa erhöht werden. In Abbildung 16 ist der UHPC bezüglich seiner Druckfestigkeit und seiner Steifigkeit im Vergleich zu Normalbeton und hochfestem Beton sowie zu metallischen Werkstoffen dargestellt [5].

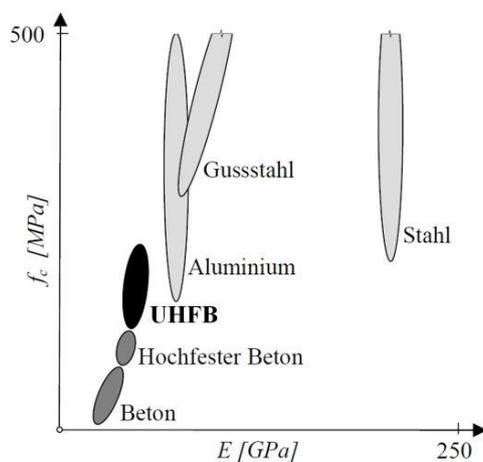


Abbildung 16: Einordnung des UHFB bezüglich Druckfestigkeit und E-Modul [5]

2.1.5 Einflüsse des Materialverhaltens von faserbewehrtem UHPC

Folgende Parameter beeinflussen das Materialverhalten von faserbewehrtem UHPC:

- **Fasergehalt:**
Orientiert sich nach Verarbeitbarkeit und Einmischbarkeit (0,8 – 3,0 Vol.-% sind üblich) [17].
- **Fasergeometrie:**
Aus Duktilitätsgründen ist die Fasergeometrie so zu wählen, dass die Reißfestigkeit der Faser größer ist als deren Verbundsteifigkeit mit der UHPC-Matrix. Somit wird sichergestellt, dass die Faser aus dem Beton herausgezogen wird und niemals spröde reißt. Dieser Vorgang ist mit einer großen Rissöffnung und einer langsam abfallenden Kraft verbunden. Für die optimale Geometrie wird die Faserschlankheit angegeben nach (Gl. 1) [15].

$$\frac{l_f}{d_f} = \frac{f_{ft}}{2 \times \tau_f} \quad (\text{Gl.1})$$

l_fFaserlänge

d_fFaserdurchmesser

f_{ft}Zugfestigkeit der Faser

τ_fSchubverbundfestigkeit zwischen Faser und Beton

Aufgrund der Igelbildung (Verklumpung von Fasersammlungen) während des Mischvorganges sollte die Faserschlankheit zusätzlich über den Fasergehalt begrenzt werden (Gl. 2) [15].

$$\frac{l_f}{d_f} \leq \frac{220}{\rho_f} \quad (\text{Gl.2})$$

ρ_fFasergehalt [Vol.-%]

- **Faserverteilung:**
Für eine homogene Faserverteilung ist darauf zu achten, dass beim Mischen die Fasern im Mischer gleichmäßig verteilt werden. Beim Verarbeiten muss darauf geachtet werden, dass sich die Fasern in der Schalung durch ihr höheres spezifisches Gewicht nicht absetzen. Daher ist die Konsistenz des UHPCs auf die Faserschlankheit abzustimmen [15].

- Faserorientierung:
Beschreibt die Ausrichtung der Fasern im Bauteil. Es können dabei grundsätzlich drei mögliche Faserorientierungen auftreten (siehe Abbildung 17) [17]:
 - dreidimensionale Faserorientierung
 - zweidimensionale Faserorientierung
 - eindimensionale Faserorientierung

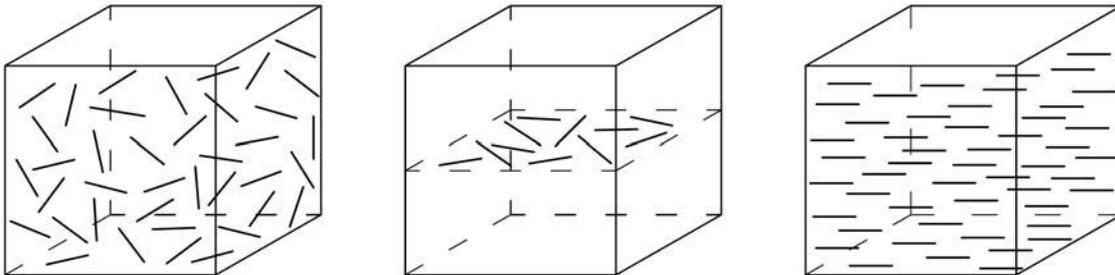


Abbildung 17: Dreidimensionale, zweidimensionale und eindimensionale Faserorientierung [17]

Die Faserorientierung kann aber durch verschiedene Parameter gesteuert werden.

- Die Fasern richten sich nach der Fließrichtung des Frischbetons aus. Dabei wird nahezu eine zweidimensionale Orientierung erreicht [17],
- Die Fasern richten sich entlang und nahe der Schalung aus. Dabei kann in Eckbereichen der Schalung sogar eine eindimensionale Faserausrichtung erreicht werden [17],

Der frische UHPC ist während des Gießens von großen Scherverformungen geprägt. Durch diese, stellen die Fasern, die senkrecht auf die gedachte Scherebenen stehen, einen Widerstand gegen diese dar und drehen sich immer mehr in Fließrichtung, wo ihr Widerstand minimal wird. Schalflächen sind Hindernisse, die eine zufällige Faserausrichtung nicht zulassen, weshalb eine Schicht schalparalleler Fasern entsteht (Schichtdicke ca. $l_f/2$) [15].

Des Weiteren wirkt sich jede Art der Orientierung stärker aus, je länger bzw. schlanker die Fasern sind. Je höher der Fasergehalt ist desto mehr behindern sie sich gegenseitig und umso weniger ist die Faserausrichtung ausgebildet [15].

Zur Bestimmung der Faserorientierung behilft man sich mit dem Faserorientierungsbeiwerts η . Dieser kann zwischen 0 und 1 liegen, jedoch treten diese Extremwerte nur bei eindimensionaler Orientierung auf. Sie gelten für die beiden sogenannten Orientierungshauptrichtungen (eine Analogie zu den Spannungshauptrichtungen), die zueinander immer einen Winkel von 90° einschließen. Bei einer dreidimensionalen Faserorientierung gibt es keine Hauptrichtungen, hier können sich in jede mögliche Raumrichtung gleichviele Fasern ausrichten. Für diesen Fall ergibt sich ein Faserorientierungsbeiwert von $\eta_{\text{iso},3D} = 0,5$ [15].

Bei sehr dünnen Bauteilen, wo sich die Fasern nicht im Raum sondern nur in der Plattenebene bewegen können, bildet sich eine zweidimensionale Faserorientierung aus. Dabei ergibt sich ein Faserorientierungsbeiwert von $\eta_{\text{iso},2D} = \frac{2}{\pi} = 0,64$ [15].

Diese zwei genannten Zustände sind nur Anhaltspunkte zur Abschätzung der Orientierungszustände, da sie in der Natur sich so gut wie nie einstellen werden. Zweidimensionale-Zustände lassen sich anhand einer Verteilerfunktion $\rho(\phi)$ mathematisch beschreiben. Dabei handelt es sich um eine Häufigkeitsverteilung der Faserorientierung. Wählt man für die Verteilerfunktion einen linearen Ansatz, so ergibt sich ein einziger freier Parameter der den jeweiligen Orientierungszustand vollständig definiert. Dieser ist die maximal auftretende Häufigkeit ρ_t . In der Abbildung 18 ist die daraus resultierende Bandbreite der Richtungen ($2\Delta\phi$) in der die Fasern ausgerichtet sind dargestellt [15].

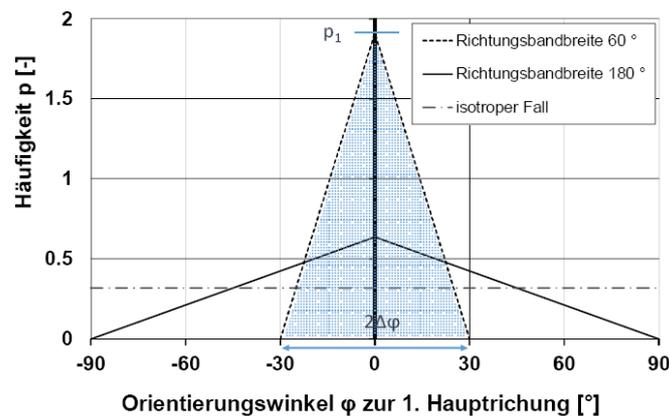


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Faserorientierung mit linearem Ansatz im 2D-Raum [15]

In der Abbildung 19 sind für jede mögliche lineare Verteilerfunktion die Faserorientierungsbeiwerte, die mit dem zuvor beschriebenen Ansatz dargestellt [15].

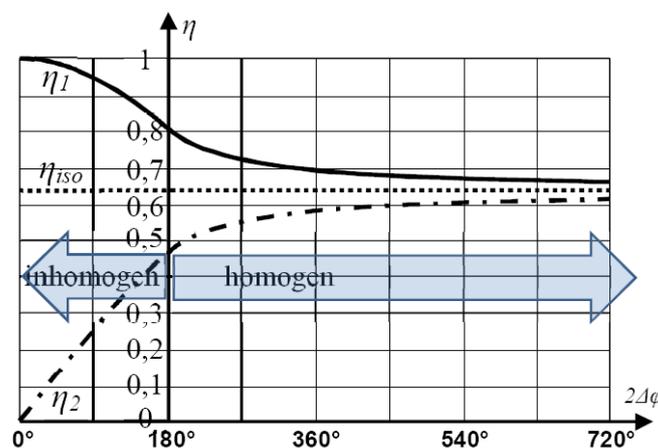


Abbildung 19: Hauptorientierungsbeiwerte für sehr dünne Bauteile [15]

Links beginnt der eindimensionale Orientierungszustand. Das Richtungsband, in dem sich Fasern ausgerichtet haben wird entlang der horizontalen Achse immer schmäler. Bei $2\Delta\phi = 180^\circ$ ist der Übergang von der inhomogenen Verteilungen zu homogenen zu erkennen. Ab hier sind die Fasern in alle Richtungen orientiert. Dieser isotrope Zustand wird durch $2\Delta\phi = \infty$ beschrieben. Für dreidimensionale Verteilungen sind die mathematischen Zusammenhänge wesentlich komplexer [15].

Diese Parameter können bei der Betonage von UHPC- Bauteilen berücksichtigt werden. Ein gutes Beispiel dafür ist die Herstellung der Bogenstäbe der WILD-Brücke, welche in

Österreich stattfand. Für die WILD - Brücke wurde die gesamte Schalung des Querschnitt horizontal gleichmäßiges über einen Trichter befüllt. Dabei wurde ein Frischbetonfluss in Umfangsrichtung erreicht, wodurch sich auch die Fasern im Wesentlichen in dieser Richtung orientierten [18].

2.1.6 Ermittlung der Faserorientierung/ Verteilung

Die Ermittlung der Faserorientierung wird im Allgemeinen von einem Bauteil entnommenen Probekörper durchgeführt. Dazu gibt es unterschiedlichste Messmethoden. Aber jede funktioniert nach dem gleichen Prinzip. Zunächst wird anhand der Messmethode ein Faserorientierungsbeiwert der Probe ermittelt. Anschließend werden über theoretische Ansätze Orientierungsbeiwerte bestimmt, die dazu beitragen, die gewonnenen Auswertungsergebnisse zu interpretieren. Die genaue Beschreibung der verschiedenen Messmethoden und theoretischen Ansätzen der Beiwerte finden Sie in der Literatur [16], [17] und [19].

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die Ermittlung der Faserorientierung-/ Verteilung mit Hilfe der Fibre Scan Methode durchgeführt [20].

Für diese Messmethode werden zwei Mess- Komponenten benötigt. Einen Sensor (siehe Abbildung 20 rechts) und ein LCR- Messgerät (inductance (L) (Induktivität), capacitance (C) (Kapazität), und resistance (R) (Widerstand)) (siehe Abbildung 20 links).

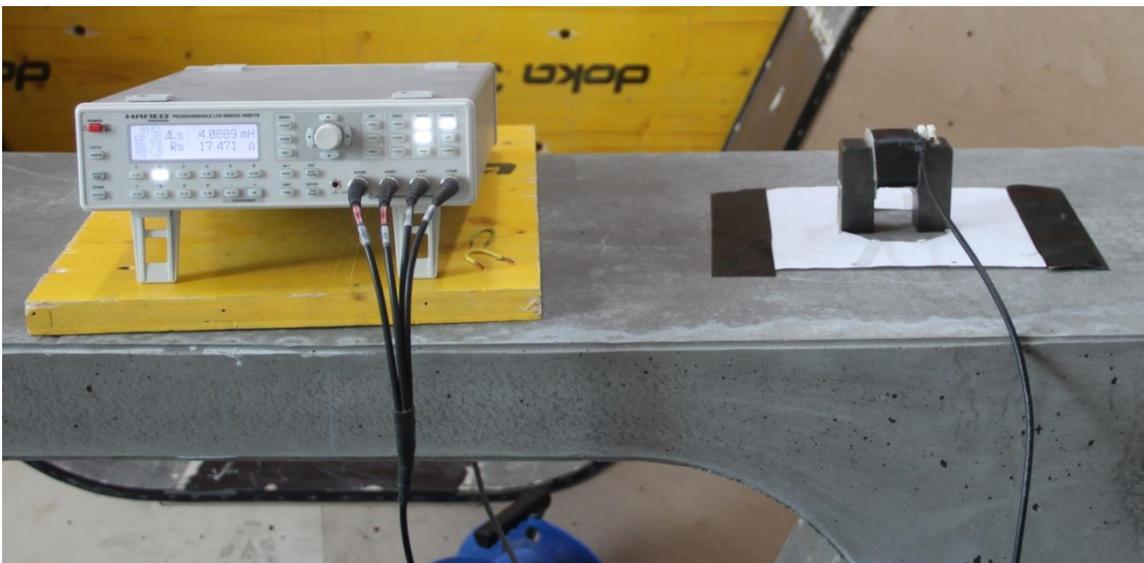


Abbildung 20: Fibre Scan Komponenten

Der Sensor besteht aus einem U-förmigen Ferritkern, an dem sich in der Mitte eine Spule befindet. Die Spule besteht aus 600 Kupferdrahtwicklungen mit einem Drahtdurchmesser von 0,4mm. Diese sind an einem glasfaserverstärkten Nylonkörper angebracht, der an dem Kern befestigt ist. Der elektrische Anschluss erfolgt über ein BNC-Kabel mit Bajonettstecker. Zum Schutz gegen Beschädigung und Verschmutzung sind die Wicklungen abschließend mit zwei bis drei Schichten selbstverschweißendem Kunststoffband und einer Deckschicht aus Kraftklebeband ummantelt.

Grundsätzlich handelt es sich bei der Bestimmung der Faserverteilung- Orientierung um eine Messung der Induktivität, als Differenz zwischen Luftmessung und Bauteilmessung. Dabei wird zuerst die Induktivität des Sensors frei an der Luft gemessen. Dazu wird über das Messgerät Strom in die Spule induziert und ein Magnetfeld baut sich auf. Der ermittelte Wert wird auf 0 gesetzt. Anschließend wird der Sensor auf das zu messende Bauteil positioniert. Wieder wird in die Spule ein Strom I induziert und erneut baut sich ein Magnetfeld auf (siehe Abbildung 21). Innerhalb dieses Magnetflusses wird die Induktivität gemessen. Je höher die Induktivität ist desto mehr Fasern befinden sich innerhalb dieses Magnetfeldes. Es liefert aber noch keine Auskunft darüber aus, wie die Fasern darin liegen. Deshalb wird mit Hilfe einer Schablone an vier Winkelstellungen (0° , 45° , 90° und 135°) gemessen (siehe Abbildung 20 rechts). Je höher die Induktivität in der gemessenen Richtung ist, desto mehr Fasern befinden sich auch in dieser.

So bekommt man aber nur den Induktionswert, der eine annähernde Aussage darüber liefert, wie viele Fasern an sich dieser Stelle befinden und in welche Richtung sie orientiert sind. Somit müssen für die Werte der Faserverteilung ρ und der Orientierung η Umrechnungen getätigt werden.

Für die Faserverteilung wird zunächst der Mittelwert der vier gemessenen Induktivitätswerte gebildet ($\Delta L_{MP,MW}$) Die Winkel die auch später für die Orientierung wichtig sind folgend definiert:

- 0° Die Fasern sind entlang der Fließrichtung ausgerichtet
- 45° Die Fasern sind 45° zur Fließrichtung ausgerichtet
- 90° Die Fasern sind waagrecht zur Fließrichtung ausgerichtet
- 135° Die Fasern sind 135° zur Fließrichtung ausgerichtet

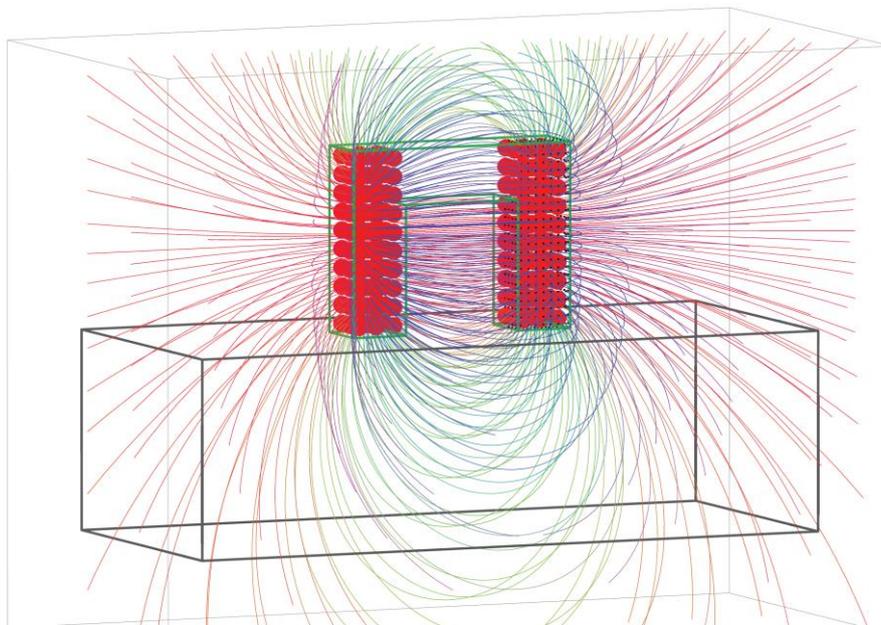


Abbildung 21: Magnetfeld [20]

Der Zusammenhang zwischen der Verteilung, Orientierung und der Induktivitätsmesswerten ist folgender [20]:

$$L = k_{Sensor} \times \frac{N^2}{R_m} [mH]_{(milli Henry)} \quad (Gl.1)$$

k_{Sensor}geometrieabhängiger konstanter Formfaktor

NAnzahl der Wicklungen der Spule

R_mSumme aller vom Magnetfeld durchflossenen magnetischen Widerstände

Wie schon zuvor erwähnt, werden für die Auswertung der Messungen die Differenzen der Messwerte zwischen Luft und Bauteil benötigt. Diese Differenz muss auch im Rechenmodell gegeben sein. Der in der (Gl.1) zu ermittelnde Formfaktor k_{Sensor} darf zwar vernachlässigt werden, kann aber dazu genutzt werden, weitere Unschärfen zu berücksichtigen. Wie zum Beispiel [20]:

- Ungenauigkeiten der numerischen Näherung
- Vernachlässigung des Spulenbereichs
- nicht berücksichtigter Einfluss der Probe auf das Magnetfeld

Durch den Formfaktor wird die Form und Größe der Spule berücksichtigt, die zu unterschiedlichen Ergebnissen der Induktionsmessung führen. Anhand von Studien wurde festgestellt, dass der Formfaktor k_{Sensor} aufgrund des nicht berücksichtigten Einfluss der Probe auf das Magnetfeld nicht mittels einer Messung an Luft sondern durch Messung an einer Kalibrierprobe zu ermitteln ist [20].

Diese Vorgehensweise wird an allen Messpunkten des Bauteils durchgeführt. Da angenommen werden kann, dass die Faserverteilung stark von dem Bauteildicken abhängig ist, sollte das Bauteil dementsprechend in Dickenbereiche unterteilt werden. Als nächstes wird von allen gemessenen Induktionswerten der Messpunkte im Bauteilbereich der Mittelwert gebildet ($\Delta L_{MW,alle}$). Nun werden die gebildeten Werte in folgende Gleichung (Gl (2)) für jeden gemittelten Messpunkt eingegeben.

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad (Gl.2)$$

ρ_{Soll}theoretischer Fasergehalt

ρ_{MP}tatsächlicher Fasergehalt

MPMesspunkt

Bei der Ermittlung der Faserorientierung wird nur auf die zweidimensionale Orientierung eingegangen. Es wird zunächst folgende Annahme getroffen (Gl.3)

$$\frac{\Delta n_x}{n_{iso}} = \frac{\Delta L_x}{\Delta L_{MW,MP}} \quad (Gl.3)$$

Δn_xOrientierung in x – Richtung (Gl (4))

n_{iso}Faserorientierungsbeiwert

ΔL_xInduktivität in x -Richtung

$\Delta L_{MW,MP}$...Mittelwert der Induktivität des Messpunktes

MP.....Messpunkt

$$\Delta n_x = n_x - n_{iso} \quad (Gl 4)$$

Mit Gl (4) eingesetzt in Gl (3) bekommt man die Faserorientierung in x -Richtung

$$n_x = \frac{\Delta L_x - \Delta L_{MW,MP}}{\Delta L_{MW,MP}} \times n_{iso} + n_{iso} \quad (Gl.5)$$

Dabei beträgt der Faserorientierungsbeiwert $n_{iso} = 0,6$. Dieser ist ein Mittelwert und berücksichtigt, dass nicht alle Fasern innerhalb im 2D-Raum gleichmäßig orientiert sind ($n_{iso2D} = 0,64$), sondern in Fließrichtung (X-Richtung) stärker orientiert sind als waagrecht dazu. Er berücksichtigt auch, dass ein kleiner Teil auch im 3D-Raum orientiert ist (siehe Abbildung 22).

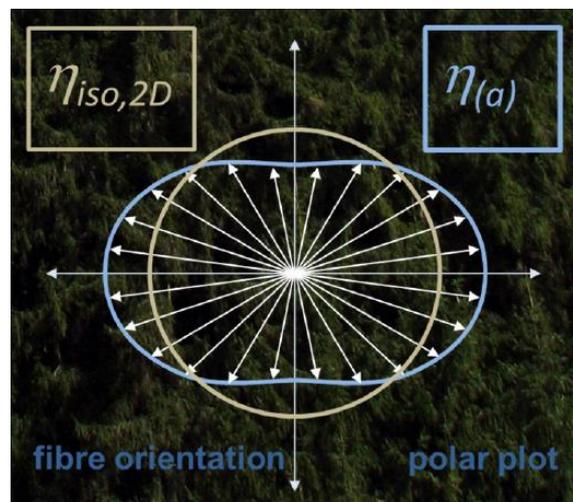


Abbildung 22. Berücksichtigung der Fließrichtung und des 3D-Raums [20]

Diese Vorgehensweise kann für alle Richtungen (0° , 45° , 90° und 135°) angewendet werden. Des Weiteren ist diese Ermittlung unabhängig von der Bauteildicke und kann überall an beliebig vielen Messpunkten angewendet werden.

Die Berechnung der Faserverteilung (ρ) und der Faserorientierung (η) ist deshalb von großer Bedeutung, da man mit den gemessenen Induktivitätswerten (L) alleine nichts anfangen kann. Mit den Umrechnungen kann man nun die Nachrisszugfestigkeit des UHPCs ermitteln (Gl. 6).

$$\sigma_{cf,0} = n \times g \times \tau_f \times \rho_f \times \frac{l_f}{d_f} \quad \text{Gl (6) [15]}$$

$\sigma_{cf,0}$	Nachrisszugfestigkeit (maximal übertragbare Faserbetonspannung)
η	Ermittelte Faserorientierung nach Gl. (5)
g	Faserwirksamkeitsbeiwert, berücksichtigt die Ausziehung durch den Einfluss der Umlenkung der Faser am Rissufer. Dieser Wert wird mit 1 eingesetzt [15].
τ_f	Schubverbundfestigkeit zwischen Faser und Matrix
d_f	Faserdurchmesser [mm]
ρ_f	Fasergehalt [Vol-%]
l_f	Faserlänge [mm]

Der große Vorteil, die Faserverteilung, Faserorientierung mittels der Induktivitätsmessung (FibreScan) und anschließender Umrechnungen zu ermitteln ist, dass sie am Bauteil direkt angewendet werden kann und nicht nur an Proben wie bei andere Messmethoden. Des Weiteren muss das Bauteil auch nicht zerstört (geschnitten) werden.

2.1.7 Schwinden

Unter Schwinden versteht man eine lastunabhängige Verformung infolge der zeitlich abhängigen Reduzierung des Volumens von Beton.

Das Schwinden von Beton lässt sich in drei Arten aufteilen:

- Plastisches (kapillares) Schwinden, oder Frühschwinden
- Trocknungsschwinden
- Autogenes oder chemisches Schwinden

Das Frühschwinden tritt im Frischbetonzustand auf. Dabei verdunstet das an der Oberfläche abgesonderter Überschusswasser. Dieses Wasser stammt aus dem Kapillarporensystem des UHPC, weshalb es auch Kapillarschwinden genannt wird [21].

Aufgrund des im UHPC geringen Wasser- und hohen Feinkorngehaltes neigt dieser sehr stark zur Bildung einer sogenannten "Elefantenhaut" und der Rissen im plastischen Zustand. Durch eine entsprechende Nachbehandlung (Beton feuchthalten und mit einer Folie abdecken, um ein zu schnelles Verdunsten zu vermeiden) können die Risse in diesem frühen Stadium deutlich reduziert werden [22].

Unter Trocknungsschwinden versteht man das Austrocknen des Bauteils durch einen Feuchtegradienten zwischen Umgebung und Bauteil. Aufgrund des niedrigen W/B- Wert des UHPCs, spielt das Trocknungsschwinden beim UHPC keine große Rolle wie beim Normalbeton und ist sehr klein. Das Trocknungsschwinden nimmt sogar mit zunehmender Festigkeit und Dichtigkeit immer mehr ab. Indem man den Beton einer Wärmebehandlung unterzieht, kann das Trocknungsschwinden quasi vorweggenommen bzw. eliminiert werden, was zur Einhaltung von Maßtoleranzen im Fertigteilbau äußerst vorteilhaft ist [5].

Im Gegenzug zum Trocknungsschwinden, nimmt das autogene Schwinden mit abnehmenden W/B- Wert und zunehmenden Mikrosilikagehalt zu. Autogenes Schwinden ist eine Volumenverringerung durch Zementhydratation die in den ersten Tagen während des Erhärtens abläuft. Wird diese Verformung behindert, kommt es zu Zwangsbeanspruchungen im Frischbeton. Dabei kann es beim Überschreiten der geringeren Zugfestigkeiten des noch frischen UHPCs zur Rissbildung führen. Über eine geregelte Rezepturzusammenstellung des Betons lässt sich das autogene Schwinden reduzieren. Ein bedeutender Anteil der Zwangsbeanspruchungen wird auch durch das Kriechen wieder abgebaut. Gibt man dem UHPC Fasern hinzu, führen diese bei Rissbildung zu feiner verteilten Rissen mit sehr engen Abständen, wodurch die Rissbreiten in einer ungefährlichen Größenordnung liegen. Bei der Herstellung von UHPC Bauteilen sollten, wenn möglich Verformungsbehinderungen durch Schalkörper oder große Einbauteile vermieden werden. Bei üblichen Faserzugaben bei UHPC (bis zu 2,5 Vol.%) haben nur einen geringen Einfluss auf das autogene Schwinden. Erst bei extrem hohen Fasergehalten lässt sich das autogene Schwindmaß merklich reduzieren [5].

2.1.8 Kriechen

Unter Kriechen versteht man eine zeitliche Verformungsänderung bei konstanter lastabhängiger Spannung. Bei hochfestem Beton wird mit abnehmendem W/B- Wert das Kriechen geringer. Bei nicht wärmebehandeltem UHPC nimmt das Kriechvermögen auf eine Grundkriechzahl von ca. 0,9 weiter ab. Durch eine Wärmebehandlung wird das Kriechvermögen auf eine Kriechzahl zwischen 0,2 bis 0,4 nochmals reduziert [5].

2.1.9 Dauerhaftigkeit

Aufgrund der sehr dichten Mikrostruktur und der geringen Porosität ist die Dauerhaftigkeit von UHPC bedeutend besser als bei Normalbeton. Das dichte Gefüge und die außerordentlich geringe Kapillarporosität behindern zum Beispiel das Eindringen von CO₂ und Wasser in den Beton und schützen ihn vor chemischen Angriffen. Somit kann die Korrosion der Stahlfasern nur oberflächlich erfolgen und hat nur einen geringen Einfluss auf die Trag- und Gebrauchsfähigkeit des UHPCs. Durch eine zusätzliche Wärmebehandlung des Festbetons wird nicht nur die Festigkeit gesteigert, sondern auch die Gesamtporosität kann um etwa 50% gesenkt werden [6].

Weiterführende Literatur zum Thema Eigenschaften des UHPCs finden Sie in, [3], [4], [5], [6], [7], [8], [23], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22] und [24].

2.2 Schalungsbau allgemein

Die Schalung dient dem Beton in erster Linie als Form. Zusätzlich leitet sie die dabei entstehenden Kräfte ab. Sie ist ebenfalls mitverantwortlich für die spätere Beschaffenheit der Betonoberfläche. Die Einflüsse auf die Schalungen ändern sich mit dem zeitlichen Verlauf der Stahlbetonarbeiten [25].

- Beim Zusammenbau der Schalung (das Einschalen) sind das Eigengewicht der Schalung und die verschiedenen Montagezustände maßgebend [25].
- Das Gewicht der notwendigen Bewehrung [25].
- Die Belastungen beim Betonieren. Bei horizontalen, sowie bei vertikalen Bauteilen wirkt der Frischbetondruck hier maßgebend [25].
- Die Höchstbelastungen auf die Schalung treten jedoch während des Einbaus und des Verdichtens auf [25].

Erst mit dem Aushärten des Betons werden die Belastungen wieder [25].

2.2.1 Formgebung

Grundsätzlich lassen sich fast alle geometrischen Formen schalen. Von ebenen bis dreidimensionalen Bauteilen und Bauwerken. Je nach der geometrischen Komplexität steigt der technische und kostenmäßige Aufwand dafür. Für ebene Schallflächen können allgemein Serienschalungen eingesetzt werden. Bei gekrümmten Bauteilen sind je nach Krümmung Serienschalungen verwendbar oder Sonderanfertigungen notwendig. Spezielle Schalungen können dann mit Unterstützung von CNC-Maschinen angefertigt werden [25].

2.2.2 Konventionelle Schalungsmaterialien

Das Schalungsmaterial ist hauptsächlich verantwortlich für die spätere Struktur und das Aussehen der Betonoberfläche. Der Beton ist aber nicht direkt mit dem Material im Kontakt, da sich zwischen Schalungshaut und Beton ein geeignetes Trennmittel befinden soll. Die Auswahl eines geeigneten Schalungsmaterials kann z.B. durch Wahl eines ungeeigneten Trennmittels trotzdem zu einem negativen Sichtbetonergebnis führen [25].

Weitere Auswahlkriterien für Schalungsmaterialien sind [25]:

- Einsatzzahl
- Saugendes, schwach saugendes oder nicht saugendes Verhalten (Wasseraufnahme)
- Betonart (Normalbeton, selbstverdichtender Beton, Faserbeton, UHPC)
- Materialeigenschaften (E-Modul, Verformungsmodul, Sprödigkeit)
- Kosten

2.2.3 Holz- Holzwerkstoffe

Das Material Holz ist in der Schalungstechnik universell einsetzbar. Ebene bis hin zu doppelt gekrümmte Bauteile können mit Holzbrettern geformt werden. somit flexibel. Dafür besteht bei den Holzbrettern ein hoher Bearbeitungsaufwand. Für einfachere Schalungsgeometrien kommen Platten aus Holzwerkstoff zum Einsatz. Diese beschichteten oder unbeschichteten Platten können aus Massivholz, Sperrholz, Faser- oder Spanplatten bestehen. Durch die Beschichtung wird das Saugverhalten der Materialien beeinflusst. Als Beschichtung werden Phenolharz, Melaminharz, oder Polypropylen verwendet [25].

2.2.4 Kunststoff

In der Schalungstechnik wird Kunststoff als Beschichtungsmaterial oder als Hauptbestandteil der Schalungsplatte verwendet. Man unterscheidet zwischen Kunststoffverbund- und kunststoffbeschichteten Platten [25].

Die Kunststoffverbundplatten bestehen aus Polypropylen und einem Kern aus Sperrholz oder Aluminium. Dadurch werden bessere statische Eigenschaften als bei reinen Holzschalungen erreicht. Sie werden in der Regel als Rahmenschalungen verwendet, können aber auch als einzelne Platten für Deckenbauten eingesetzt werden. Kunststoffverbundplatten gehören zu den nicht saugenden Schalungsmaterialien. Sie nehmen somit keine Feuchtigkeit auf und quellen nicht. Sie sind chemisch resistent und gut einsetzbar bei hohen Umgebungstemperaturen [25].

2.2.5 Stahl

Aufgrund der hohen Verschleißfestigkeit und Formbeständigkeit können bei Stahlschalungen höher Einsatzzahlen mit gleichbleibender Qualität erreicht werden. Schalungen aus Blechen können in Form von Blechtafeln z.B. einen bestimmten Radius angepasst werden. Stahlschalungen gehören ebenfalls zu den nichtsaugenden Schalungen, können aber durch Sandstrahlen der Oberfläche einen ähnlichen Effekt wie bei einer schwach saugenden Sperrholzplatte erzielen. Wird die Schalung nicht oft verwendet, kann es an der Stahloberfläche zu einer Oxidation (Rost) kommen [25].

2.2.6 Papier

Papierschalungen bestehen aus wasserfestem Papier und werden von den Herstellern mit oder ohne Beschichtung angeboten. Sie werden hauptsächlich für die Herstellung von Säulen (Höhe 8m, Durchmesser 10 bis 120cm) verwendet. Das Ausschalen erfolgt mithilfe einer Reißleine. Papierschalungen zeichnen sich durch ihre einfache Handhabung und ihr geringes Gewicht aus [25].

2.3 Herstellung von Brückenträgern mit Kastenquerschnitt aus Normalbeton

Die Schalung für Brückenträger mit Kastenquerschnitt setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Außenschalung: Bestehend aus Trägern, Schaltafeln und Stützen, eventuell schon fertige Systeme (firmenabhängig). Gegebenenfalls getrennte Bodenplatte (abhängig vom Herstellungsverfahren).
- Innenschalung: Bestehend aus denselben Komponenten wie die Außenschalung. Zu berücksichtigen ist, dass die Innenschalung wieder aus dem Kern zu entnehmen ist (lösbar Innenschalung).
- Stirnschalung: vom Herstellungsverfahren abhängig (Match –Cast- Verfahren)

2.3.1 Freivorbauverfahren – Ortbetonbauweise

Das Grundprinzip des klassischen Freivorbaus besteht darin, dass der Überbau von Pfeilern aus in Bauabschnitten von ca. 5m vorgebaut wird. Dies geschieht mittels eines Freivorbauwagens. Dieser trägt die Rüstung, Schalung, Bewehrung, Spannstahlbewehrung und den Frischbeton. Um kürzere Bauzeiten zu erzielen, wird oftmals von beiden Seiten vorgebaut. Dafür wird das Prinzip des Waagebalkens angewendet, damit das Gleichgewicht gehalten werden kann und es für den betreffenden Pfeiler zu keinen oder geringen Biegebelastungen kommt [26].

Vom klassischen Freivorbau haben sich verschiedene Varianten abgeleitet [26]:

- Mit Hilfsabspannungen über Pylone (Pylonfreivorbau)
- Mit Hilfsträgern
- Mit Vorschubrüstung (Rüstträgern). Dabei wird zwischen Rüstträgern unter oder ober dem Überbau unterschieden

2.3.2 Freivorbau mit Fertigteilen (Segmentbauweise)

Bei der Segmentbauweise werden zunächst die Einzelteile des Brückenträgers in einem Fertigteilwerk hergestellt. Diese werden anschließend auf die Baustelle transportiert und mittels eines Verlegegerüsts an die Stützen montiert. Dabei unterscheidet man zwischen vom Überbau aus untenliegendem und obenliegendem Verlegegerüst (siehe Abbildung 23) [26].

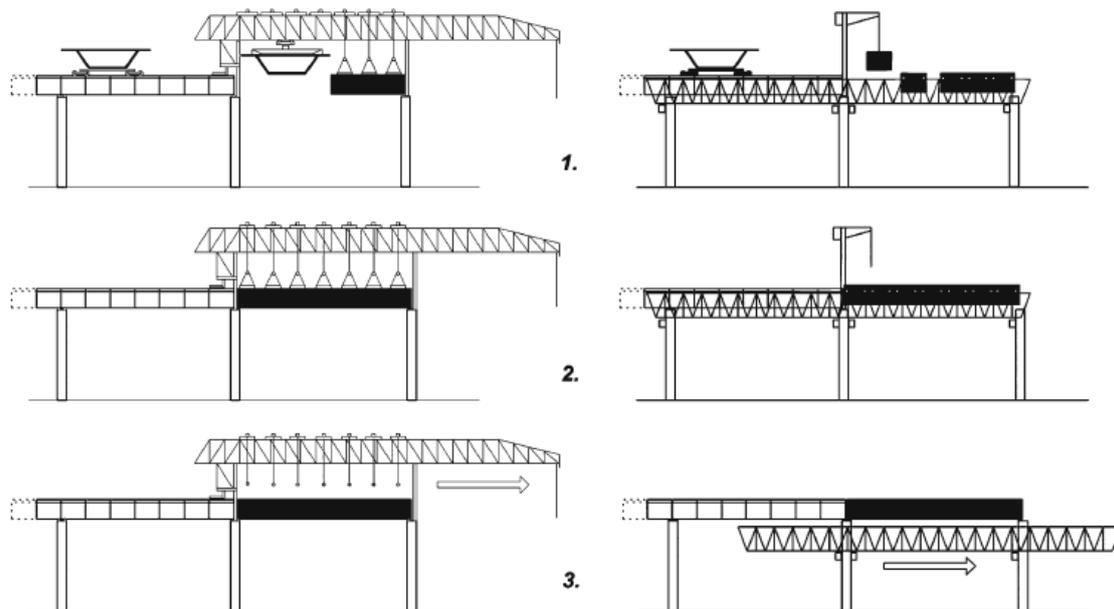


Abbildung 23: links obenliegendes Verlegegerüst, rechts untenliegendes Verlegegerüst [26]

Dabei ist die Montage eines Brückenfeldes bei beiden Varianten identisch [26]:

1. Segmentverlegung: Dabei werden die Segmente einzeln aufgehängt und ausgerichtet. Beim obenliegenden Verlegegerüst geschieht dies über Laufkatzen, bei unterliegendem über einen auf oder unter der Brücke positionierten Kran oder stationären Kran.
2. Segmentvorspannung: Nach der Positionierung der Segmente werden diese mittels Spannglieder extern soweit vorgespannt, dass der Überbau sich selbst trägt und wird anschließend auf die Lager der Stützen gehoben. Nun wird die gesamte Vorspannung aufgebracht.
3. Vorschub des Verlegegerüsts aufs nächste Brückenfeld

Für die hohe Passgenauigkeit in den Fugen (Trockenfugen) der einzelnen Segmente zueinander wird nach dem Match-Cast-Verfahren (Kontaktverfahren) gefertigt. Dabei wird die Stirnseite des zuletzt gefertigten Segmentes als Stirnschalung des nächsten Segmentes verwendet.

2.3.3 Taktschiebeverfahren

Beim Taktschiebeverfahren werden einzelne 10 – 30m lange Querschnittselemente (Takte) in einer hinter dem Widerlager befindlichen Fertigungsanlage hergestellt. Die Elemente sind monolithisch (fest) miteinander verbunden. Dazu benötigt man einen Taktkeller, einen Vorbauschubel und eventuell Hilfsstützen oder Pylone zur Reduzierung der Spannweite und somit der Belastung während des Bauverfahrens. Nach jedem fertig erstelltem Takt wird der Überbau in Brückenlängsrichtung mittels einer Verschanlage am Widerlager und Hilfslager verschoben [26].

2.4 Brücken aus UHPC

Dieses Kapitel soll eine kleine Übersicht über die weltweiten Entwicklungen und Anwendungen von UHPC im Brückenbau, die für diese Diplomarbeit relevant sind wiedergeben.

2.4.1 Segmentbrücken mit Trockenfugen

An den Trockenfugen sind hohe Anforderungen, was die Ebenheit der Fugenstirnflächen angeht, gestellt, damit die Passgenauigkeit der Stirnflächen der einzelnen Segmente zueinander gegeben ist [5].

Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden die Segmente oftmals im Match-Cast-Verfahren (Kontaktverfahren) hergestellt. Dabei dient eines der beiden zu fügenden Segmente als Stirnschalung für das nächste Segment. Die Übertragung der Schubkräfte findet über so genannte Schubnocken (Profilierung der Kontaktflächen) statt [24].

Mit dieser Bauweise wurde die Pont de la Chabotte über die A51 in Frankreich im Jahr 2005 errichtet (siehe Abbildung 24). Da auf jegliche Abdichtung oder Belag bei dieser Brücke verzichtet wurde, konnte die Brücke im Match- Cast-Verfahren hergestellt werden [24].



Abbildung 24: Pont de la Chabotte (Segment) [24]

Sie ist eine 47,4 m weit gespannte, in Béton Composite Vicat (BVC®) mit 2 Vol.-% Stahlfasern ausgeführte Straßenbrücke mit Kastenquerschnitt und besteht aus 22 verklebten Segmenten [24].

Ein wesentliches Merkmal zur Herstellung der Segmente ist, dass diese vertikal betoniert wurden. Dabei wurde ein Segment auf dem vorhergehenden, gefertigt (siehe Abbildung 25) [24].



Abbildung 25: Match-Cast-Verfahren (vertikal) [24]

Diese „aufrechte“ Herstellungsmethode ermöglicht eine fehlerfreie Befüllung. Es wird dadurch eine ungünstige Faserorientierung im Brückenquerschnitt verhindert. Auf Grund der Anforderung der später befahrenden UHPC- Oberfläche, konnte eine spezielle Textur an die Schalungsoberfläche angebracht werden um die notwendige Griffigkeit zu erreichen [24].

Der Querschnitt der Brücke ist 4,4 m breit und 1,6m hoch. Der Steg und die Bodenplatte sind jeweils 12cm stark, die Fahrbahnplatte ist 14cm dick. Die einzelnen Segmente wurden parallel zur Autobahn zu einem Balken (ca. 200t) zusammengespant und anschließend eingehoben [24].

Ein weiteres Beispiel zur Segmentbauweise aus UHPC ist an der WILD-Brücke in Völkermarkt, Österreich, zu sehen. Jedoch wird hier nur der 70m weit gespannte Polygonbogen aus faserverstärktem UHPC hergestellt. Dieser setzt sich aus geraden Stab- und geknickten Knoten-Segmenten (siehe Abbildung 26) zusammen. Durch die Zugabe von Stahlfasern kann auf jegliche schlaife Bewehrung verzichtet werden [24].



Abbildung 26: Segmente der WILD-Brücke [24]

Die Stabsegmente sind als achteckige Rohre mit einer Wandstärke von 6 cm ausgeführt. Der Bogenquerschnitt ist durchgehend 1,2m hoch und breit. Lediglich die Knotensegmente, die zwischen den Stabelementen angeordnet sind weisen eine Wandstärke von 20cm auf. Sie bilden den Knick im Polygon und dienen als Auflager für die Aufständering und lenken die im Bogen verlaufenden Spannlitzen um. Die Segmentstöße sind als plangeschliffene ebene Trockenfuge ausgebildet [24].

Bei der Herstellung der Stabsegmente wurde auf die Faserorientierung großer Wert gelegt. Um ein optimales Ergebnis zu bekommen, werden die Bogenstäbe horizontal betoniert. Die gleichmäßige Befüllung des Querschnitts wird über einen an der gesamten Schalung entlang befindlichem Trichter ausgeführt (siehe Abbildung 27). Dabei wird ein Frischbetonfluss in Umfangsrichtung erreicht, wodurch sich auch die Fasern im Wesentlichen in diese Richtung orientieren [18].

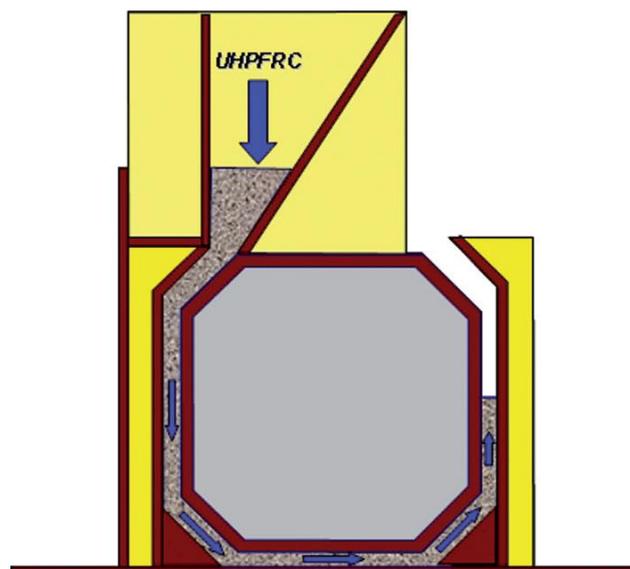


Abbildung 27: Befüllung WILD-Brücke [18]

Bei der Montage des Bogens wurde dieser in zwei Hälften direkt auf den Kämpferfundamenten vertikal zusammengebaut (siehe Abbildung 28). Das Gewicht einer Bogenhälfte beträgt dabei nur 55t. Anschließend wurden die Hälften eingeklapppt (siehe Abbildung 29) und der Bogenschluss wurde als Mörtelfuge ausgebildet. Die restlichen Brückenteile (Aufständerung und Fahrbahnplatte) wurden konventionell gebaut [24].

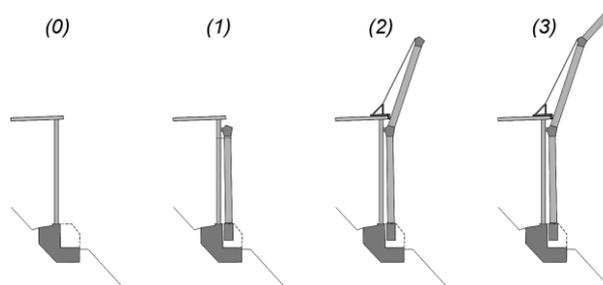


Abbildung 28: Zusammenbau der WILD-Brücke [24]



Abbildung 29: Einklappen der zwei Bogenhälften [24]

2.4.2 Brücken mit Verbundquerschnitten UHPC-Normalbeton

Bei dieser Halbfertigteilmontagebauweise werden zur Gewichtsreduzierung der Stege und die Bodenplatte des Kastenquerschnittes aus UHPC gefertigt. Darauf wird dann die Fahrbahnplatte in Ortbetonbauweise betoniert. Der Verbund zwischen den Stegen und der Normalbetonplatte wird entweder mit Anschlussbewehrungsschlaufen oder mittels PerfoBond- Blechen hergestellt [24].

Dieses Bauverfahren wurde in Japan für die Fertigung der Flughafenbrücke am Tokyo Airport International eingesetzt. Die 48 m weit gespannte und 16,2 m breite UHPC- NSC-Verbundbrücke besteht aus 3 UHPC-Fertigteilmasten, die jeweils aus 7 als U-Querschnitt ausgeführte Segmenten bestehen, ergänzt mit der Normalbeton-Fahrbahnplatte (siehe Abbildung 30). Um die Anforderung der geringen Bauhöhe zu gewährleisten, wurde die interne Spangliedführung in der Bodenplatte vorgenommen [24].



Abbildung 30: Flughafenbrücke am Tokyo Airport [24]

Dadurch konnten sowohl der volle Hebelarm als auch die Tragfähigkeitssteigerung durch den nachträglichen Verbund genutzt werden. Die Segmente wurden mit 15cm dicken UHPC-Nassfugen gestoßen. Der Verbund zwischen Normalbetonplatte und Steg erfolgte mittels der PerfoBond-Bleche. Diese wurden erstmals in Zwillingsanordnung ausgeführt, da die Längsfuge aufgrund der hohen Radlasten des Flugzeugschleppers (125 kN) neben den Faltwerksschub auch die Querbiegung zwischen Platte und Stegen übertragen muss [24].

Die 21 Segmente (jeweils 25t schwer) wurden verkehrt betoniert. Die Montage erfolgte aus Platzgründen für den darunter fließenden Verkehr 1,2 m über dem endgültigen Niveau auf einem Lehrgerüst mit Hilfsunterstützung. Bei Nacht wurden die Segmente mit einem Kran eingehoben. Der Verguss-UHPC in den Fugen wurde durch Einblasen von warmer Luft (40-50°C) in den Kasten vier Tage lang wärmebehandelt. Bei einer Druckfestigkeit von 160 N/mm² wurden dann die Segmente endgültig vorgespannt. Anschließend musste die insgesamt 1200 t schwere Brücke mit 6 hydraulischen Pressen (je 500 t) auf die Endlage um 1,2 m abgesenkt werden. Gegenüber der Normalbetonausführung ließen sich 40% Gewicht einsparen [24].

Weiter Beispiel zu UHPC-Brücken finden Sie in der Literatur [24].

3 Fertigungskonzept QUICKWAY - Fahrbahnträger

In diesem Kapitel soll veranschaulicht werden, wie schlussendlich ein QUICKWAY – Fahrbahnträger hergestellt werden soll. Wie schon in Kapitel 1.1.4 erwähnt ist ein Fahrbahnträger 12,50 m lang und wird aus stahlfaserverstärkten UHPC gefertigt. Es soll aber auch möglich sein, kürzere Segmente bzw. gekrümmte Fahrbahnträger zu fertigen. Kernelement für das Fertigungskonzept ist dabei das Schalungssystem, an dem hohe Anforderungen gestellt werden.

- Robustheit (mehrmaliger Einsatz)
- Oberflächenqualität (Fahrbahnoberfläche, Griffigkeit)
- Kurze Schal- und Entschalzeiten
- Maßgenauigkeit der Stirnflächen
- Ableitung der vertikalen/horizontalen Kräfte
- Ebenheit der Stirnschalung

Das Weiter wurde in einem vorzeitigen Entscheidungsprozess festgelegt, dass der Fahrbahnträger wie in der Abbildung 31 dargestellt, aufrecht horizontal betoniert werden soll. Dadurch muss die schwere Außenschalung nicht angehoben werden und die gewünschte Faserorientierung im Querschnitt stellt sich ein. Bei der Maßgenauigkeit der Stirnflächen sollen diese ohne Nachbearbeitung hergestellt werden. Dies erfordert jedoch eine präzise, möglichst stationäre Stirnschalung. Aufgrund dieser Anforderungen wurde ein Herstellungsverfahren entwickelt, dessen System nun und im Weiteren experimentelle Untersuchungen zur Optimierung und Verifikation desselben vorgenommen werden.

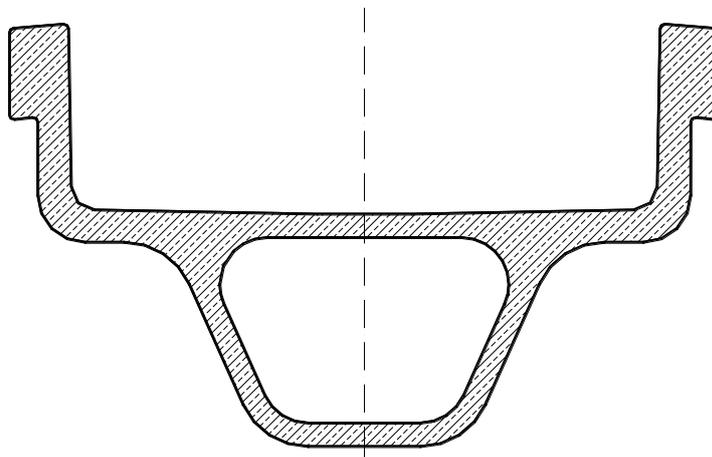


Abbildung 31: Fahrbahnträger

3.1 Herstellungsverfahren für den Fahrbahnträger

Für die Herstellung des Fahrbahnträgers benötigt es ein präzises Schalungssystem, das sich aus folgenden Teilen besteht.

- Außenschalung
- Konterschalung
- Innenschalung
- Stirnschalung

3.1.1 Außenschalung:

Die Außenschalung wird aus Beton hergestellt. Sie soll massiv und robust sein und als stationäre Werkseinrichtung fungieren. Die Herstellung der Außenschalung erfolgt in drei Schritten (siehe Abbildung 32).

- Schritt 1:

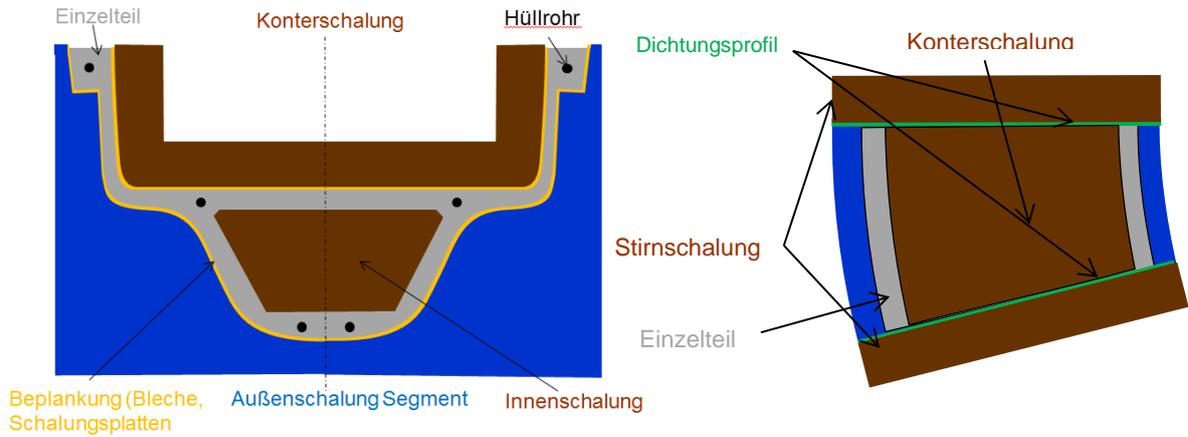
Es werden ca. 2 m lange gerade oder gekrümmte Einzelteile des Fahrbahnträgers aus Faserbeton hergestellt. Für die Herstellung dieser Einzelteile stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl, die für eine Entscheidungsfindung noch auf ihre Wirtschaftlichkeit überprüft werden müssen. Bei einer dieser Möglichkeiten werden die benötigten Außen-, Konter-, und Innenschalung durch CNC-gefräste Spanten aus Sperrholzplatten hergestellt. Anschließend werden die Spanten mit Blechen und Schalungsplatten beplankt und zusammengebaut. Die Verschraubungen und auftretenden Fugen werden verspachtelt und geschliffen um eine möglichst glatte Oberfläche zu bekommen. Bei der zweiten Möglichkeit werden die Außen- und Konterschalung aus einem geeigneten Vollmaterial gefräst. Die Innenschalung kann auch als verlorene Schalung (Kunststoffschaum) ausgeführt werden.

- Schritt 2:

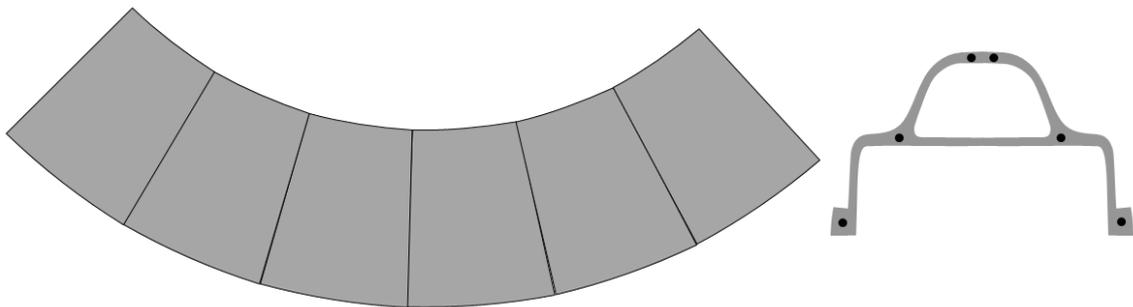
Die zuvor hergestellten Segmente werden zu einem Musterstück in den endgültigen Längen des späteren Fahrbahnträgers zusammengesetzt und mittels weniger interner, verbundloser Monolitzen zusammen gespannt. Anschließend werden die Oberflächen durch Verspachteln und Schleifen nachbearbeitet, um eine präzise Außenkontur des Musterstücks zu erhalten.

- Schritt 3:

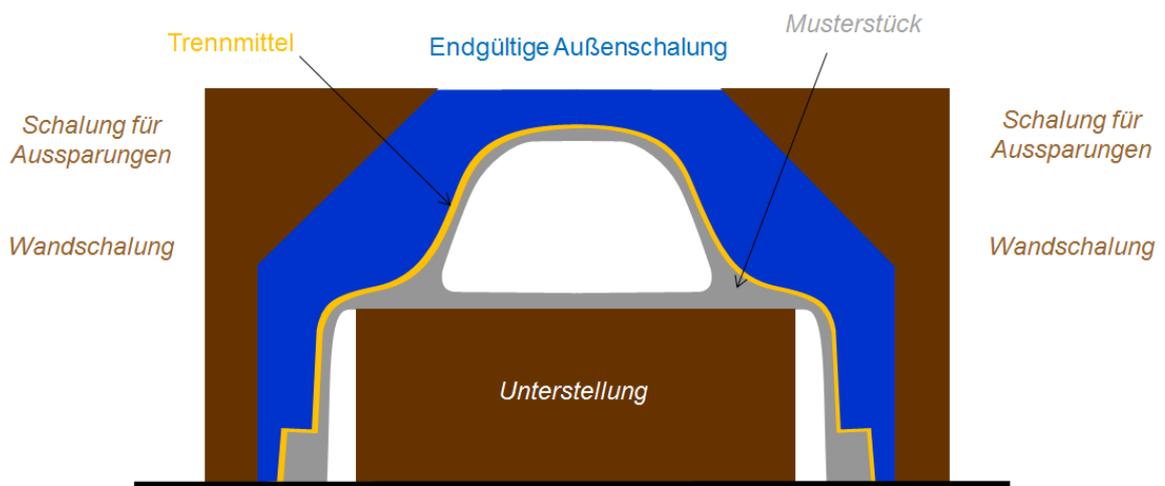
Dieses Musterstück dient nun als Schalung für die Herstellung der endgültigen Außenschalung. Dazu wird das Musterstück auf den Kopf gestellt und von allen Seiten mit einer Wandschalung verschlossen und mit Faserbeton oder Stahlbeton ausgegossen. Für die Gestaltung der endgültigen Außenschalung gibt es mehrere Möglichkeiten der Material- und Gewichtersparnis; z.B. das „Abschneiden der Ecken“ wie in Abbildung 32 beispielhaft dargestellt. Die Konterschalung wird analog dem Musterstück abgeformt.



Schritt 1: Herstellung von 2m-Segmenten; links Schnitt, rechts Grundriss



Schritt 2: Zusammenspannen und Oberflächenvergütung



Schritt 3: Mehrmaliges Abformen der endgültigen Außenschalungen (blau)

Abbildung 32: Herstellung der Außenschalung

3.1.2 Innenschalung:

An die Innenschalung werden keine besonderen Anforderungen betreffend Optik und Maßhaltigkeit gestellt, solange die Mindestwandstärken der Fahrbahnträger dadurch nicht unterschritten werden. Das derzeitige Konzept sieht eine Innenschalung aus Stahl vor. Da diese leichter zu realisieren ist als aus Beton. Die Schalung besteht aus 2 Teilen, die übereinander angeordnet werden.

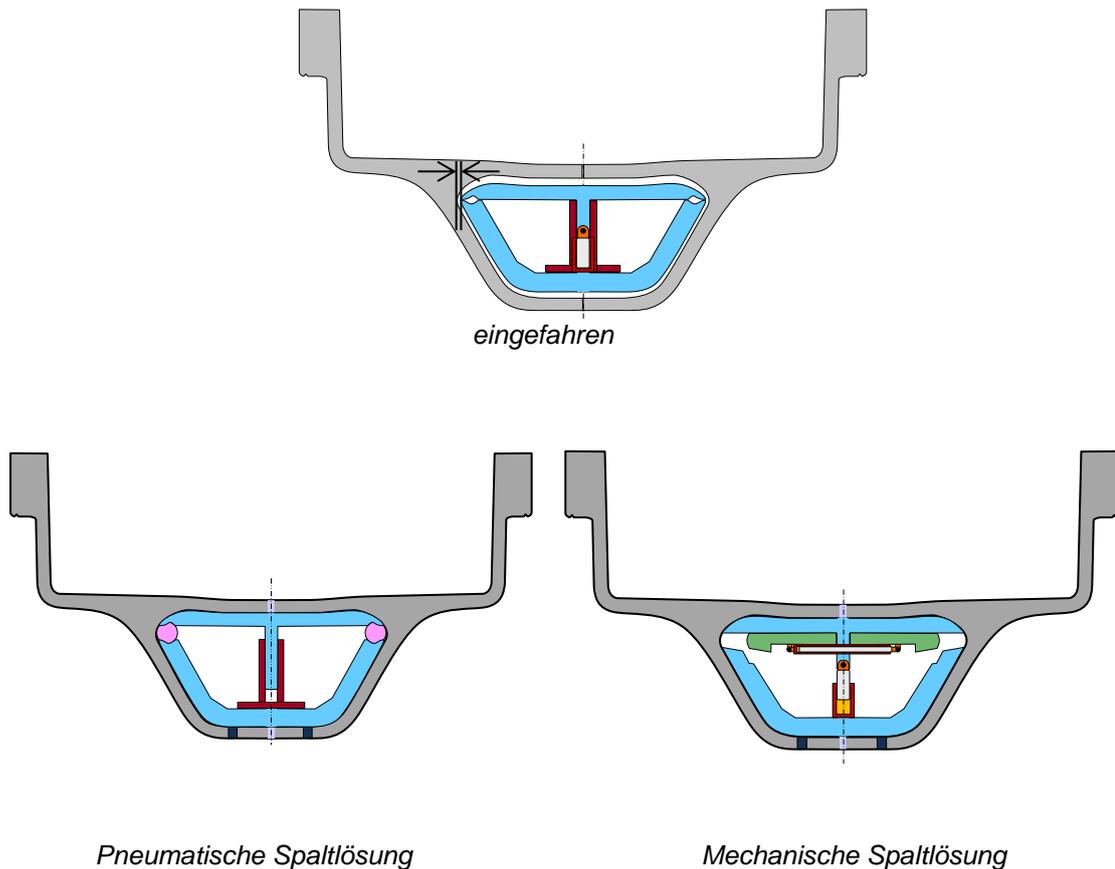


Abbildung 33: Innenschalung Varianten zur Spaltlösung

Die Teilung erfolgt an der breitesten Stelle des Hohlraums im Querschnitt, um durch einfaches vertikales Zusammenfahren der beiden Teile, einen Rundum-Spalt fürs Ausschalen zu bekommen. Das Zusammenfahren erfolgt entweder hydraulisch oder elektromechanisch (Spindelantriebe). Im Bereich der Schalungsteilung wird der offene Spalt im ausgefahrenen Zustand entweder mittels pneumatischer Membranschalung (Schlauch) oder mittels horizontal einfahrbarer, fester Schalungsteile geschlossen (siehe Abbildung 33)

3.1.3 Stirnschalung:

Wie bereits erwähnt, muss die Stirnschalung extreme Maßhaltigkeitsanforderungen erfüllen. Einerseits muss die Ebenheit gewährleistet sein, um die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit der Kontaktstöße sicherzustellen und andererseits muss die Länge der Fahrbahnträger und insbesondere die planmäßige Ausrichtung der Stirnfläche mit sehr engen Toleranzen gewährleistet werden. Dazu wurden 2 Möglichkeiten ausgearbeitet.

Bei der ersten Variante sollen Fahrbahnträger in einer fixen Länge in großen Serien hergestellt werden. Die zweite Variante ist für ständig variierende Längen konzipiert worden. In beiden Varianten gibt es an einem Trägerende eine fix montierte, stationäre Stirnschalung, die in Ihrer Form eine präzise ebene Wand darstellt.

- Variante 1 fixe Länge:

Für die fixe Länge werden mit großer Präzision 2 Säulen oder Scheiben am anderen Ende des Trägers fix montiert. Eine mobile ebene Stirnschalungsplatte kann nun an die Säulen oder Scheiben angeklemt werden. Die Längentoleranzen in den Betonaußenschalungen werden von Dichtungsprofilen aufgenommen. Für das Ausfädeln der Innenschalung wird die mobile Stirnschalung wieder entfernt.

- In Variante 2 variable Längen

Hier wird ein fertiges Fahrbahnträgersegment, ähnlich jenem zur Herstellung der Außenschalung (Abbildung 32, Schritt 1) als Stirnschalung verwendet. Die als Stirnschalungsfläche verwendete Fläche kann bei Bedarf CNC-geschliffen werden, um die exakte Ausrichtung der Stirnfläche normal auf die Trägerachse und die Ebenheit sicherzustellen. Dieses Stirnschalungssegment kann nun in die stationäre Außenschalung bei jeder gewünschten Länge eingelegt werden. Die exakte Ausrichtung ergibt sich durch den großflächigen Kontakt zur Außenschalung. Die Innenschalung wird durch das Stirnschalungssegment geführt (siehe Abbildung 33).

Die Lagerung der Konterschulung und die Innenschalung werden aufgrund der anzustrebenden Maßhaltigkeit und den flexibleren Gestaltungsmöglichkeiten über an der Außenschalung angebrachte Abstandhalter aus UHPC gelagert. Die Abstandhalter verbleiben dabei im Fahrbahnträger.

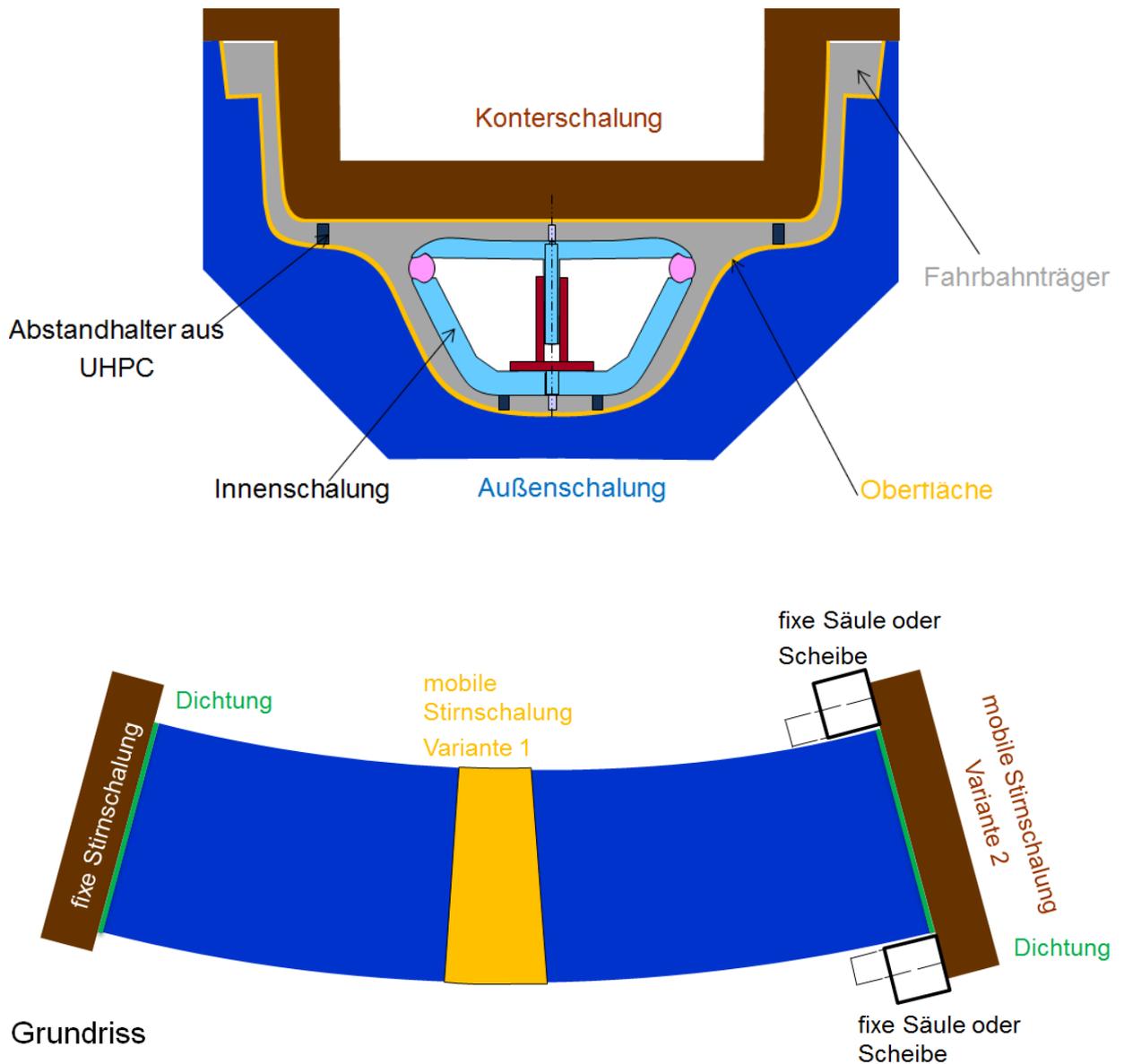


Abbildung 34: Fahrbanträgerschalung komplett

Dieses Fertigungskonzept ist in erster Linie eine Grundidee und muss durch Untersuchungen, Versuche usw. auf seine Durchführbarkeit überprüft werden und gegebenenfalls optimiert werden. Ein Teil dieser Untersuchungen wird in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

- Befüllmethode (Faserorientierung)
- Schalungsvariante 1 (Spanten + Beplankung)
- Schalungsvariante 2 (volles Material)
- Zweiteilige Innenschalung

3.2 Befüllmethoden

Da die Qualität und insbesondere das Zugtragverhalten des faserbewehrten UHPCs vom Fließvorgang des Betons während des Gießens stark beeinflusst werden, muss dieser ein optimierter und kontrollierter Prozess sein. Dazu wurde eine Test- Schalung für einen 0,5m langen Fahrbahnträger im Maßstab 1:1 konstruiert (siehe Abbildung 35). Für die geeignete Befüllmethode sollen drei Varianten untersucht werden.

- Einseitiges befüllen
- Beidseitiges befüllen
- Einseitiges Befüllen mit Unterbrechung des Betonstroms

Zur Beobachtung, Dokumentation und Analyse dieser Methoden, wird die dafür notwendige Schalung an der Front mit einer Acrylglasplatte versehen.

Bei der ersten Methode (einseitiges Befüllen) wird der Beton nur an einer Seite (rechte Leitplanke) in die horizontal aufrecht stehende Schalung gefüllt. Dies dient der Entlüftung der Schalung, da bei einer zweiseitigen Befüllung ein Luftstau in der Schalung entstehend könnte. Es wird angenommen, dass der Beton zunächst den Unteren Teil der Schalung (den Kern) zum Teil füllt (siehe Abbildung 35 rote Pfeile). An einer bestimmten Stelle wird sich der Beton am rechten Steg entlang aufstauen und der Beton fließt über die Fahrbahn weiter (siehe Abbildung 35 gelbe Pfeile). Nun haben sich zwei Betonströme eingestellt. Im Idealfall sollten sich die beiden Ströme an der linken Auskrägung der Fahrbahn (siehe Abbildung 35 Kreis). wieder treffen, um Fehlstellen der Fasern am wichtigen Hohlprofil zu vermeiden, und sich in einem gemeinsamen Strom den restlichen Querschnitt ausfüllen (siehe Abbildung 35, blaue Pfeile).

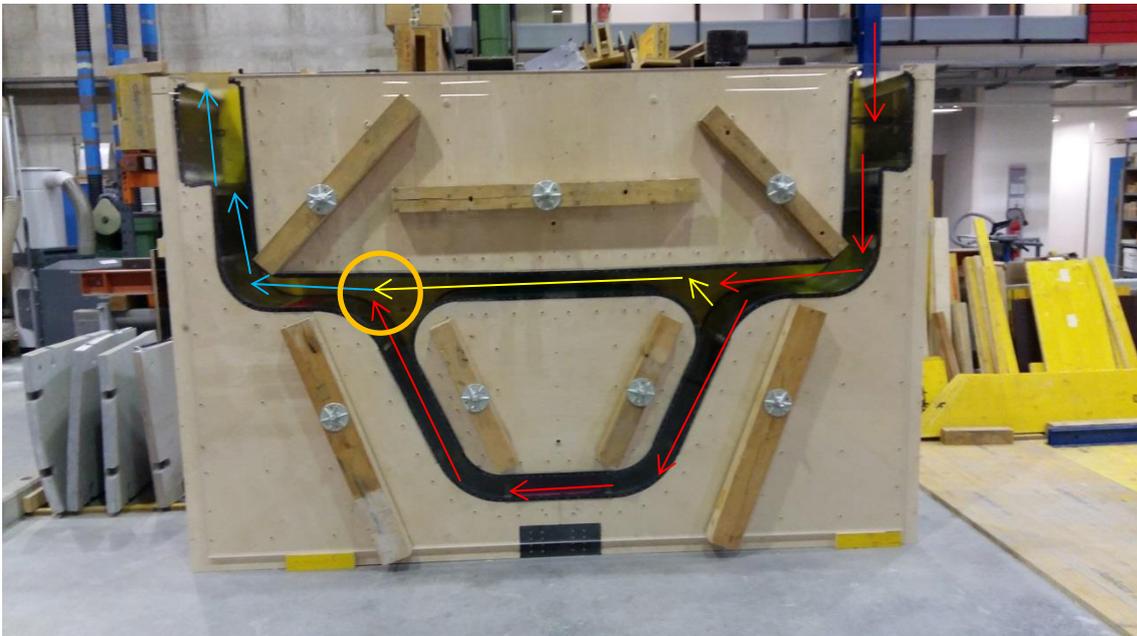


Abbildung 35: Füllprozess

Bei der zweiten Methode (beidseitiges Befüllen) soll die Betonierzeit verringert werden. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass sich im Querschnitt ein Luftstau bildet, der sich wahrscheinlich nicht vollständig rückbilden wird.

Über die dritte Methode soll Betonstrom in der Fahrbahnmitte kurzzeitig durch eine temporäre Abschaltung unterbrochen werden (siehe Abbildung 36). Erst nachdem der Betonstrom den linken Steg fast vollständig gefüllt hat, wird, die Unterbrechung wieder gelöst und es sollen sich, wie bei der ersten Methode die beiden Betonströme am linken Fahrbahnrand wieder treffen, und in einem gemeinsamen Strom den restlichen Querschnitt auffüllen.

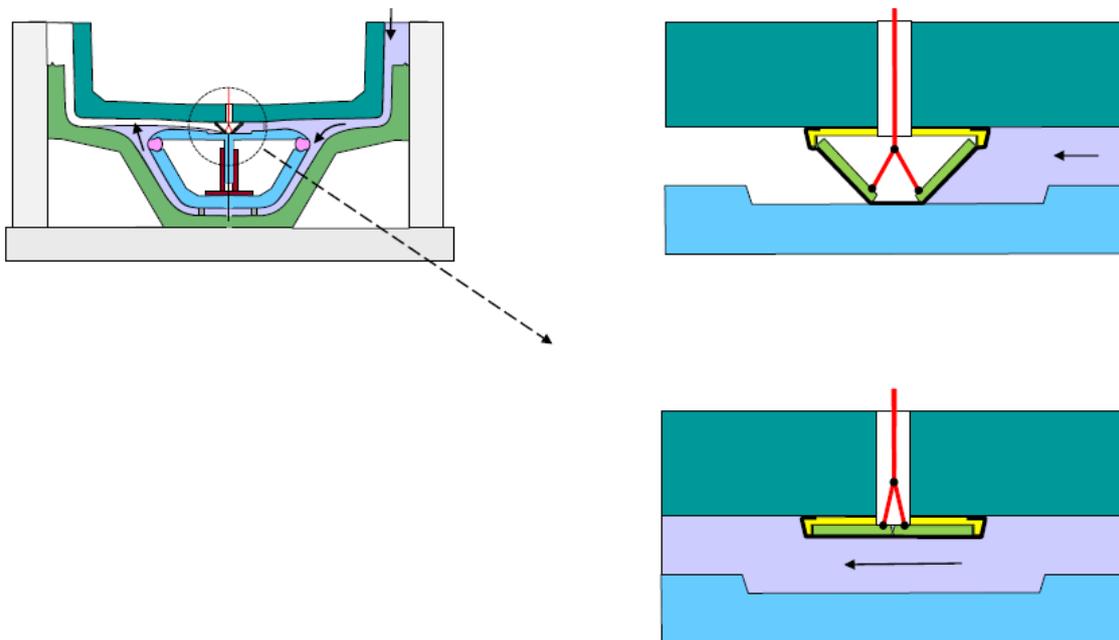
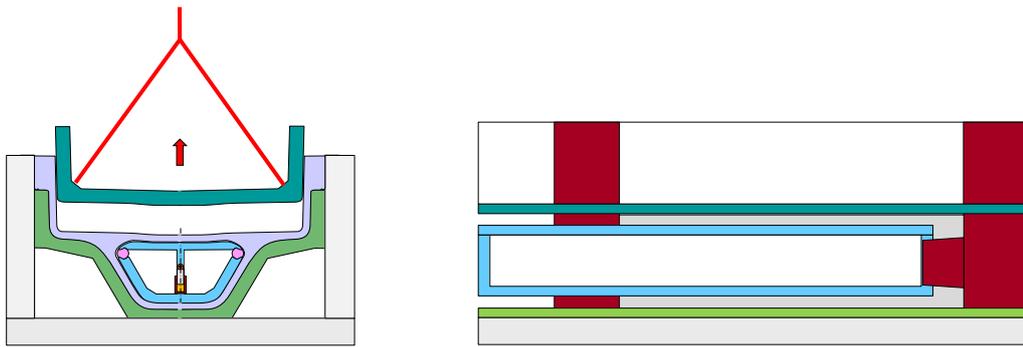


Abbildung 36: Temporäre Abschaltung

3.3 Ausschalen

Das Ausschalen erfolgt in mehreren Schritten:

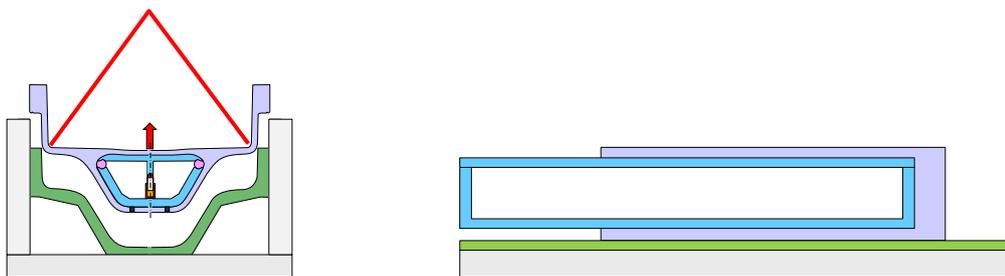
- Schritt 1: Die Konterschabung wird weggehoben.
- Schritt 2: Die mobile Stirnschalung wird entfernt
- Schritt 3 Der Fahrbahnträger samt Innenschabung wird weggehoben
- Schritt 4: Die Innenschabung wird aus dem Querschnitt gezogen. Dabei wird zuerst die Innenschabung zusammengefahren, anschließend wird die Innenschabung an beiden Enden angehoben, sodass ein Rundumspalt entsteht (Stapler und Hebevorrichtung). Zum sanften und gleichmäßigen Herausziehen der Innenschabung mit dem Stapler wird am Ende entweder außerhalb oder im Querschnitt eine Rolle angebracht. Eine andere Möglichkeit die Innenschabung zu entfernen besteht darin, sie auf einer Gleitschicht herauszuziehen.



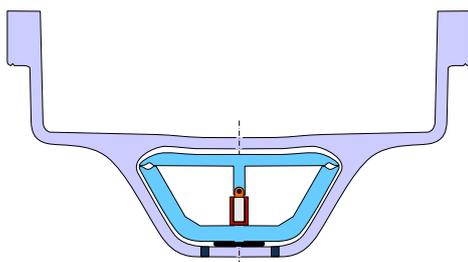
Schritt 1 Wegheben der Konterschalung



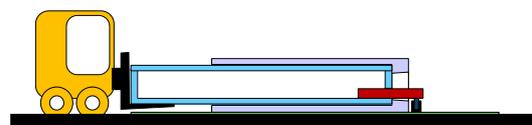
Schritt 2: entfernen der mobilen Stirnschalung



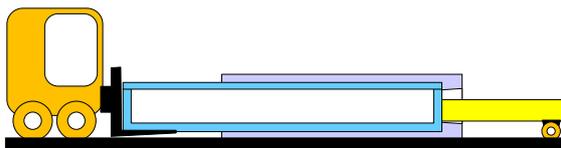
Schritt 3: Fahrbahnträger samt Innenschalung wegheben



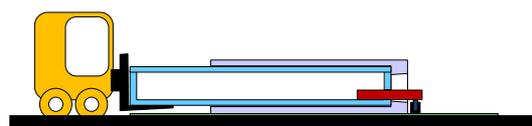
Schritt 4: Innenschalung einfahren



Schritt 4.1 Innenschalung anheben



Schritt 4.2: Innenschalung herausziehen
mittels Rolle



Schritt 4.3: innenschalung herausziehen
mittels Gleitschicht

Abbildung 37: Ausschalen

4 Experimentelle Untersuchungen zum Befüllvorgang

4.1 Ziel der Untersuchungen

Ist es eine, geeignete Befüllmethode zu finden, die folgende Kriterien erfüllt:

- Einfache Handhabung:
Keine aufwendigen zusätzlichen Konstruktionen.
- Entlüftung:
Es sollen sich keine Lufteinschlüsse in der Schalung bilden
- Faserorientierung:
Es soll sich die gewünschte Faserorientierung parallel zur Querschnittskontur einstellen.

4.2 Versuchsanordnung und Auswertekonzept (methodisch)

Da die Qualität und insbesondere das Zugtragverhalten des faserbewehrten UHPCs vom Fließvorgang des Betons während des Gießens stark beeinflusst werden, muss dieser ein optimierter, kontrollierter Prozess sein. Dazu wurde eine Test- Schalung für einen 0,5m langen Fahrbahnträger im Maßstab 1:1 gebaut (siehe Abbildung 38).



Abbildung 38: Schalung für Befüllversuch

Die anschließende Analyse der Befüllmethode wird in erster Linie anhand des aufgenommenen Videos und Fotos erfolgen. Eine weitere Analyse wird mit der zerstörungsfreien FibreScan-Methode (richtungsabhängigen Zugtrageigenschaften) erstellt.

Des Weiteren werden Betonierprotokolle der Mischung aufgenommen. Eine Videokamera wird vor der Schalung an der Acrylglasplatte aufgestellt um den Betonfluss aufzuzeichnen.

Um den Betonfluss im Video besser verfolgen und später nachvollziehen zu können, werden an der Schalung Farbindikatoren platziert. Diese Farbindikatoren bestehen aus gefärbtem Kies (1,6-2,5mm Körnung), der an der Querschnittsunterseite, Fahrbahnunterseite und an den Seitenflächen positioniert wird (siehe Abbildung 39). Dieser Kies soll später im ausgehärteten Zustand zeigen, wie sich der Betonfluss in der Schalung verhalten hat.



Abbildung 39: Farbindikatoren

4.3 Schalungsbau

Die Schalung für diesen Fahrbahnträger setzt sich aus drei Teilen zusammen:

- Außenschalung: Entspricht der äußeren Kontur des Fahrbahnträgers. Besteht aus drei Spanten zu je zwei Teilen. Für den Zusammenbau dieser zwei Teile wird ein Laschenstoß vorgesehen.
- Konterschalung: Entspricht der Kontur der späteren Fahrbahn.
- Innenschalung: Die Innenschalung entspricht der Kontur des Kerns des Trägers. Diese wird konisch gefertigt (1cm an allen Seiten auf 0,5m), damit sie beim Ausschalen nicht im Querschnitt stecken bleibt.

Alle Schalungsteile werden nach einem einfachen Prinzip mit Spanten und einer Beplankung ausgeführt. Für die notwendige Aussteifung werden Querschotte zwischen den Spanten angebracht. Als Stirnschalung werden auf einer Seite zwei einfache Schalungstafeln verwendet und mit den äußeren Spanten der Schalungsteile verschraubt. Auf der zweiten Stirnseite wird eine Acrylglasplatte angebracht um den Fließvorgang des Betons während dem Befüllprozess beobachten zu können. Um den Frischbetondruck aufzunehmen, wird die Schalung an den Außenseiten und Stirnseiten mittels Ankerstäben verspannt. Für die Abdichtung wird ein Moosgummi Kederprofil an den Stirnseiten angebracht, welches durch die Verschraubung der Stirntafeln angepresst wird. Damit die Konter-, und Innenschalung zentrisch platziert sind, werden diese und die Stirnschalungen mit Zentrierbohrungen versehen. Über sogenannte Zentrierbolzen werden dann die Schalungen in die richtige Position gebracht. Als Abschluss der abgerundeten Leitplanke wird an der Außenschalungsseite ein Deckel angebracht. Dieser ist demontierbar, da sonst ein späteres Ausschalen durch anheben des Querschnitts beim Ausschalen nicht möglich wäre. (siehe Abbildung 40 - Abbildung 45)

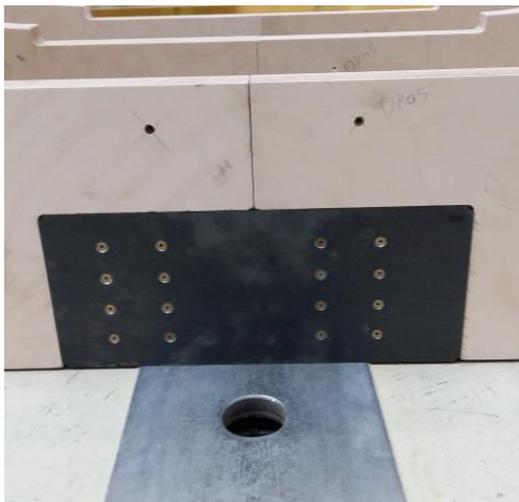


Abbildung 40: Laschenstoß



Abbildung 41: Deckel



Abbildung 42: Schalungsteile mit Beplankung



Abbildung 43: Abdichtung Kederprofil



Abbildung 44: Stirnschalung mit Acrylglasplatte



Abbildung 45: Stirnschalung mit Schaltafeln

4.3.1 Acrylglas [27]

Als Acrylglas oder auch besser bekannt unter dem Markennamen Plexiglas werden als Polymethylmethacrylate (PMMA) bezeichnet. Die Herstellung des PMMA erfolgt über Polymerisation des Methacrylsäuremethylester zu Polymethacrylsäuremethylester.

Dabei ergeben die Polymerisate des Methacrylsäuremethylester amorphe Thermoplaste, die sich durch ihre gute Lichtdurchlässigkeit und Witterungsbeständigkeit auszeichnen.

PMMA besitzt eine Dichte von $1,18 \text{ g/cm}^3$. Es ist gegen wässrige Säuren, Laugen, Terpentinöl, Benzin und mineralische Öle chemisch beständig. Von Treibstoffgemischen, Äther, polaren Lösungsmitteln und konzentrierten Säuren wird es jedoch angegriffen. Die Wärmebeständigkeit geht hinauf bis ca. $65 \text{ }^\circ\text{C}$, bei wärmestabilisiertem Acrylglas reichen sie bis etwa $95 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die von Natur aus kristallglasklaren Erzeugnisse weisen einen brillanten Oberflächenglanz auf. Sie sind transparent oder gedeckt eingefärbt. Die mechanischen Eigenschaften reichen von einer Zugfestigkeit bis zu 80 N/mm^2 und einer Druckfestigkeit von bis zu 140 N/mm^2 auf. Die Oberfläche ist hart, aber nicht vollständig kratzfest.

Die Polymethylmethacrylate lassen sich in drei Sorten einteilen.

- PMMA-Formmassen sind hauptsächlich Suspensionspolymerisate, die als Granulate durch Spritzgießen und Extrudieren zu Formteilen und Halbzeug verarbeitet werden,
- Gegossenes PMMA wird bei der Massepolymerisation unmittelbar zu Halbzeug (Blöcken, Tafeln, Rohre) polymerisiert,
- Copolymerisate werden meist mit Acrylnitril ebenfalls durch Substanzpolymerisation zu Acrylnitril-Methylmethacrylat (AMMA) hergestellt.

Die Tabelle 1 zeigt die Eigenschaften der verschiedenen PMMA – Sorten.

Tabelle 1: Eigenschaften von PMMA [27]

Eigenschaften		PMMA		
		extrudiert	gegossen	Copolymerisate
Elastizitätsmodul	N/mm^2	2000 bis 3000	2000	1500
Zugfestigkeit/ Streckspannung	N/mm^2	50 bis 80	80	90
Druckfestigkeit	N/mm^2	120 bis 135	140	140
Biegefestigkeit/ Grenzbiegespannung	N/mm^2	100 bis 140	135	165
VICAT – Erweichungstemperatur (VST)	$^\circ\text{C}$	80 bis 110	125	95

Die Eigenschaften und Bezeichnungen von extrudierten PMMA sind der DIN EN ISO 8257 geregelt.

Die einzelnen Sorten werden anhand ihrer, infolge weichmachender Zusätze, mechanischen Eigenschaften, Wärmeformbeständigkeit und Schmelzviskosität unterscheiden.

Das aus Massepolymerisation hergestellte gegossene Acrylglas ist optisch besonders hochwertig. Seine Lichtdurchlässigkeit beträgt ca. 92% und ist auch bei dickwandigen und gebogenen Formteilen glasklar und weitgehend verzerrungsfrei.

Thermoplastisch kann das gegossene Acrylglas nicht verarbeitet werden. Bei einem Temperaturbereich zwischen 140 °C und 170 °C lässt es sich jedoch thermoelastisch umformen. Es eignet sich sehr gut für die spanende Bearbeitung.

Copolymerisate weisen gegenüber PMMA eine erhöhte Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit auf. Die Bruchdehnung ist etwa um das Zehnfache höher. Sie sind dagegen nicht glasklar wie PMMA, sondern haben eine gelblich transparente Eigenfarbe.

Weitere Angaben zu den Eigenschaften von gegossenen oder extrudierten Acrylglas und dessen Bearbeitung sind der Literatur [28], [29] und [30] zu entnehmen.

4.3.2 Einzelteile, Fertigung

Wie bereits zuvor erwähnt, werden die einzelnen Schalungsteile aus Spanten und einer Beplankung ausgeführt. An den Spanten werden die Außenkonturen der einzelnen Schalungsteile mit einem Untermaß, das der Dicke der Beplankung entspricht, mittels eines CNC- gesteuerten Roboters aus 30mm starken Birken Sperrholzplatten ausgefräst (siehe Abbildung 46).

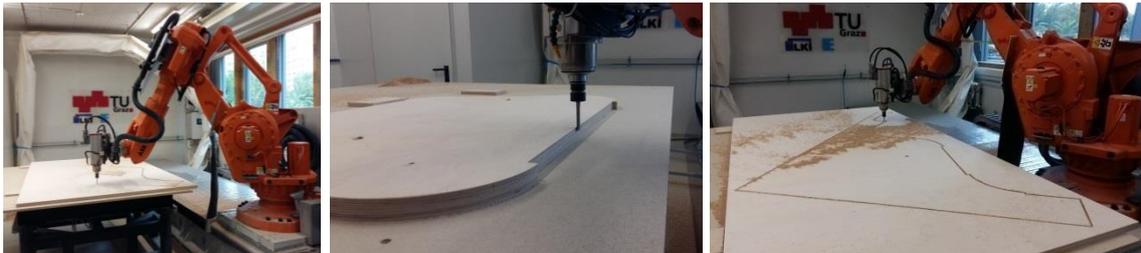


Abbildung 46: Fräsroboter

Die Beplankung besteht aus 3mm starken, verzinkten Blechen und 21mm starken Dokaplex- Platten. Für die Rundungen des Querschnitts werden die Bleche und für die Geraden die Schalungsplatten verwendet. Die verzinkten Bleche werden den Rundungen des Querschnitts angepasst und vorgefertigt. Wichtig dabei ist, dass die Bleche ein 20mm langes tangenciales Ende aufweisen um beim Zusammenbau an den Ausfräsungen der Schalungsplatten bündig anzuschließen und verschraubt werden zu können. Des Weiteren werden die Bleche mit Bohrungen und Senkungen für den späteren Zusammenbau mit dem Spanten und Platten versehen. Die Querschotten werden aus den 30mm starken Sperrholzplatten zugeschnitten (siehe Abbildung 47, Abbildung 48).



Abbildung 47: Querschott (Innenschalung)

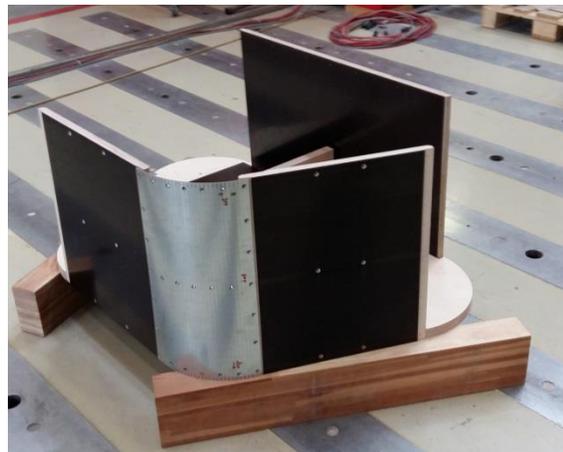


Abbildung 48: Beplankung mit Blech und Schalungsplatten (Innenschalung)

Sämtliche notwendigen Details der Konstruktion, sowie Abmessungen können den Plänen im digitalen Anhang entnommen werden.

4.3.3 Zusammenbau/Gesamtmontage

Um schlussendlich eine winkelgenaue, ebene Schalung zu bekommen, wird der Zusammenbau der einzelnen Schalungsteile am Aufspannfeld der Werkhalle vorgenommen.

Zuerst werden die äußere (vorderste Spante) und die mittlere Spante mit den Querschotten verschraubt. Anschließend wird die zweite Spante über die Querschotten der erste Spante verbunden (siehe Abbildung 49, Abbildung 50). Zum Schluss wurde die dritte Spante mit der ersten und zweiten Spante über die Querschotten verbunden.



Abbildung 49: Spanten mit Querschotten verschraubt (Konterschalung)

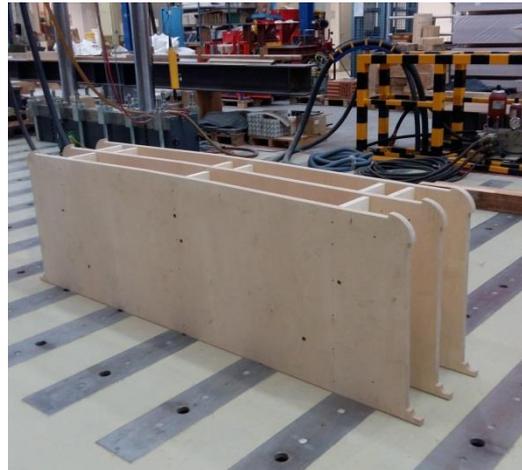


Abbildung 50: Spanten mit Querschotten gesamt (Konterschalung)

Bei der nachfolgenden Beplankung wird zunächst mit den Dokaplex- Platten begonnen. Diese werden an den zugeordneten Stellen mit den Spanten verschraubt. Zum Schluss werden dann die verzinkten Bleche angebracht und mit den Spanten und Platten verschraubt (siehe Abbildung 51)



Abbildung 51: Anbringung der Dokaplex- Platten und Bleche (Konterschalung)

Nach diesem Prinzip werden alle drei Schalungsteile (Außen-, Konter-, und Innenschalung) zusammengebaut.



Abbildung 52: Schalungsteile (Außen-, Konter-, Innenschalung)

Bevor es an die Gesamtmontage der Schalung geht müssen noch alle versenkten Schrauben verspachtelt und anschließend geschliffen werden damit der Querschnitt beim ausschalen nicht an den Schraubenköpfen durch eine Dübelwirkung hängen bleibt oder die Innenschalung dadurch nicht mehr aus dem Kern zubekommen ist. Des Weiteren bekommt man auch eine glatte Betonoberfläche (siehe Abbildung 53)

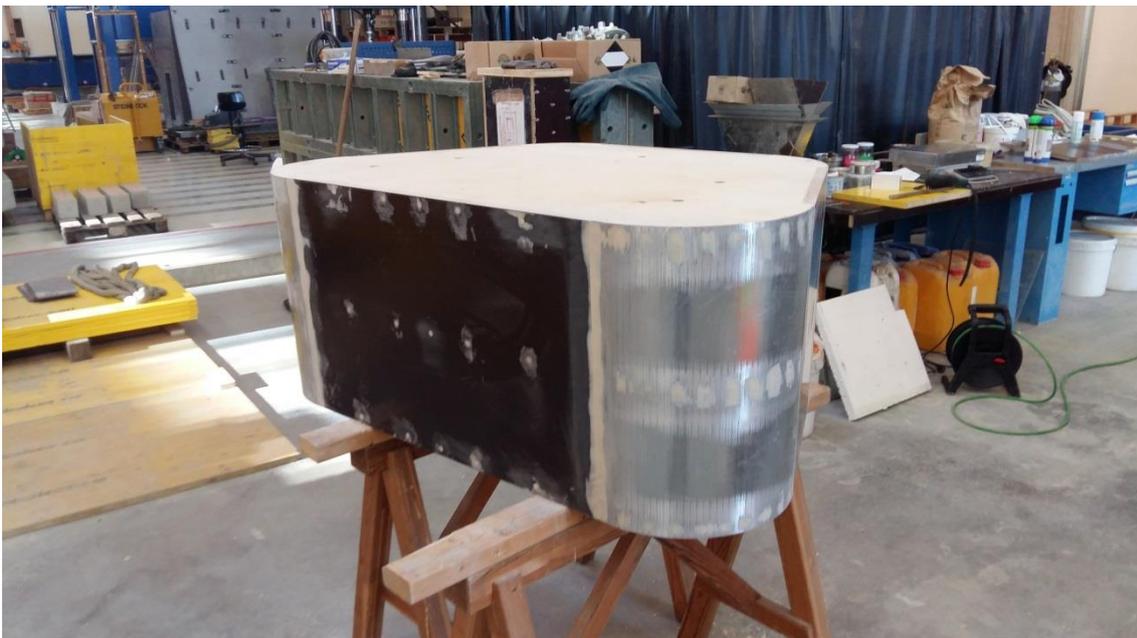


Abbildung 53: Verspachteln und Schleifen der Innenschalung

Als Spachtelmasse wird eine 2- Komponentenspachtelmasse (Füllspachtel in der Autoindustrie) verwendet. Diese Spachtelmasse ist auf Metall-, Holz-, Kunststoff und Betonoberflächen anwendbar und wird zum Füllen von Löchern und Unebenheiten und Überspachteln vorbehandelter Flächen verwendet. Somit ist sie ideal für das Verspachteln der Schalungsoberfläche geeignet. Die genaueren Angaben zu dieser Spachtelmasse können dem Technischen Datenblatt aus der Literatur [31] entnommen werden.

Nachdem Verspachteln und Schleifen wird das Dichtungsprofil an beiden Stirnseiten mittels Klammern angebracht. Für eine bessere Befestigung wurde eine Doppelklammer verwendet (siehe Abbildung 54 - Abbildung 55)



Abbildung 54: Anbringung des Dichtungsprofils an Schalungsteile



Abbildung 55: Klammern

Vor der Montage werden alle Oberflächen der Schalung gereinigt und mit einem Trennmittel versehen. Als Trennmittel wird ein Spezialwachs, genannt Rheofinish 323 P (neue Bezeichnung Master Finish FW 323), verwendet. Dieses Trennmittel eignet sich für saugende und vergütete Holzschalungen (Dokaplex-Platten) und schützt Metallteile vor Korrosion. Die genaueren Angaben zu diesem Trennmittel können dem Technischen Datenblatt aus der Literatur [32] entnommen werden.

Die Gesamtmontage der Schalung läuft folgend ab:

Zuerst wird die Außenschalung auf den Betonierplatz aufgestellt, so dass man problemlos drumherum gehen kann. Anschließend wird die erste Schalungstafel an die Außenschale über die vorgebohrten Bohrungen angeschraubt. Dabei wird die Dichtung wie gewünscht an die Schalung angedrückt (siehe Abbildung 56)



Abbildung 56: Außenschalung mit Schalungstafel

Als nächstes werden zur Positionierung und Zentrierung der Innenschalung nicht die vorgesehenen Bohrungen für die Bolzen, sondern angepasste Holzklötze verwendet (siehe Abbildung 56, roter Kreis). Auf die Holzklötze wird anschließend die Innenschalung gestellt und eingemessen. Mittels Ankerstäben und Kanthölzer wird die Innenschalung an die Stirnschalung fürs erste befestigt um die Lage zu sichern (siehe Abbildung 57). Nun wird die Schalttafel schlussendlich auch an die Innenschalung verschraubt und die Ankerstäbe und Klötze können anschließend entfernt werden.



Abbildung 57: Innenschalung mittels Ankerstäben an Stirnschalung befestigt.

Als nächsten Schritt wird die Acrylglasplatte mit einem Glasheber an die Vorderseite der Schalung angebracht, mit den Ankerstäben und den dafür vorgesehenen Löchern in Position gebracht und mit der Außen- sowie Innenschalung verschraubt.

Nach demselben Prinzip wie bei der Innenschalung wird auch die Konterschalung montiert. Zunächst wird sie auf die an der Außenschalung angebrachten Holzklötze gestellt, anschließend über Ankerstäbe an die Acrylglasplatte befestigt und an derselben miteinander verschraubt (siehe Abbildung 58). Währenddessen am Boden und an der Fahrbahn der Schalung werden die Farbindikatoren verteilt. Nach der Verschraubung werden die Ankerstäbe wieder entfernt und die zweite Schalttafel wird an der Rückseite der Schalung angebracht und verschraubt (siehe Abbildung 59). Zwischen den Schalttafeln wird noch ein Dichtungsband eingeklebt.



Abbildung 58: Befestigung der Konterschaltung mittels Ankerstäben



Abbildung 59: zweite Schalttafel

Zum Schluss werden mittels Kanthölzer und Ankerstäben die Stirnseiten mit den Schalungsteilen verspannt. Das Gleiche geschieht an den Seiten am Boden und in 1,50m Höhe mittels Mehrzweckriegel und Ankerstäben. Zur Sicherheit wird noch eine weitere Verspannung Stirnseitig an der untersten Seite des Querschnitts mittels Dokaträgern, dazwischenliegende Kanthölzer und Ankerstäben vorgenommen. All diese Maßnahmen dienen dazu, um den Betondruck aufzunehmen (siehe Abbildung 60).



Abbildung 60: Fertige Montage

4.4 Erster Befüllversuch und Ergebnisse

Um den Betonfluss zu steuern wird zunächst die gesamte benötigte Betonmenge in einen Krankübel (siehe Abbildung 61) gegeben. Dieser wird anschließend mit dem Kran an die rechte Öffnung der Schalung hochgefahren. Über einen Bildschirm, der mit der auf die Acrylglasplatte gerichtete Videokamera verbunden ist, wird der gesamte Fließprozess live übertragen. Somit kann dieser während des Befüllens beobachtet und mittels einer Handkurbel am Kübel die Menge des fließenden Betons gesteuert werden (siehe Abbildung 62).



Abbildung 61: Krankübel



Abbildung 62: Betonflusssteuerung

4.4.1 Betonage

Die Betonage erfolgte am 24.11.2015 und ist folgend von statten gegangen:

- Start des Betonmischens um 14:45 Uhr (siehe Betonierprotokoll)
- Von 14:45 bis ca. 16:10 Uhr wurde die Betonmischung durchgeführt und die gesamte Kubatur wurde vorerst in den Krankübel gegeben. Für spätere Druckfestigkeits- und E-Modul- Prüfungen wurden vier Würfel (10/10/10 cm) und drei Zylinder (\varnothing 10 x20 cm) betoniert. Genauere Angaben zum Mischablauf können dem Betonierprotokoll entnommen werden.
- Der Krankübel wurde über der Schalung positioniert und der Füllprozess begann. Nach ca. zwei Minuten war die Schalung bis auf 5 cm an der linken Leitplanke voll (Abbildung 64). Danach dauerte es noch weiter 5 Minuten während der Beton sich weiter in der Schalung ausnivellierte und an der rechten Öffnung nachgefüllt wurde bis die Schalung voll war.



Abbildung 63: Start des Befüllens



Abbildung 64: Ende des Befüllens

Die detaillierten Angaben zu Betonzusammensetzung, Betonmenge, Mischprozess und Frischbetonkennwerte sind dem Anhang A.0 zu entnehmen.

Die Betonrezeptur und der Ablauf des Mischprozesses sind vom Baumeister Dipl.-Ing. Philipp Hadl, BSc erstellt worden.

4.4.2 Analyse des Fließprozesses

Wie man an der Fotoserie erkennen kann, lief der Fließprozess wie im Kapitel 3.2 angenommen ab (siehe Abbildung 65). Das Video zum Fließprozess kann dem digitalen Anhang entnommen werden.



Start des Befüllvorgangs



Beton fließt entlang des Hohlkastens,



staut sich auf



und fließt über die Fahrbahn.



Beide Betonströme treffen sich an der linken Auskragung,



fließen in einem gemeinsamen Strom



und füllen den Rest der Schalung auf.



Schalung vollständig gefüllt,

Abbildung 65: Fließprozess

Dieser Fließprozess lief aber nur durch einen kontrolliert gesteuerten Betonfluss so ab. Der Fließprozess soll aber in der industriellen Fertigung eines Fahrbahnträgers nicht mehr händisch geregelt werden. Dies könnte über eine elektronisch geregelte Klappe (z.B. an einem Einfülltrichter) erfolgen oder die Betonpumpe wird nach der Fließgeschwindigkeit eingestellt. Anhand des Betonierprotokolls lässt sich errechnen, dass die Schalung mit einem Betonvolumen von $0,466\text{m}^3$ in drei Minuten voll war. Die Farbindikatoren, welche bei der Analyse des Betonstroms helfen sollen, tragen auf den ersten Blick nichts Wesentliches dazu bei, da der eingefärbte Kies vom Beton zunächst vor sich hergeschoben und dann überströmt wurde, so dass der Kies an der Oberfläche seine Position leicht veränderte (siehe Abbildung 66). Eine genauere Analyse kann erst erfolgen, wenn der Querschnitt durchtrennt wird und so die Verteilung der Indikatoren im Innern des Querschnitts zu erkennen ist. Diese Analyse wird als nicht notwendig erachtet und deshalb in dieser Arbeit nicht vorgenommen.



Abbildung 66: Farbindikatorenspuren nach dem Ausschalen

4.4.3 Ausschalen und Oberfläche

Das Ausschalen sollte bei der höchsten Hydratationswärme während dem Aushärten erfolgen, um die Innenschalung leicht lösen zu können. Die höchste Temperatur lag an der gemessenen Stelle (Oberkante Brüstung an der Einfüllseite) bei 44,7 C° und wurde am 25. November 2015 um 16:05 erreicht. Danach nahm die Temperatur wieder ab. Aus zeitlichen Gründen wurde jedoch das Ausschalen auf den nächsten Vormittag verschoben. Somit begann das Ausschalen am 26. November 2015 um 10:00 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Temperatur des Querschnitts noch ca. 30 C°.

Das Ausschalen lief folgend ab:

- Zuerst wurden alle zur Verspannung der Schalung notwendigen Ankerstäbe, Kanthölzer, Mehrzweckriegel und Doka- Schalungsträger entfernt und beiseite geräumt.
- Anschließend wurde die Konterschabung mit dem Kran an den zwei Laschen angehoben (siehe Abbildung 67).
- Zum Lösen der Innenschalung vom Querschnitt wurden an der Vorderseite (an der dicksten Stelle des Konischen Kerns) zwei und an der Rückseite ein Mehrzweckriegel angebracht. Diese wurden über Ankerstäbe durch die Löcher der Innenschalung verbunden. An der Vorderseite wurden nun die zwei Superplatten mittel Schlüsseln angezogen. Durch diese Zugwirkung über die Ankerstäbe zum Mehrzweckriegel an der Rückseite sollte sich die Schalung lösen. Da aber die Bleche an dem Querschnitt hafteten (genauer Analyse dazu siehe..), wurde an der Rückseite noch die Dichtung entfernt und mittels einem Vorschlaghammer wurde noch zusätzliche Kraft aufgebracht um die Innenschalung aus dem Kern zu bekommen (siehe Abbildung 68).
- Als letztes wurde der Querschnitt über die Kugelkopfanker mit dem Kran einfach aus der Ausschabung gehoben (siehe Abbildung 69).



Abbildung 67: Anheben der Konterschabung



Abbildung 68: Lösen der Innenschalung

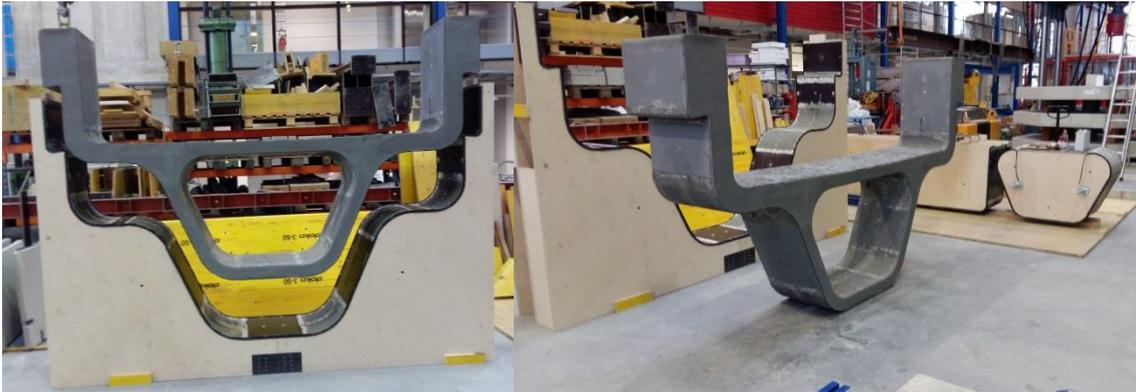


Abbildung 69: Anheben des Querschnitts

Abbildung 70: Ausgeschalter Querschnitt

4.4.3.1 Oberfläche

Die Oberflächenbeschaffenheit ist zwar nicht Gegenstand dieser Untersuchung, wird aber zu Zwecken der Archivierung hier kurz abgehandelt.

An den Oberflächen der Stirnseiten ergaben sich diverse Unterschiede. An der Stirnseite der angebrachten Acrylglasplatte lässt sich eine sehr glatte, gleichmäßige Oberfläche erkennen, wobei an der Einfüllseite des Betons sichtlich mehr Lunker festzustellen sind (siehe Abbildung 71, Abbildung 72). Des Weiteren ist eine Stromflussänderung an der Einfüllseite erkennbar (Staubbildung) (siehe Abbildung 72).



Abbildung 71: Oberfläche Flusseite

Abbildung 72: Oberfläche Einfüllseite,
Stromflussänderung

An der Stirnseite der angebrachten Doka- Schalttafeln lässt sich hingegen eine matte gleichmäßige Oberfläche mit wenigen Lunkern erkennen. Des Weiteren sind Abstreifungen des Trennmittels erkennbar (siehe Abbildung 73).



Abbildung 73: Oberfläche Stirnseite (Doka- Schalttafel)

Die Oberfläche der ebenen Ausführungen des Querschnitts, an dem die Dokaplex- Platten verwendet wurden, zeigten sich gleichmäßige glatte Oberflächen mit wenigen Lunkern (siehe Abbildung 74, Abbildung 76 und Abbildung 77). An der Einfüllseite im unteren Bereich der Leitplanke ist ein großer Lunker zu sehen (siehe, Abbildung 80). Dies könnte durch eine unzureichende Verdichtung geschehen sein. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich die Spachtelmasse teilweise gelöst hat und am Beton haftet.



Abbildung 74: Oberfläche Außenseite der Leitplanke (Flussseite)



Abbildung 75: Oberfläche Außenseite der Leitplanke (Einfüllseite)



Abbildung 76: Oberfläche Innenwand der Leitplanke (Flussseite)



Abbildung 77: Oberfläche Innenwand der Leitplanke (Einfüllseite)

An der Oberfläche der Fahrbahn sind viele, teilweise große Lunker zu erkennen (siehe Abbildung 78). Dies geschieht durch eine nicht vollständige Entlüftung des Betons. Hier muss etwas an der Schalungsoberfläche der Konterschaltung geändert werden.



Abbildung 78: Oberfläche der Fahrbahn

An den Stellen wo die verzinkten Bleche zu Einsatz kamen ist eine sehr raue ungleichmäßige Oberfläche entstanden (siehe Abbildung 79). Auf den Blechen blieben Betonreste zurück (siehe Abbildung 80). Da der Zement im UHPC eine chemische Reaktion mit dem Zink an der Oberfläche hervorruft und dabei Wasserstoff bildet. Das verwendete Trennmittel (Rheofinish 323 P) hätte als Schutzschicht dienen sollen, dass war aber hier nicht der Fall. Auch die Bearbeitung der Bleche spielt hier wahrscheinlich eine Rolle. Durch das Abkanten der Bleche bildeten sich kleine Rillen, indem der Beton eindringen konnte und so haften blieb, da wahrscheinlich an dieser Stelle durch das Abkanten die Zinkoberfläche beschädigt wurde und sie somit aufraute.



Abbildung 79: Betonoberfläche im Bereich der verzinkten Bleche (Beton)



Abbildung 80: Betonoberfläche im Bereich der verzinkten Bleche (Schalung)

4.4.4 Faserorientierung-, Verteilung

Aufgrund der Igelbildung zufolge und der schlechten Vermischung der Stahlfasern mit den restlichen Materialien wird keine Auswertung hinsichtlich der Faserorientierung-, Verteilung durchgeführt, da die gewünschte Menge von 1,25 Vol. % nicht gegeben ist und somit zu keinem repräsentativen Ergebnis führen würde.

4.4.5 Fazit

Da der Fließvorgang wie erwartet vonstatten ging und zu einem guten Ergebnis führte, wird auf die Befüllversuche mit beidseitigem Einfüllen und unterbrechen des Betonstroms verzichtet. Lediglich ein weiterer Versuch mit dem gleichen UHPC und einer kleinen Modifikation am Querschnitt wird durchgeführt. Aufgrund der Igelbildung wird der gleiche UHPC verwendet und darauf geachtet, dass die Stahlfasern ordentlich vermischt werden. Die Farbindikatoren werden dabei nicht mehr zum Einsatz kommen da Sie zum Analysieren des Fließprozesses nicht wesentlich Entscheidendes beigetragen haben. Dazu müsste man den Querschnitt durchtrennen um wohlmöglich die Innere Verteilung der Indikatoren zu untersuchen. Auf die Messung der Faserorientierung mittels der Fibre Scan Methode wurde verzichtet. Da beim Ausschalen die Oberflächen des Fahrbahnquerschnitts an den Bereichen der positionierten Bleche zu einem derart unerwartetem rauhen und unebenen führte, wird vor der zweiten Betonage ein Trennmitteltest erfolgen (siehe Anhang A.2).

4.5 Zweiter Befüllversuch: (Umlenkkonsolen)

In erster Linie ist es beim zweiten Befüllversuch wichtig, dass diesmal beim Mischen keine Igelbildung zustande kommt, damit eine Messung der Faserorientierung- und Verteilung durchgeführt werden kann.

Bei der Modifikation am Querschnitt handelt es sich um die horizontale Spanngliedumlenkung in einem Kurvenquerschnitt. Diese Umlenkung soll kontinuierlich, z.B. in Hüllrohren in einer verdickten Bodenplatte, erfolgen und nicht mittels Litzen. Dadurch werden die Bauteillängen der Segmente größer und die Anzahl der Fugen verringert sich. Im Laufe des Forschungsprojekts QUICKWAY kam der Vorschlag dies durch sogenannte Umlenkkonsolen, die als „Sägezähne“ an der Bodenplatte ausgebildet werden zu realisieren und zu testen (siehe Abbildung 81). Mit dieser Variante würde man auf Hüllrohre verzichten können, was die Herstellung wesentlich vereinfacht. Dadurch würde man auch Beton und somit Gewicht einsparen können und die Spannglieder wären zugänglich.

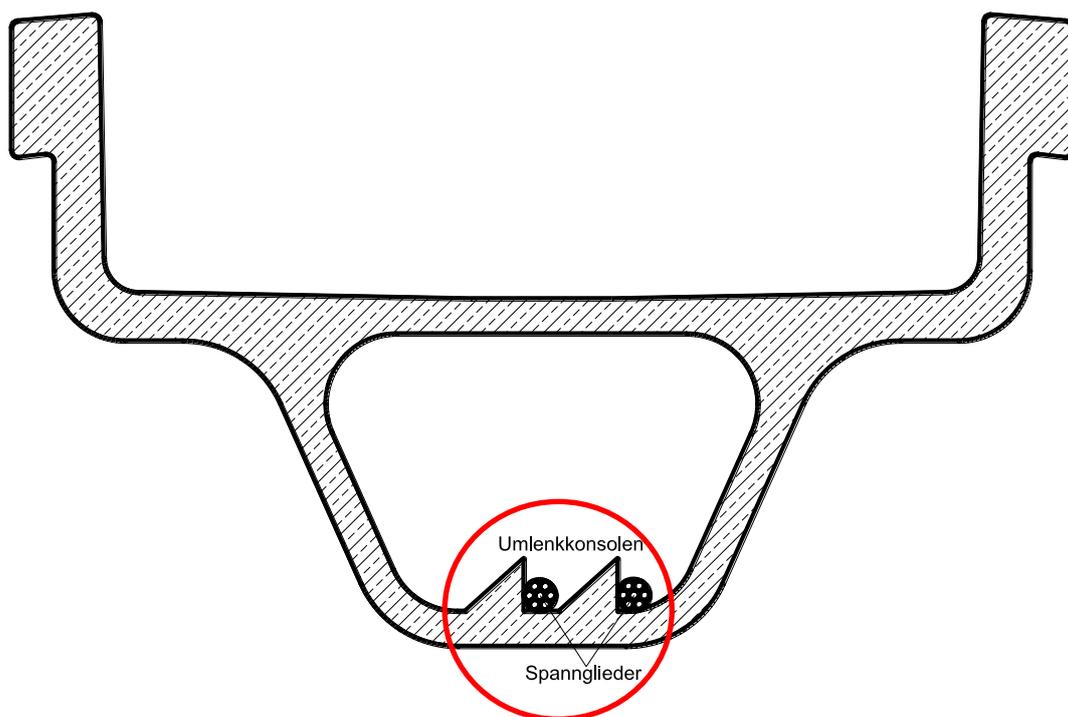


Abbildung 81: Umlenkkonsolen

Um diese Umlenkkonsolen zu fertigen, wurden an der Innenschalung die Ausnehmungen für die Verzahnung nachträglich ausgeschnitten und wieder mit Schalungsplatten beplankt (siehe Abbildung 82, roter Kreis). Die Gesamtmontage der Schalung erfolgt identisch dem zuvor beschriebenen Prinzip (siehe Kapitel 4.3.3). Da beim Trennmitteltest (siehe Anhang A.2) sich keines der getesteten Mittel als geeignet herausstellt, wird weiterhin das Trennmittel Rheofinish 323P verwendet. Die Farbindikatore werden wie schon zuvor erwähnt diesmal nicht angebracht. An der Konterschaltung wurde diesmal eine Zemdren Schalungsbahn angebracht um eine bessere Oberfläche zu bekommen, damit die Messung der Faserorientierung- und Verteilung durchgeführt werden kann..

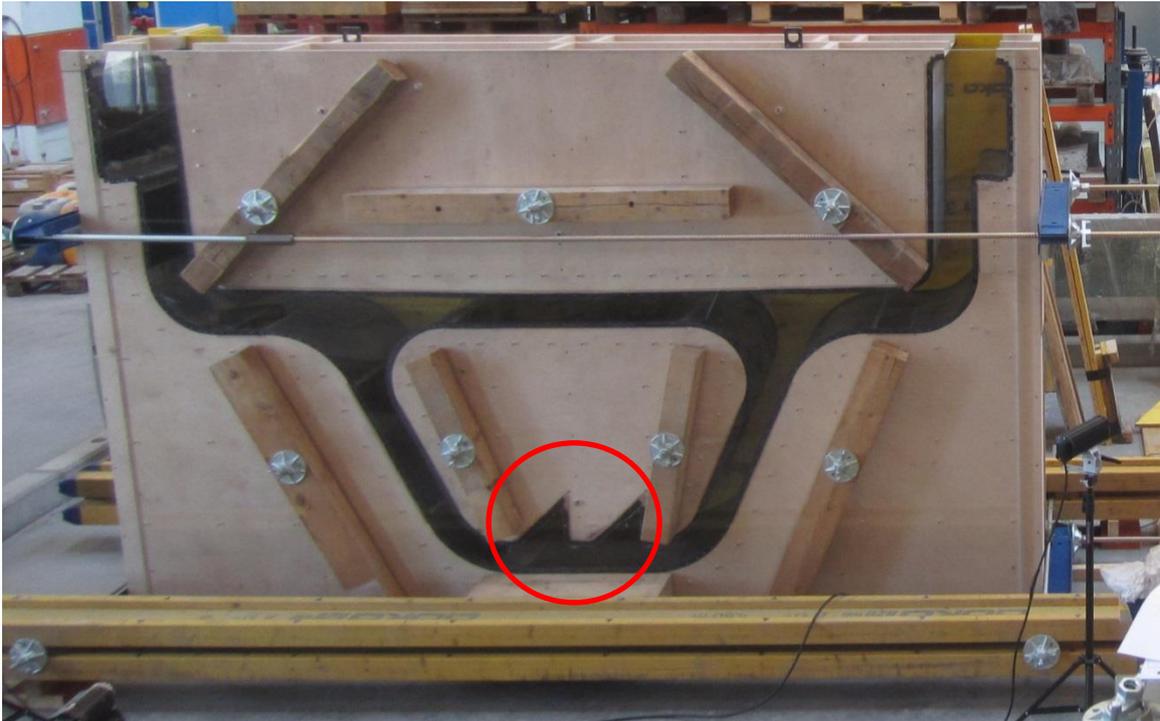


Abbildung 82: Gesamtschalung zweiter Befüllversuch

Da man sich nicht sicher sein konnte, dass die Verzahnung beim Befüllen mit Beton vollständig entlüftet wird, wurden an der Rückseite an der Stirnschalung zwei Ventile angebracht. Über diese soll später die komprimierte Luft in den Zähnen kontrolliert abgelassen werden, damit sich diese kontrolliert mit Beton gefüllt werden können (siehe Abbildung 83)



Abbildung 83: Ventile zum Luft ablassen

Vom Fließprozess erwartet man sich den selben wie schon bei ersten Befüllversuch, da sich an der Befüllmethode nichts verändert hat. Lediglich auf die Befüllung der Umlenkconsolen wird geachtet. Man erwartet sich keine vollständige Befüllung. Erst durch das Ablassen der Luft an den Ventilen nach dem vollständigen Befüllen der Schalung, sollen die Consolen bis zum gewünschten Füllstand mit Beton gefüllt sein.

4.5.1 Betonage

Die Betonage erfolgte am 17.03.2016 und ist folgend von statten gegangen:

- Start des Betonmischens um 09:11 Uhr (siehe Betonierprotokoll)
- Von 09:11 bis 10:35 Uhr wurde die Betonmischung durchgeführt und die gesamte Kubatur wurde vorerst in den Krankübel gegeben. Für spätere Druckfestigkeits- und E-Modul- Prüfungen wurden vier Würfel (10/10/10 cm) und drei Zylinder (\varnothing 10 x 20 cm) betoniert. Genauere Angaben zum Mischablauf können dem Betonierprotokoll entnommen werden.
- Der Krankübel wurde über der Schalung positioniert und der Füllprozess begann. Nach ca. vier Minuten wurde der Krankübel weggehoben um eine Scheibtruhe zu füllen, aus dieser dann der UHPC für die Betonproben sowie für die Bestimmung der Konsistenz entnommen wurde. Anschließend wurde der Krankübel über die Schalung gehoben um den Rest zu befüllen (Dauer ca. 2 Minuten)



Krankübel über Schalung



Ende der Befüllung

Abbildung 84: Zweiter Befüllversuch

Die detaillierten Angaben zur Betonzusammensetzung, Betonmenge, zum Mischprozess und zu den Frischbetonkennwerten sind dem Anhang A.3 zu entnehmen

Die Betonrezeptur und der Ablauf des Mischprozesses sind vom Baumeister Dipl.-Ing. Philipp Hadl, BSc erstellt worden

4.5.2 Analyse des Fließprozesses

Wie man an der Fotoserie erkennen kann, lief der Fließprozess wie im Kapitel 3.2 angenommen ab (siehe Abbildung 85). Das Video zum Fließprozess kann dem digitalen Anhang entnommen werden.



Start des Befüllvorgangs



Beton fließt entlang des Hohlkastens,



staut sich auf, (Umlenkconsolen werden zum Teil gefüllt)



und fließt über die Fahrbahn.



Beide Betonströme treffen sich am linken Fahrbahnrand, (Umlenkconsolen bleiben bis zur Makierung gefüllt)



fließen in einem gemeinsamen Strom. (Umlenkconsolen werden über der Markierung gefüllt)



und füllen den Rest der Schalung auf.



Schalung vollständig gefüllt. (auch die Umlenkconsolen)

Abbildung 85: Fließprozess

Da sich die Umlenkconsolen, noch vor dem Ablassen der Luft über die Ventile, vollständig gefüllt haben, lässt sich schnell und einfach erklären. Die Schalung ist auf Grund ihrer Konstruktion nicht luftdicht und die Luft in der Verzahnung konnte widerstandslos über die Stirnseiten entweichen.

Anhand des Betonierprotokolls lässt sich errechnen, dass die Schalung mit einem Betonvolumen von $0,476\text{m}^3$ in 2 Minuten und 55 Sekunden voll war.

4.5.3 Ausschalen und Oberfläche

Das Ausschalen sollte bei der höchsten Hydratationswärme während dem Aushärten erfolgen, um die Innenschalung leicht lösen zu können. Die höchste Temperatur lag an der gemessenen Stelle (Oberkante Brüstung an der Einfüllseite) bei $42,5\text{C}^\circ$ und wurde am 18 März 2016 um 11:25 erreicht. Danach nahm die Temperatur wieder ab. Dies war auch der Zeitpunkt womit mit dem Ausschalen begonnen wurde.

Das Ausschalen lief exakt gleich ab wie beim ersten Befüllversuch (siehe Kapitel 4.4.3).



Abbildung 86: Ausgeschalter Träger

4.5.3.1 Oberfläche

Die Oberflächenbeschaffenheit ist zwar nicht Gegenstand dieser Untersuchung, wird aber zu Zwecken der Archivierung hier kurz abgehandelt.

Die Oberflächen sind identisch mit denen des ersten Befüllversuches. An der Stirnseite der angebrachten Acrylglasplatte lässt sich eine sehr glatte gleichmäßige Oberfläche erkennen, wobei an der Einfüllseite des Betons sichtlich mehr Lunker festzustellen sind

(siehe Abbildung 87, Abbildung 88). Des Weiteren ist eine Stromflussänderung an der Einfüllseite erkennbar (Staubildung) (siehe, Abbildung 88).



Abbildung 87: Oberfläche Flussseite



Abbildung 88: Oberfläche Einfüllseite,
Stromflussänderung

An der Stirnseite der angebrachten Doka- Schaltafeln lässt sich hingegen eine matte gleichmäßige Oberfläche mit wenigen Lunkern erkennen. Des Weiteren sind Abstreifungen des Trennmittels erkennbar und die Stromflussänderung an der Einfüllseite (Staubildung) (siehe Abbildung 89, Abbildung 90).



Abbildung 89: Oberfläche Flussseite,
Stromflussänderung



Abbildung 90: Oberfläche Einfüllseite

Die Oberfläche der ebenen Ausführungen des Querschnitts, an dem die Dokaplex- Platten verwendet wurden, zeigten gleichmäßige glatte Oberflächen mit wenigen Lunkern (siehe Abbildung 91 - Abbildung 94). Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich die Spachtelmasse teilweise gelöst hat und am Beton haftet. Diesmal entstanden an der Einfüllseite keine großen Lunker. Daraus lässt sich schließen, dass es zu einer ausreichenden Verdichtung gekommen ist.



Abbildung 91: Oberfläche Außenseite der Leitplanke (Flussseite)



Abbildung 92: Oberfläche Außenseite der Leitplanke (Einfüllseite)



Abbildung 93: Oberfläche Innenwand der Leitplanke (Flussseite)



Abbildung 94: Oberfläche Innenwand der Leitplanke (Einfüllseite)

An der Fahrbahnoberfläche ist diesmal eine gleichmäßige Rauigkeit zu erkennen (siehe Abbildung 95). Diese resultiert aus der an der Konterschaltung aufgetragenen Zemdren Schalungsbahn.



Abbildung 95: Oberfläche der Fahrbahn

An den Stellen wo die verzinkten Bleche zu Einsatz kamen ist wieder eine sehr raue ungleichmäßige Oberfläche entstanden (siehe Abbildung 96). Auf den Blechen blieben diesmal weniger Betonreste zurück (siehe Abbildung 97), da an den Blechen diesmal eine dickere Schicht des Trennmittels aufgetragen wurde.



Abbildung 96: Betonoberfläche im Bereich der verzinkten Bleche (Beton)



Abbildung 97: Betonoberfläche im Bereich der verzinkten Bleche (Schalung)

4.5.4 Faserverteilung

Die Ermittlung der Faserverteilung erfolgt nach der im Kapitel 2.1.6 beschriebenen Methode FibreScan durch Induktivitätsmessung und Umrechnung. Die Messungen erfolgen an den Oberflächen, in der Mitte des gesamten Querschnitts und werden aufgrund der unterschiedlichen Dicken in verschiedene Bereiche aufgeteilt und zwischen Einfüllseite und Austrittsseite unterschieden (siehe Abbildung 98):

- Brüstung oberer Bereich
- Brüstung unterer Bereich
- Fahrbahn Auskragung
- Fahrbahn Zweigstelle
- Fahrbahn
- Hohlkasten Steg
- Hohlkasten Bodenplatte
- Umlenkconsolen
- Stirnseite Brüstung oberer Bereich
- Stirnseite Brüstung unterer Bereich
- Stirnseite Zweigstelle

Im Bereich der Fahrbahn wurde nicht zwischen Einfüll-, und Austrittsseite unterschieden. Es wurde für jeden Messpunkt an zwei Stellen (Außen, Innen) gemessen und daraus der Mittelwert für die Orientierung gebildet. Im Idealfall sollte sich im gesamten Querschnitt ein gleichmäßiger Fasergehalt von 2,00% ergeben.

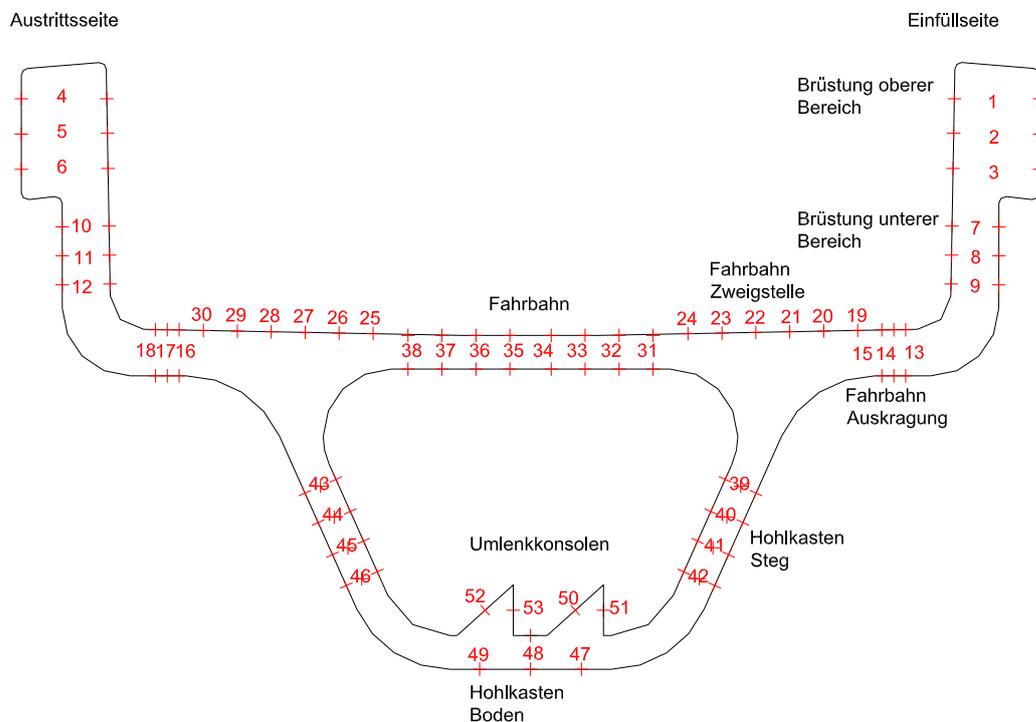


Abbildung 98: Querschnitt Messstellen

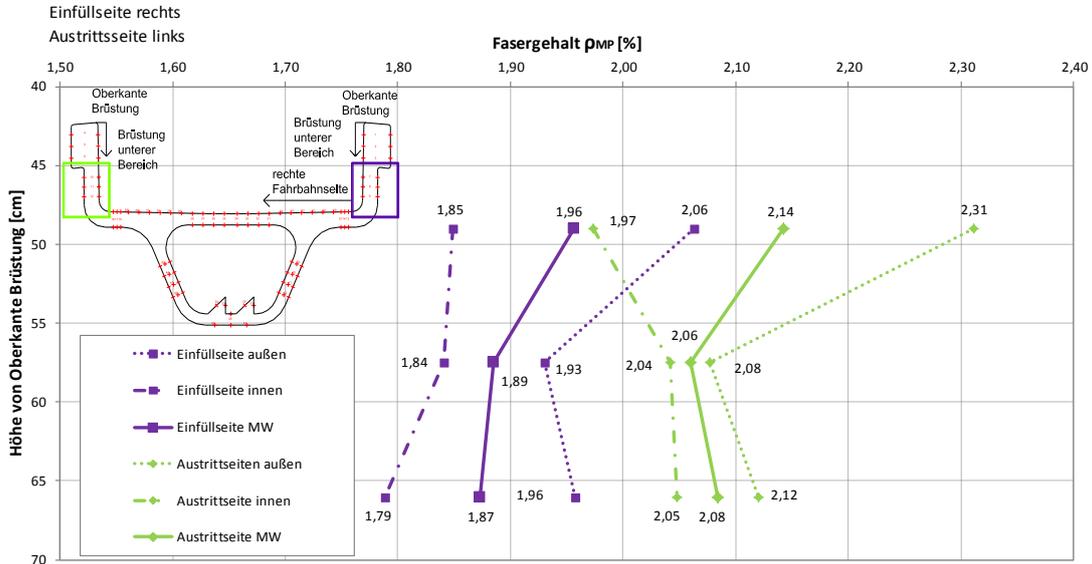
Sämtliche Tabellen und Diagramme zu den gemessenen Bereichen sind dem Anhang A.4 zu entnehmen. Hier werden nur die Ergebnisse des Hohlkastens Steg und Brüstung unterer Bereich dargestellt.

4.5.5 Brüstung unterer Bereich

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

Bereich Brüstung unterer Bereich Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %]



Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
7	49,00	Einfüllseite	13,80	3,83	3,43	3,38	3,92	3,64	2,06	1,96	1,85	3,26	3,47	3,10	3,08	3,40
8	57,50	Einfüllseite	13,90	3,78	3,30	3,07	3,47	3,41	1,93	1,89	1,84	3,25	3,56	3,19	2,92	3,32
9	66,00	Einfüllseite	14,10	3,81	3,39	3,10	3,51	3,45	1,96	1,87	1,79	3,16	3,49	3,05	2,85	3,23

Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
10	49,00	Austrittsseite	13,80	4,79	3,98	3,32	4,22	4,08	2,31	2,14	1,97	3,48	4,13	3,48	2,80	3,52
11	57,50	Austrittsseite	13,90	4,15	3,70	3,16	3,65	3,67	2,08	2,06	2,04	3,60	4,25	3,68	2,98	3,50
12	66,00	Austrittsseite	14,10	4,24	3,73	3,18	3,81	3,74	2,12	2,08	2,05	3,61	4,24	3,56	3,02	3,63

Legende:							
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung			90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung			135°	
			135° zur Fließrichtung				

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,53 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} \quad [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

Abbildung 99: Faserverteilung Brüstung unterer Bereich

Wie man am Diagramm (siehe Abbildung 99) erkennen kann, stellt sich entlang der Höhe der Brüstung eine nahezu gleichmäßige Faserverteilung ein, jeweils an der Einfüll-, sowie an der Austrittsseite. Die Schwankungen der Mittelwerte liegen mit 0,09% (Einfüllseite) und 0,08% (Austrittsseite) im annehmbaren Bereich. Jedoch lässt sich feststellen, dass der Fasergehalt an der Austrittsseite höher ist als an der Einfüllseite. Diese Erhöhung könnte daran liegen, dass sich die Fasern schon zuvor im gesammelten Beton im Betonkübel abgesetzt haben und diese dann mit der Befüllung entlang der Schalung nach vorne geschoben worden sind.

4.5.6 Hohlkasten Steg

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

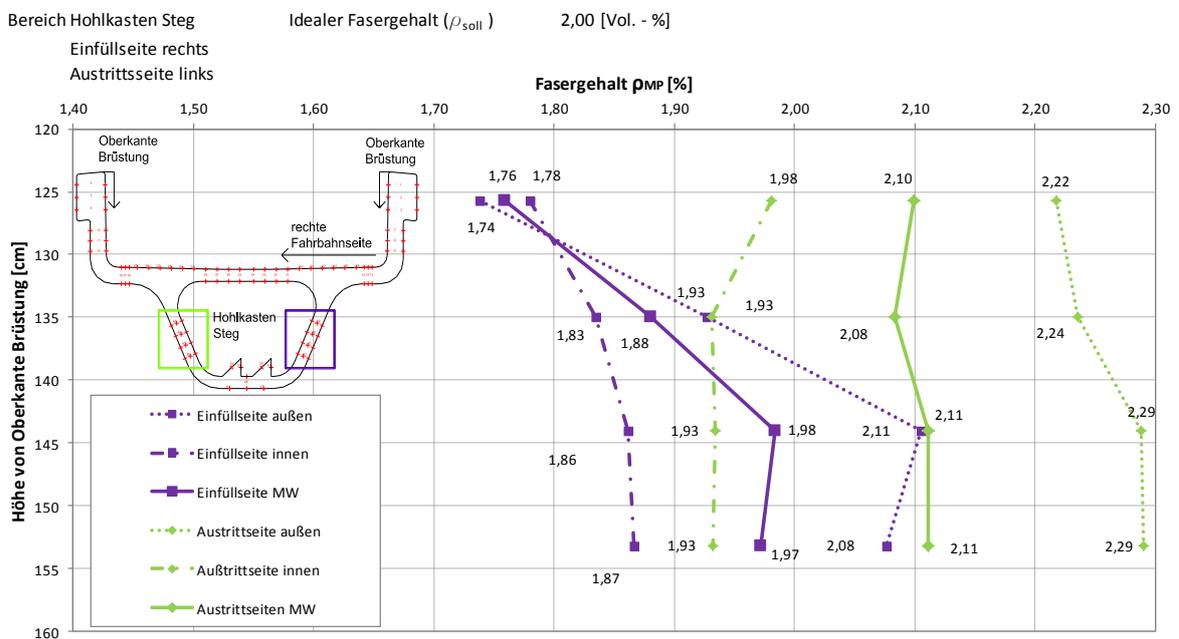


Abbildung 100: Faserverteilung Hohlkasten Steg

Beim Hohlkasten im Bereich der Stege (siehe Abbildung 100 und Abbildung 101) und auch in den anderen Bereichen trifft dieselbe Aussage zu wie im Bereich der Brüstung. Die Faserverteilung ist entlang den Bereichen gleichmäßig jedoch ist eine Steigerung dieser an der Austrittsseite zu erkennen. Auch ein leichtes Absetzen dieser ist entlang der Gesamthöhe erkennbar aber die Werte schwanken zwischen 1,87% (Brüstung) und 2,04 % (Bodenplatte) und liegen somit in einem annehmbaren Bereich.

Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
39	125,70	Einfüllseite	10	3,67	3,13	2,57	3,07	3,11	1,74	1,76	1,78	3,19	3,77	3,20	2,60	3,17
40	135,00			3,96	3,43	3,04	3,36	3,45	1,93	1,88	1,83	3,28	3,96	3,20	2,63	3,34
41	144,00			4,24	3,85	3,25	3,73	3,77	2,11	1,98	1,86	3,33	3,95	3,35	2,71	3,31
42	153,20			4,32	3,76	3,18	3,60	3,72	2,08	1,97	1,87	3,34	4,00	3,34	2,77	3,25

Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
43	125,70	Ausrittsseite	10	4,57	4,00	3,38	3,92	3,97	2,22	2,10	1,98	3,55	3,92	3,37	3,69	3,20
44	135,00			4,59	4,01	3,37	4,03	4,00	2,24	2,08	1,93	3,46	4,01	3,35	2,86	3,60
45	144,00			4,73	4,03	3,47	4,15	4,10	2,29	2,11	1,93	3,46	4,07	3,37	2,87	3,53
46	153,20			4,66	4,16	3,47	4,10	4,10	2,29	2,11	1,93	3,46	4,10	3,54	2,87	3,32

Legende:						
MW	Mittelwert		0°	entlang der Fließrichtung	90°	waagrecht zur Fließrichtung
			45°	45° zur Fließrichtung	135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,58 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

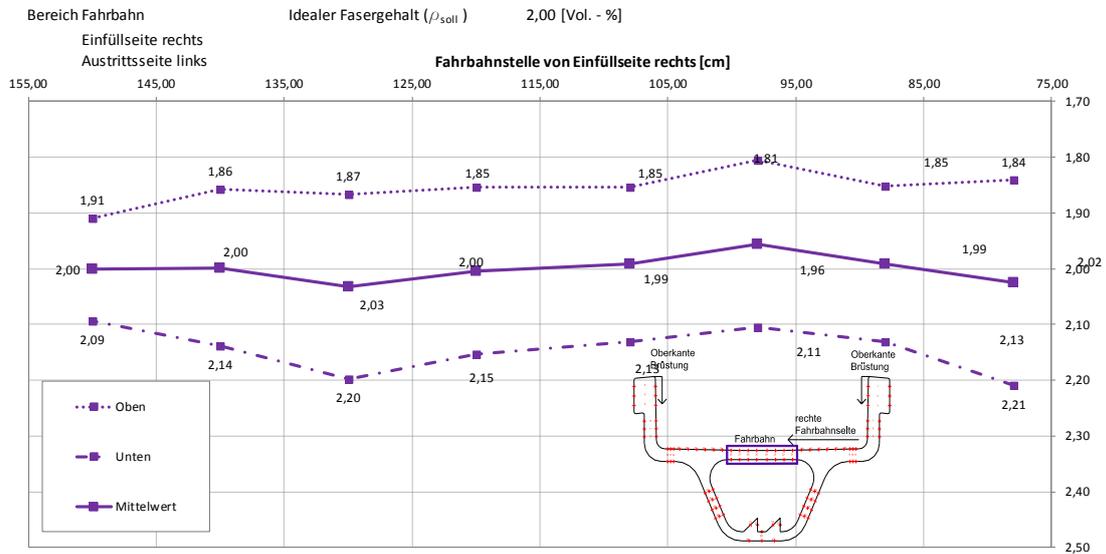
Abbildung 101: Faserverteilung Hohlkasten Steg (Wertetabelle)

4.5.7 Fahrbahn

Wie man an der Abbildung 102 erkennen kann, stellt sich hier eine gleichmäßige Faserverteilung ein. Es ist zu erwähnen, dass hier nur der Bereich mit einer gleichmäßigen Dicke von 10 cm betrachtet wurde. Die Fahrbahn oberhalb der Zweigstellen und die Auskragungen weisen eine höher Dicke auf, und können die Verteilung beeinflussen. Die Auswertungen zu diesen Stellen können dem Anhang A.4 entnommen werden.

**Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method**

Datum: 23.03.2016



Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} oben					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} unten				
					0°	45°	90°	135°	MW oben	oben	MW	unten	MW unten	0°	45°	90°	135°
					[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
31	78,00				3,69	3,05	2,59	3,22	3,14	1,84	2,02	2,21	3,77	4,33	3,67	3,39	3,68
32	88,00				3,60	3,06	2,75	3,22	3,16	1,85	1,99	2,13	3,63	4,31	3,54	3,00	3,68
33	98,00				3,53	3,08	2,63	3,08	3,08	1,81	1,96	2,11	3,59	4,11	3,50	2,99	3,76
34	108,00	86,00		10	3,68	3,03	2,68	3,25	3,16	1,85	1,99	2,13	3,63	4,17	3,35	3,06	3,95
35	120,00				3,60	3,18	2,79	3,08	3,16	1,85	2,00	2,15	3,67	4,22	3,58	3,07	3,82
36	130,00				3,71	3,10	2,69	3,23	3,18	1,87	2,03	2,20	3,75	4,43	3,65	3,11	3,80
37	140,00				3,67	3,12	2,69	3,19	3,17	1,86	2,00	2,14	3,65	4,27	3,65	3,03	3,64
38	150,00				3,77	3,21	2,75	3,29	3,26	1,91	2,00	2,09	3,57	4,13	3,56	3,01	3,58

Legende:					
MW	Mittelwert	0°	45°	90°	135°
		entlang der Fließrichtung	45° zur Fließrichtung	90°	135°
				waagrecht zur Fließrichtung	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,41 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} \quad [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

Abbildung 102: Faserverteilung Fahrbahn

4.5.8 Faserorientierung

Die Ermittlung der Faserorientierung erfolgt nach der im Kapitel 2.1.6 beschriebenen Methode FibreScan durch Induktivitätsmessung. Die Messungen erfolgen am gesamten Querschnitt und werden, da die Orientierung nur gering von den Bauteildicken abhängig ist, in zwei Betonflussbereiche unterteilt (siehe Abbildung 103):

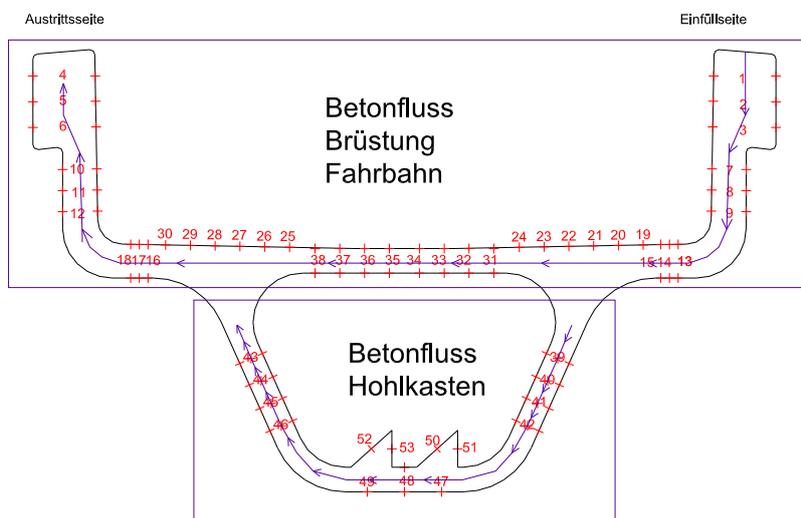


Abbildung 103: Querschnitt Messstellen Betonflüsse

Es wurde für jeden Messpunkt an zwei Stellen (Außen, Innen) gemessen und daraus der Mittelwert für die Orientierung gebildet. Sämtliche Tabellen und Diagramme zu den gemessenen Bereichen sind dem Anhang A.5 zu entnehmen. Die Faserorientierungen wurden nach Abbildung 104 gemessen.



Abbildung 104: gemessene Faserorientierungen am Querschnitt

Dabei sind die Winkel die auch später für die Orientierung wichtig sind folgend definiert:

- 0° Die Fasern sind entlang der Fließrichtung ausgerichtet
- 45° Die Fasern sind 45° zur Fließrichtung ausgerichtet
- 90° Die Fasern sind waagrecht zur Fließrichtung ausgerichtet
- 135° Die Fasern sind 135° zur Fließrichtung ausgerichtet

4.5.9 Betonfluss Brüstung Fahrbahn

Ermittlung der Faserorientierung durch FibreScan - Method (Induktivitätsmessung)

Datum: 23.03.2016

Bereich: Brüstung oberer Betonfluss (Brüstung - Fahrbahn)
Einfüllseite rechts
Austrittsseite links

Faserorientierungsbeiwert η_{iso} 0,6

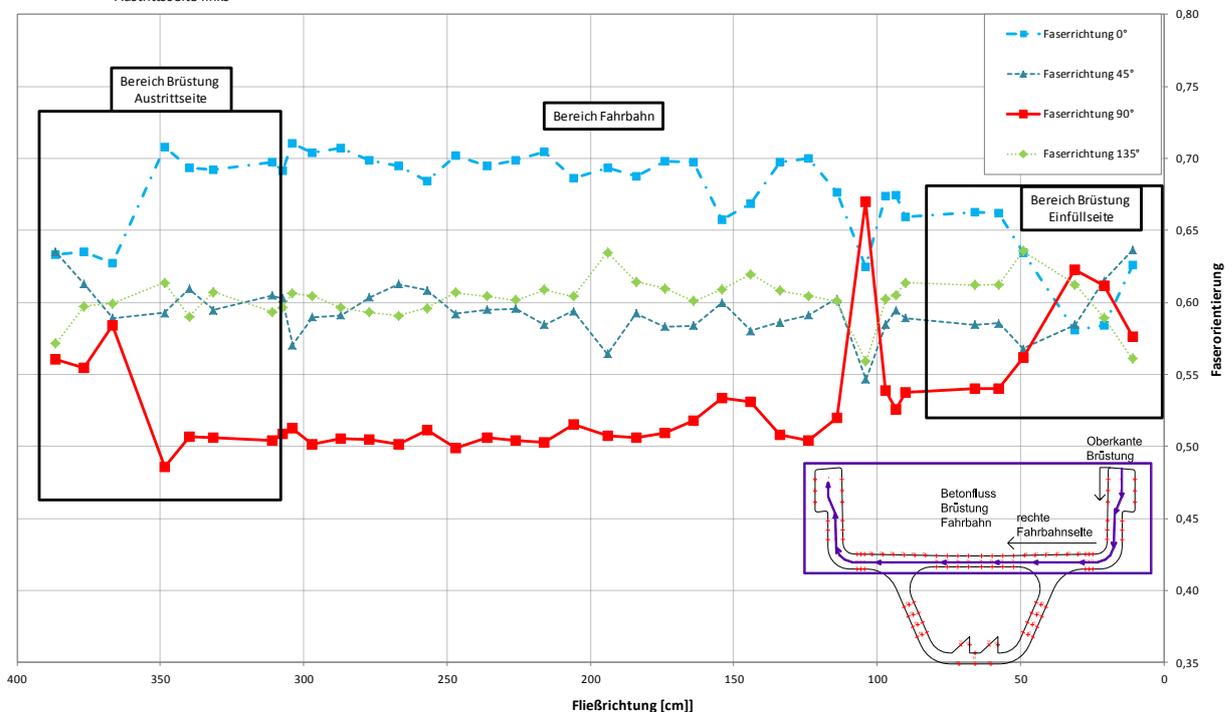


Abbildung 105: Faserorientierung (Brüstung Fahrbahn)

Wie man an der Abbildung 105 erkennen kann, sind ein Großteil der Fasern an den Messpunkten in Fließrichtung (0°) ausgerichtet, Waagrecht zur Fließrichtung (90°) am wenigsten. Lediglich ergaben sich teilweise Ausreiser an den Zweigstellen zu dem Steg des Hohlkastens. Diese beeinflussten den Betonstrom somit die Orientierung. Auch das Aufstauen wirkte sich auf die Orientierung aus. Wie man unschwer erkennen kann Orientieren sich die Fasern an der Einfüllseite gleichmäßig in alle Richtungen. Das liegt daran, dass hier noch kein kontinuierlicher Betonfluss gegeben ist. Dieser Stellt sich erst später ein (am Ender der Brüstung, 100cm Fließrichtung). Auch das zum Schluss nochmal Beton nachgegossen wird zur Ausnivellierung beeinflusst die Orientierung. Am Ende des Betonflusses geschieht annähernd dasselbe. Hier wird der Betonfluss langsamer. Die Tadelnswerte sind aus dem Anhang A.5 zu entnehmen

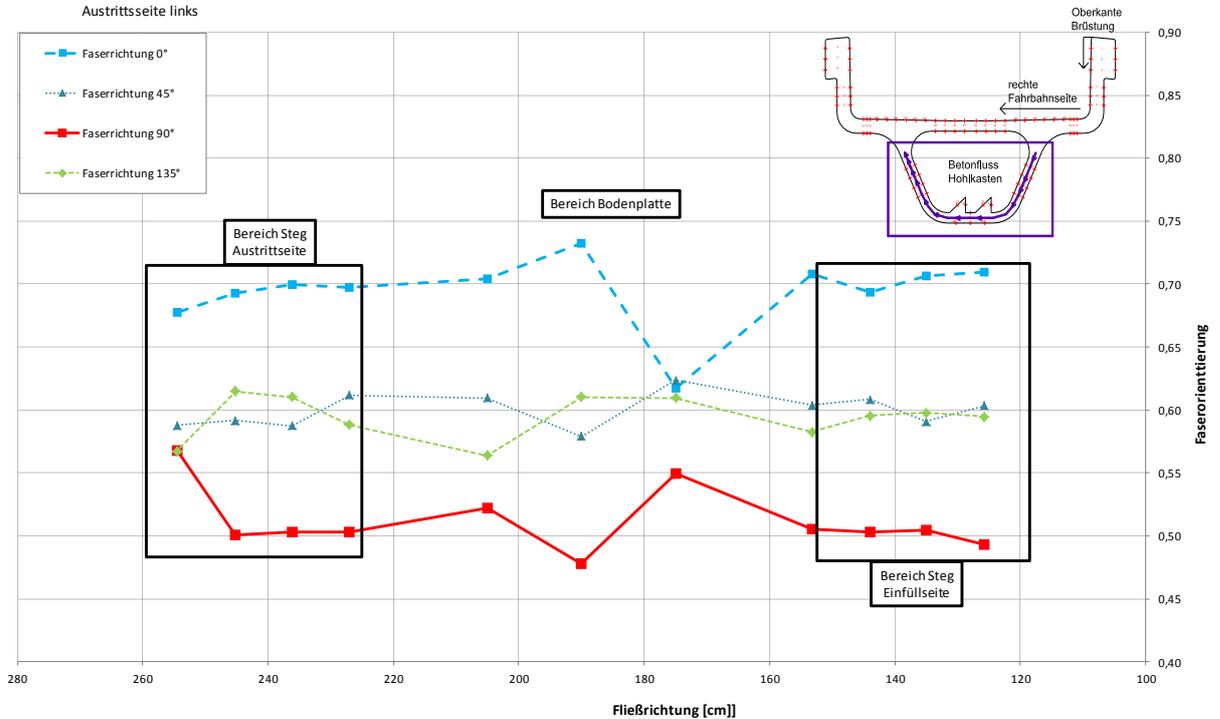
4.5.10 Betonfluss Hohlkasten

Ermittlung der Faserorientierung durch FibreScan - Method (Induktivitätsmessung)

Datum: 23.03.2016

Bereich: Hohlkasten Betonfluss
Einfüllseite rechts
Austrittsseite links

Faserorientierungsbeiwert η_{iso} 0,6



	Messpunkt [MP]	Fahrbahn-stelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Flusssträcke (Umfang Brüstung Fahrbahn) [cm]	η außen				ΔL_{MP}	Mittelwerte η				ΔL_{MP}	η innen			
					0°	45°	90°	135°	MW außen [mH]	MW 0°	MW 45°	MW 90°	MW 135°	MW innen [mH]	0°	45°	90°	135°
Hohlkasten Steg Einfüllseite	39	52,10	125,70	125,70	0,71	0,60	0,50	0,59	3,11	0,71	0,60	0,49	0,59	3,19	0,71	0,60	0,49	0,60
	40	54,7	135,00	135,00	0,69	0,60	0,53	0,58	3,45	0,71	0,59	0,50	0,60	3,28	0,72	0,58	0,48	0,61
	41	60,30	144,00	144,00	0,68	0,61	0,52	0,59	3,77	0,69	0,61	0,50	0,60	3,33	0,71	0,60	0,49	0,60
	42	64,30	153,20	153,20	0,70	0,61	0,51	0,58	3,72	0,71	0,60	0,51	0,58	3,34	0,72	0,60	0,50	0,58
Bodenplatte	47	99,00		175,00	0,62	0,62	0,55	0,61	3,91	0,62	0,62	0,55	0,61					
	48	114,00	180,00	190,00	0,70	0,56	0,50	0,64	3,96	0,73	0,58	0,48	0,61	4,29	0,77	0,60	0,46	0,58
	49	129,00		205,00	0,70	0,61	0,52	0,56	4,06	0,70	0,61	0,52	0,56					
Hohlkasten Steg Austrittsseite	46	163,70	153,20	227,00	0,68	0,61	0,51	0,60	4,10	0,70	0,61	0,50	0,59	3,46	0,71	0,61	0,50	0,58
	45	167,80	144,00	236,20	0,69	0,59	0,51	0,61	4,10	0,70	0,59	0,50	0,61	3,46	0,71	0,58	0,50	0,61
	44	171,90	135,00	245,20	0,69	0,60	0,51	0,60	4,00	0,69	0,59	0,50	0,61	3,46	0,70	0,58	0,50	0,63
	43	175,90	125,70	254,50	0,69	0,60	0,51	0,59	3,97	0,68	0,59	0,57	0,57	3,55	0,66	0,57	0,62	0,54

Legende:							
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung		90°	waagrecht zur Fließrichtung	
		45°	45° zur Fließrichtung			135°	135° zur Fließrichtung

$$n_x = \frac{\Delta L_x - \Delta L_{MW,MP}}{\Delta L_{MW,MP}} \times n_{iso} + n_{iso} \quad \text{Gl (5)}$$

Abbildung 106: Faserorientierung Hohlkasten

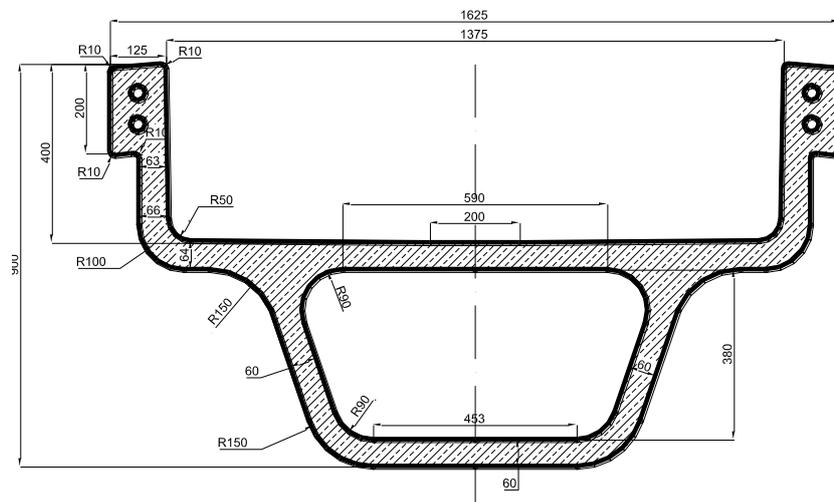
Wie man an der Abbildung 106 erkennen kann, sind hier ebenfalls die meisten Fasern an den Messpunkten in Fließrichtung (0°) ausgerichtet, waagrecht zur Fließrichtung (90°) am wenigsten. Es ergaben sich einige Ausreiser an den Umlenkkonsolen. Diese beeinflussten den Betonfluss und somit die Orientierung. Es lässt sich auch kein Unterschied zwischen Einfüllseite und Austrittseite erkennen. Die Fasern haben über den gesamten Hohlkasten dieselbe Orientierung angenommen.

4.5.11 Fazit

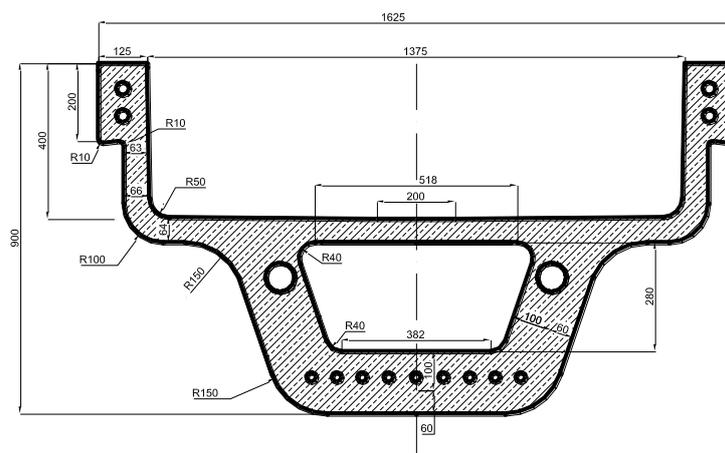
Die Befüllung lief nicht wie erwartet im Bereich der Umlenkkonsolen ab, da die Schalung nicht vollständig luftdicht ist. Ansonsten lief der Fließprozess wie bei der ersten Befüllung ab. Da es beim Mischen diesmal zu keiner Igelbildung kam, konnte die Faserorientierung- und Verteilung ermittelt werden. Die Fasern sind gleichmäßig entlang des Querschnitts verteilt und es lässt sich kein übermäßiges Absetzen erkennen. Die Ermittlung der Orientierung ergab, wie erwartet, dass die meisten Fasern sich in Fließrichtung orientiert haben. Somit liegen sie wie gewünscht im Querschnitt.

5 Entwicklung eines Schalungssystems für den Großversuch

Ziel ist es, einen Versuchsträger im Maßstab 1:2 zu fertigen, der später in einem Großversuch getestet wird. Für die Herstellung sollen die Prinzipien aus Kapitel 3.1.1 (Schritt 1 -3) angewendet und getestet werden. Bei diesem Großversuch soll eine Fuge eines Kurvenquerschnittes anhand einer Torsionsbelastung simuliert werden. Näherer Angaben zum Großversuch werden nicht gemacht, da diese Diplomarbeit sich lediglich mit der Fertigung dieses Fahrbahnträgers befasst und der Großversuch nicht Teil dieser Arbeit ist. Der Versuchsträger weist eine Fahrbahn- und Stegdicke von nur 6cm (Maßstab 1:2) auf, besteht aus zwei, über Monolitzen vorgespannten Fahrbahnträgern und einem Zwischenstück, die in Summe einen 6m langen Träger ergeben. An den Enden besitzt der Querschnitt 30cm lange Endrippen, die zum Vorspannen dienen. Durch die Endrippe werden die Bodenplatte und die Stege jeweils um 10cm stärker ausgebildet (siehe Abbildung 107).



Querschnitt M 1:2



Querschnitt mit Endrippe M 1:2

Abbildung 107: Fahrbahnträgerquerschnitte M 1:2

5.1 Herstellungskonzept

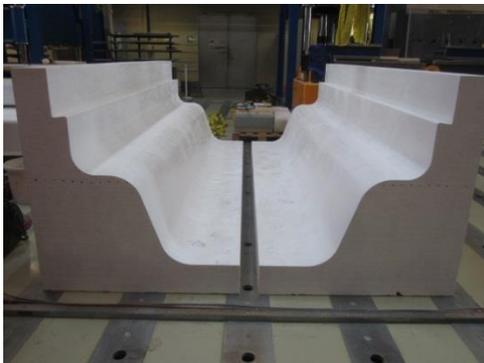
Die Fahrbahnträger sollen unterschiedlich gefertigt werden. Für die Herstellung werden die Prinzipien aus Kapitel 3.1.1 (Schritt 1 bis 3) angewendet. Für den ersten, 3m langen Fahrbahnträger soll eine Schalung aus Vollholz entwickelt werden. Dabei werden die einzelnen Schalungsteile (Außen-, Konter- und Innenschalung) zunächst aus Brettschichtholz –Trägern zu einem Block verleimt. Dieser wird anschließend mittels eines CNC gesteuerten Roboters bearbeitet, welcher die Einzelteile der die Kontur des Querschnitts schlussendlich entsprechend ausfräst (siehe Abbildung 108 und Abbildung 109).



Schalung Rohteil aus BSH



Bearbeitung Fräsen



Fertiges Schalungsteil geschliffen



Fertige Gesamtschalung

Abbildung 108: Schalungsfertigung



Erste Trägerhälfte



Umgedrehter nachbearbeiteter Träger

Abbildung 109: Erste Trägerhälfte

Der zweite Träger (etwas kürzer) wird im Grunde nach dem gleichen Prinzip gefertigt, wie der erste. Der Unterschied zum ersten Träger liegt darin, dass hier die Außenschalung aus Beton besteht.

Für die Herstellung der Außenschalung aus Beton dient der erste gefertigte Fahrbahnträger aus der Vollholzschalung als Schalung. Dazu wird dieser auf den Kopf gestellt, anschließend wird die Oberfläche verspachtelt, geschliffen und beschichtet, von allen Seiten mit einer Wandschalung umschlossen, eine konstruktive Bewehrung eingelegt. Die Form wird mit Beton ausgegossen.

5.2 Schalungsbau des ersten Fahrbahnträgers

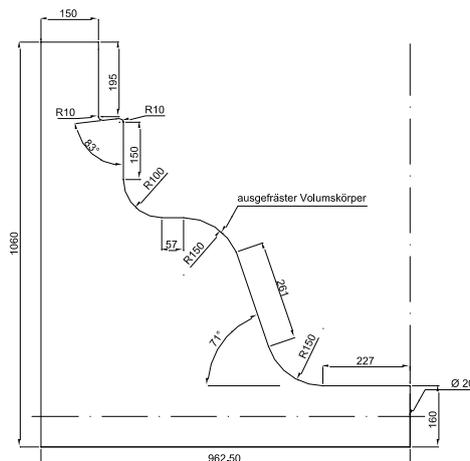
Die Schalung für den ersten Fahrbahnträger setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

- Außenschalung
- Konterschalung
- Innenschalungssystem

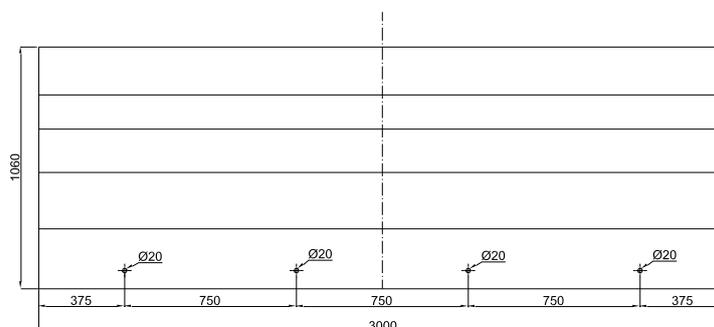
Diese Teile werden nach dem zuvor beschriebenen Herstellungskonzept nach Kapitel 5.1 gefertigt. Hier sollen nun auf gewisse Details der Konstruktion und der Planung erläutert werden. Die in diesem Unterkapitel dargestellten Details dienen lediglich als Information zum besseren Verständnis. Diese sind nur Ausschnitte aus den Konstruktionsplänen und sind nicht maßstabstreu. Die genauen, maßstäblichen Abmessungen sind dem Anhang A.7, oder dem digitalen Anhang zu entnehmen

5.2.1 Außenschalung

Die Außenschalung entspricht der äußeren Kontur des Fahrbahnträgers und besteht aus zwei 3m langen Teilen. Für den Zusammenbau ist eine Verschraubung über vier M16 Gewindestangen durch die angebrachten Bohrungen vorgesehen (siehe Abbildung 110).



Querschnitt M 1:2

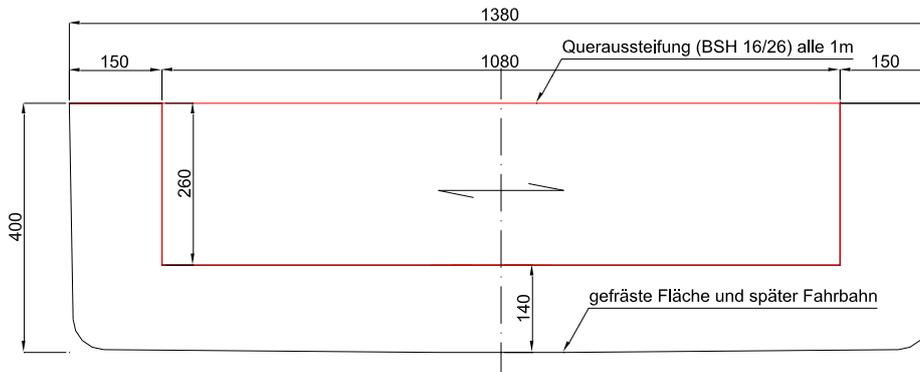


Querschnitt mit Endrippe M 1:2

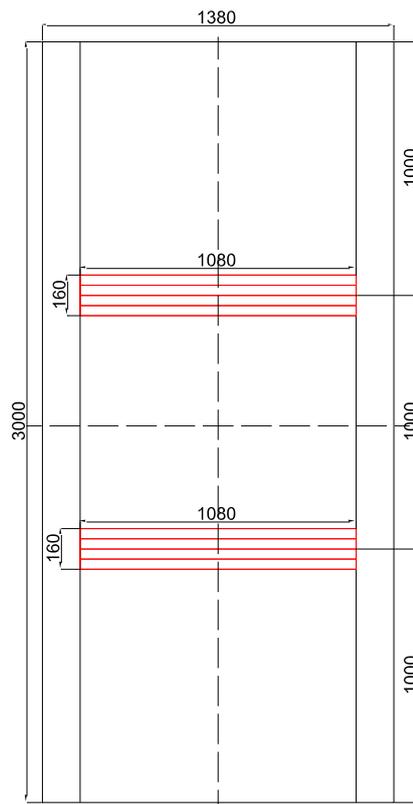
Abbildung 110: Außenschalung Einzelteil

5.2.2 Konterschaltung

Die Konterschaltung entspricht der Kontur der späteren Fahrbahn und ist 3m lang. Sie wurde zwischen den Stegen an den Drittelpunkten mit Queraussteifungen versehen, damit es bei der späteren Betonage zu keinen allzu hohen Durchbiegungen der Schalung kommt (siehe Abbildung 111)



Konterschaltung Aufriss



Konterschaltung Grundriss

Abbildung 111: Konterschaltung

5.2.3 Innenschalungssystem

Der Hohlkasten des Fahrbahnträgers besitzt nicht durchgehend die gleichen Abmessungen. An den letzten 30cm befindet sich die, an der Bodenplatte und den Stegen, um 10cm dickere Endrippe. Aus diesem Grund kann die geplante Innenschalung nicht durchgehend zweiteilig ausgeführt werden. Zur Herstellung des Hohlkastens wird ein Innenschalungssystem konzipiert, welches aus folgenden Komponenten besteht, die im Nachfolgenden näher erläutert werden.

- Zweiteilige Innenschalung
- Schlauch
- Stoppel
- Stirnschalung
- Abdeckplatte
- Sonstige Bauteile

5.2.3.1 Zweiteilige Innenschalung

Wie der Name schon suggeriert, besteht die Innenschalung aus zwei BSH-Teilen. Diese sollen bei der Betonage auseinandergefahren werden und dabei die Kontur des Hohlkastens annehmen. Die Teilung erfolgt an der breitesten Stelle des Hohlkastens. Beim Ausfahren der zwei Teile bleibt an diese Stelle eine Öffnung übrig. Diese soll mittels zwei aufblasbaren Schläuchen wieder dicht verschlossen werden. Beim Ausschalen werden die Luft aus den Schläuchen abgelassen und die zwei Teile wieder zusammengefahren. Dabei bleibt ein Spalt um den Hohlkasten von min. 4mm übrig, der ausreichen soll, um die Schalung aus dem Hohlkasten zu bekommen (siehe Abbildung 112).

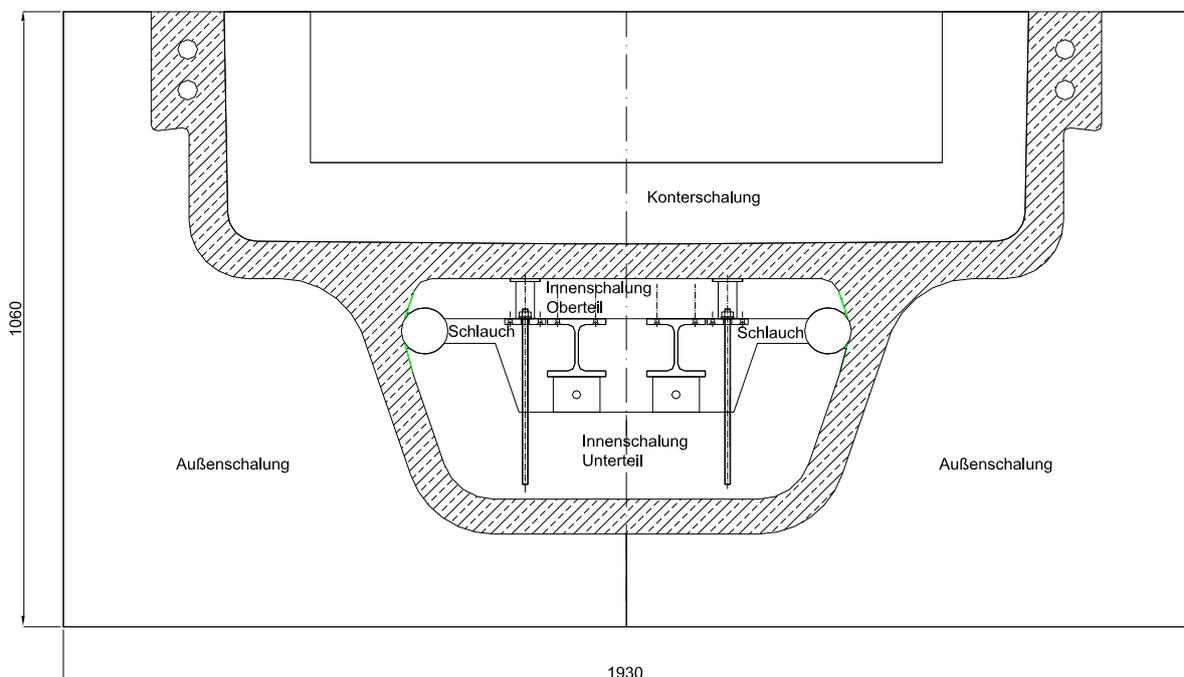


Abbildung 112: Darstellung zweiteilige Innenschalung ausgefahren

Für die Schlauchausführung stehen zwei Varianten zur Auswahl, die in einem Versuch (siehe Kapitel 5.2.4), gebaut und auf ihre Durchführbarkeit getestet werden. Die dargestellten Varianten wurden im Maßstab 1:2 mit einem angenommen Schlauchdurchmesser (\varnothing_a) von 75mm konstruiert, auch da im späteren Versuch (M1:1) ein Schlauch mit 150mm Durchmesser verwendet wird. Im späteren Verlauf der Arbeit jedoch, wurde aus technischen Gründen der Durchmesser auf 80mm erhöht.

Bei der Variante 1 wird der Schlauch zwischen die zwei Schalungsteile gezwängt und aufgeblasen. Dadurch presst sich der Schlauch an die Ober- und Unterkante zwischen den Schalungsteilen und wölbt sich seitlich aus. Durch innenliegende Anschlagleisten Sicherungen behält der Schlauch seine Position und wölbt sich hauptsächlich nach außen. Dabei wird eine, durch Holzbauteile, zwischen Ober- und Unterteil befestigte Membrane gespannt. Diese passt sich mit dem Ober- und Unterteil der Schalung annähernd der abgerundeten Kontur des Hohlkastens an. Dabei soll die Spannung der Membran groß genug sein, damit an den freien Stellen (in der Abbildung 113 als rote Kreise dargestellt) zwischen Schlauch, Schalung und Membrane kein Beton eindringen kann, ansonsten lässt sich die Schalung nicht mehr zusammenfahren. In der Abbildung 113 ist die Variante im ein- als auch ausgefahren Zustand dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich nach dem Einfahren zwischen Betonkante und Schalung ein Spalt von min. 4mm ergibt. Diese sind jedoch nur theoretisch, da keine Aussage dazu getroffen werden, wie sich der Schlauch beim Zusammenfahren der Innenschalung verhält (siehe der Abbildung 113).

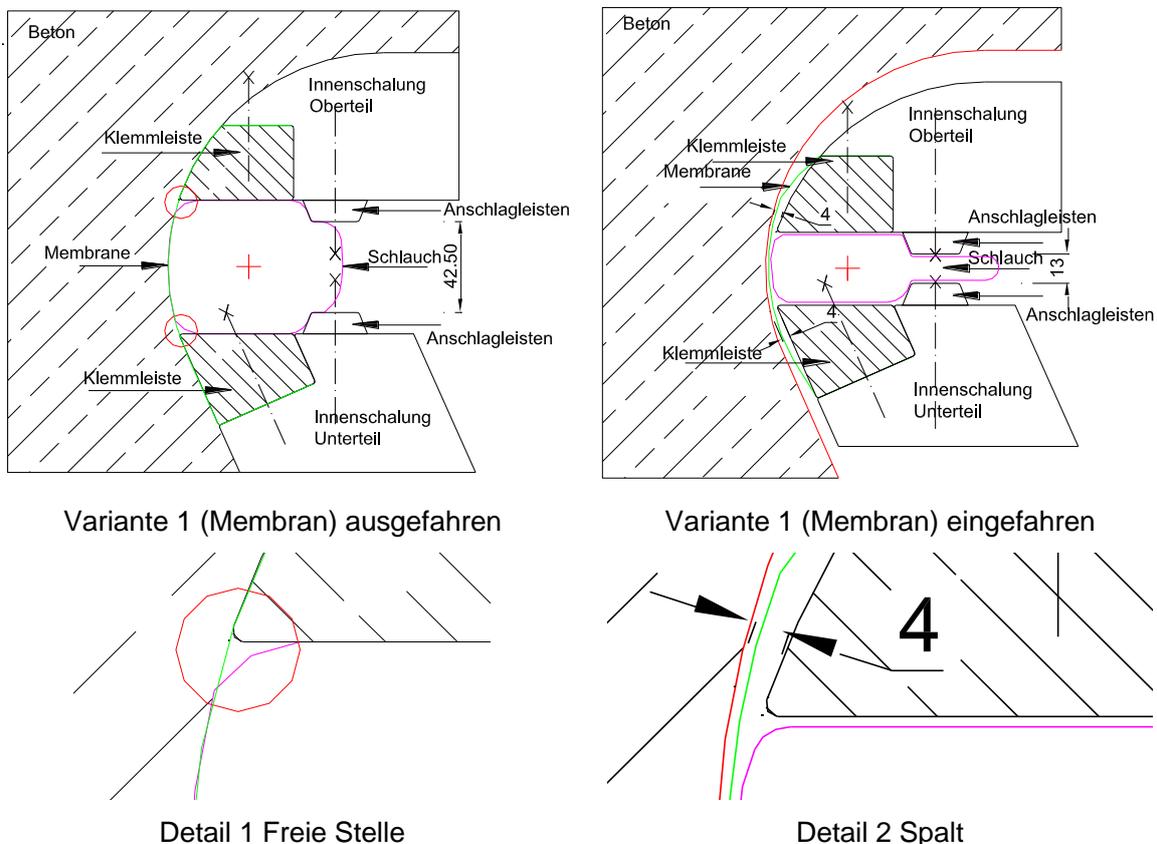
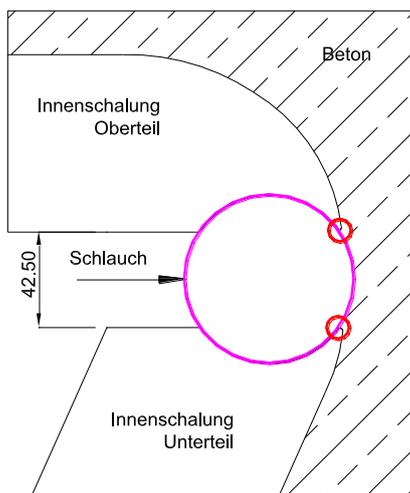
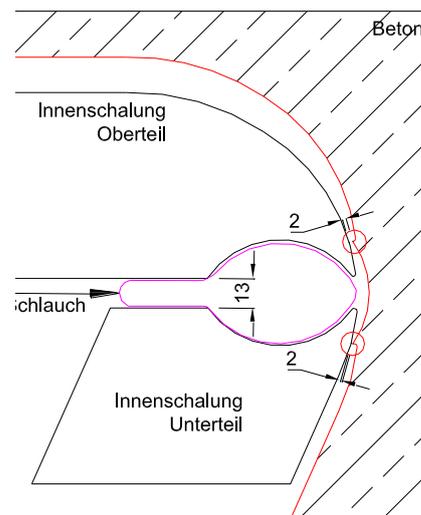


Abbildung 113: Variante 1 (Membrane)

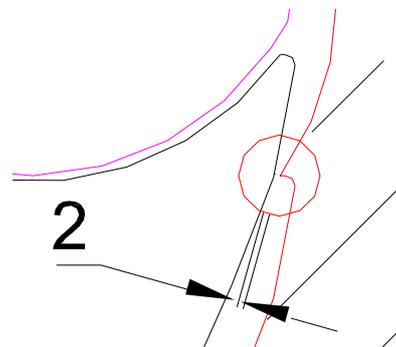
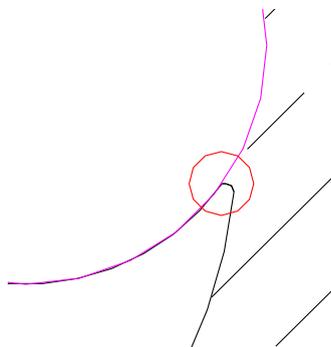
Bei der Variante 2 wird der Schlauch alleine eingesetzt. An dem Ober- und Unterteil der Schalung werden an den Kanten Abrundungen gefräst, damit der Schlauch nicht gezwängt wird und sich nicht auswölben kann. Hier übernimmt die Abdichtung der feien Stelle und die Aufnahme des Betondrucks der Schlauch alleine. Im aufgeblasenen Zustand nimmt der Schlauch gemeinsam mit der Schalung die zum Teil die Kontur des Hohlkastens ein (siehe Abbildung 114).



Variante 2 (Schlauch allein) ausgefahren



Variante 2 (Schlauch allein) eingefahren



Betonstufe

Abbildung 114: Variante 2 (Schlauch allein)

Im eingefahrenen Zustand sieht man, dass beim Betonieren die Gefahr besteht, dass sich zwischen dem Schlauch und der Schalungskante eine Betonstufe bilden könnte (in der Abbildung 114 als roter Kreis dargestellt). Dies könnte bei einer Länge von 3m dazu führen, dass sich die Schalungsteile nicht mehr einfahren lassen. Falls doch, würde sich auch nur ein Spalt von 1mm ergeben. Zur Vermeidung eines solchen Stufe wird ein Blech als Abdeckung an den Ober- und Unterteil befestigt. Dadurch wird auch der Spalt größer (siehe Abbildung 128). kante

Welche der beiden Varianten für das Innenschalungssystem eingesetzt wird, wird anhand eines Versuches ermittelt. Dieser soll die Durchführbarkeit und Problemstellungen der beiden genannten Varianten aufzeigen (siehe Kapitel 5.2.4).

5.2.3.2 Stoppel

Da der Versuchsträger an einem Ende eine Endrippe aufweist (siehe Abbildung 107), kann die zweiteilige Innenschalung nicht durch den gesamten Hohlkasten geführt werden. Für die Innenschalung der Endrippe wird ein Stoppel aus BSH vorgesehen. Dieser wird konisch gefräst und besitzt einen Hohlraum für die später durchgeführten HEB – Träger. Für die exakte Positionierung sind an den Stirnseiten Bohrungen angebracht, welche dann mit der Abdeckplatte und Stirnschalung mittels Stiften ($\varnothing 12 \times 70\text{mm}$) zentriert werden. Um den Betondruck bei der Betonage stand zu halten, wird er Stoppel mittels 450mm langen Spax Schrauben an die Innenschalung im ausgefahren Zustand befestigt (siehe Abbildung 115).

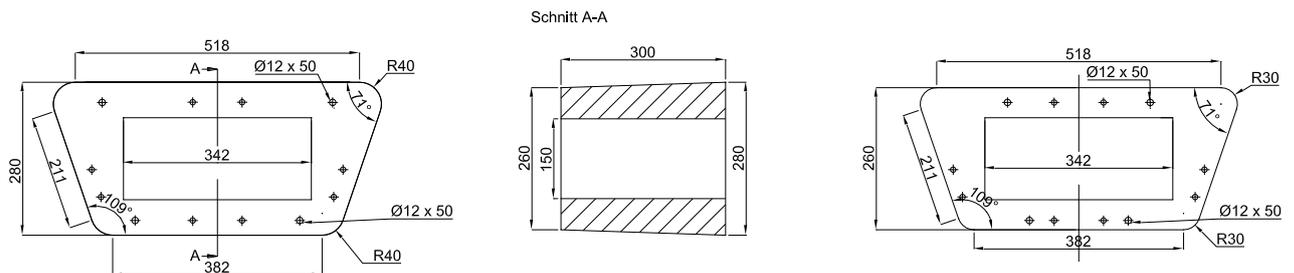


Abbildung 115: Stoppel mit Bohrungen und Hohlraum

5.2.3.3 Abdeckplatte

Würde der Stoppel an die zweiteilige Innenschalung stirnseitig anliegen, so würden sich an den Schläuchen Öffnungen ergeben, da der Stoppel nicht den gesamten Hohlraum der Innenschalung abdeckt und Beton würde hier eindringen. Zu diesem Zweck wird eine Abdeckplatte angeschraubt. Diese wird aus einer Sperrholzplatte gefertigt und konisch gefräst. An den Seiten werden Ausnehmungen für die Schläuche und Falze für die später stirnseitig zur Endrippe anstoßenden Hüllrohre vorgesehen (siehe Abbildung 116 und Abbildung 117).

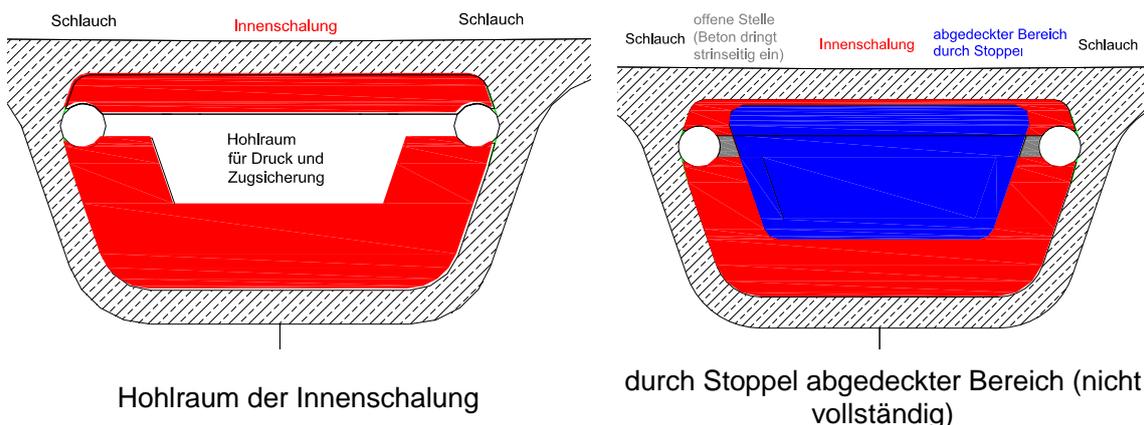
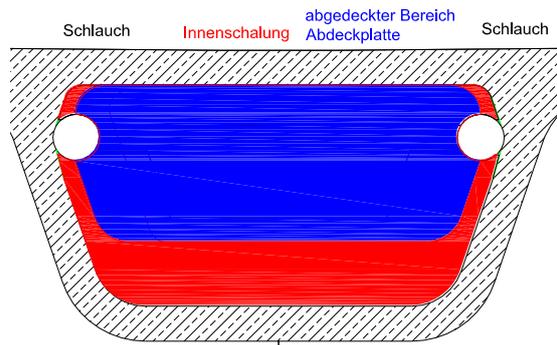
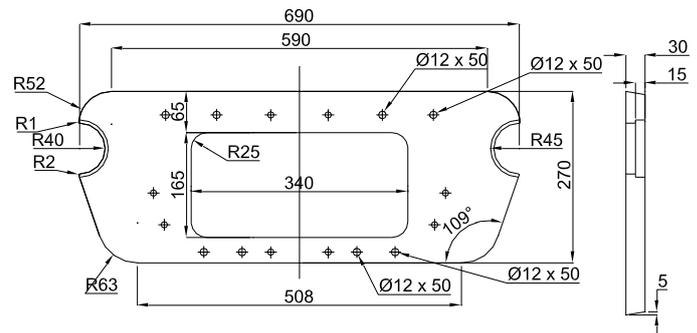


Abbildung 116: Innenschalung Abdeckung ohne Abdeckplatte



Vollständige Abdeckung durch Abdeckplatte



Abdeckplatte

Abbildung 117: Innenschalung Abdeckung mit Abdeckplatte

5.2.3.4 Schlauch

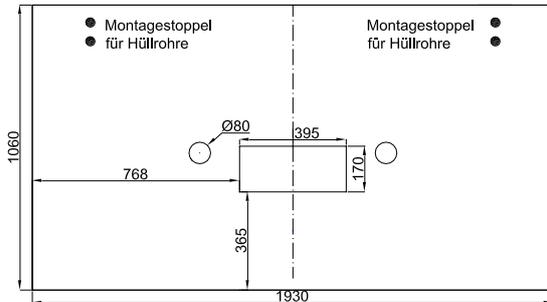
Im Vergleich zur zweiteiligen Innenschalung, verlaufen die Schläuche durch die gesamte Schalung. An der Endrippe werden diese mit Beton umschlossen. Da die Schläuche bei der Betonage durch den Auftrieb sich nach oben durchbiegen und so ein Herausziehen dieser beim Ausschalen erschweren oder gar unmöglich machen, werden an dieser Stelle die Schläuche durch ein PVC Hüllrohr ($\varnothing 90 \times 5,4\text{mm}$) geführt, welches am Falz der Abdeckplatte und der Ausnehmungen der Stirnschalung befestigt ist. An den Enden der Schläuche sind Storz- Kupplungen mit Deckeln und Ventilen zur Druckluftaufnahme angebracht (siehe Abbildung 118 und Abbildung 119).



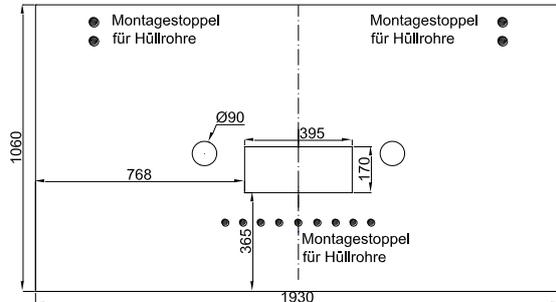
Abbildung 118: Schläuche (Deckel und Ventile)

5.2.3.5 Stirnschalungen

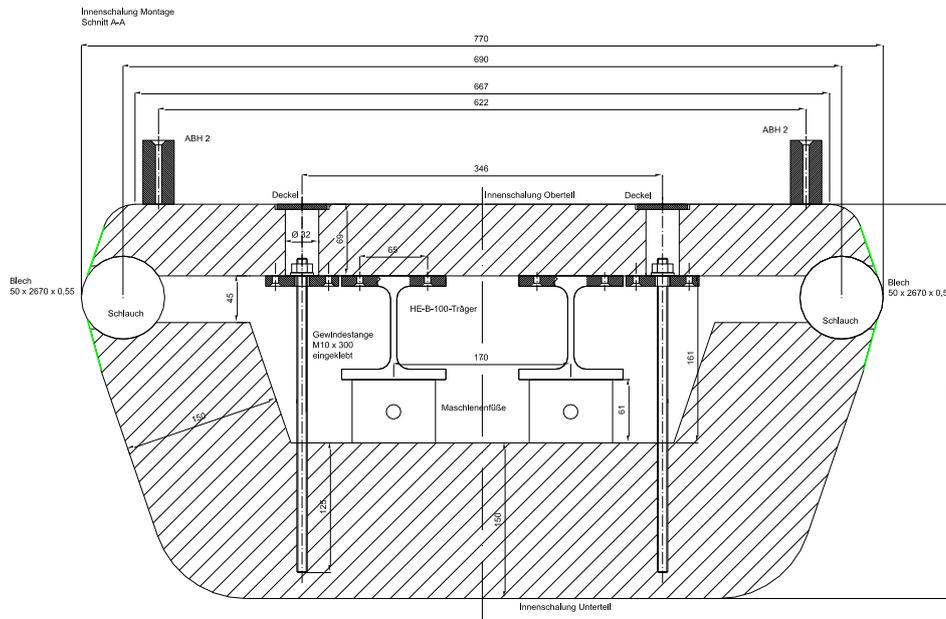
Diese bestehen aus Birken- Sperrholzplatten an denen die Ausnehmungen für die HEB – Träger, die Schläuche und Hüllrohre ausgeschnitten werden. Für die Montage der Hüllrohre für die Monolitzen, werden an den Positionen sogenannte Montagestoppel angeschraubt (siehe Abbildung 119)



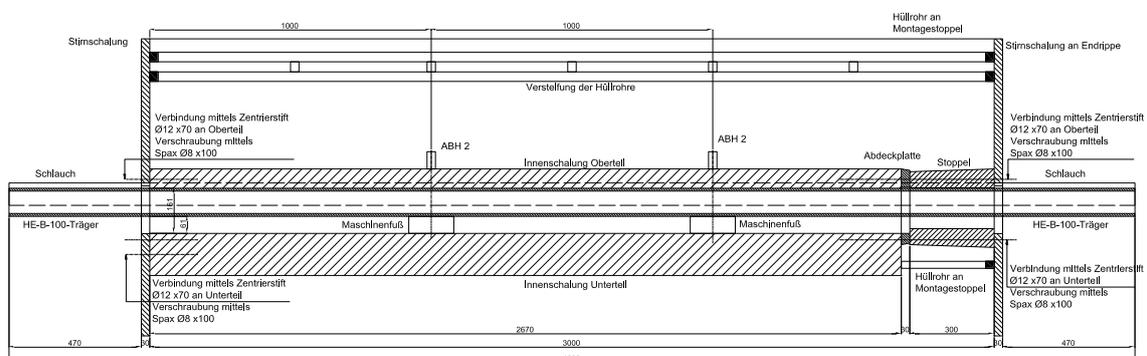
Stirrschalung an zweiteilige Innenschalung



Stirrschalung an Endrippe



Innenschalungssystem

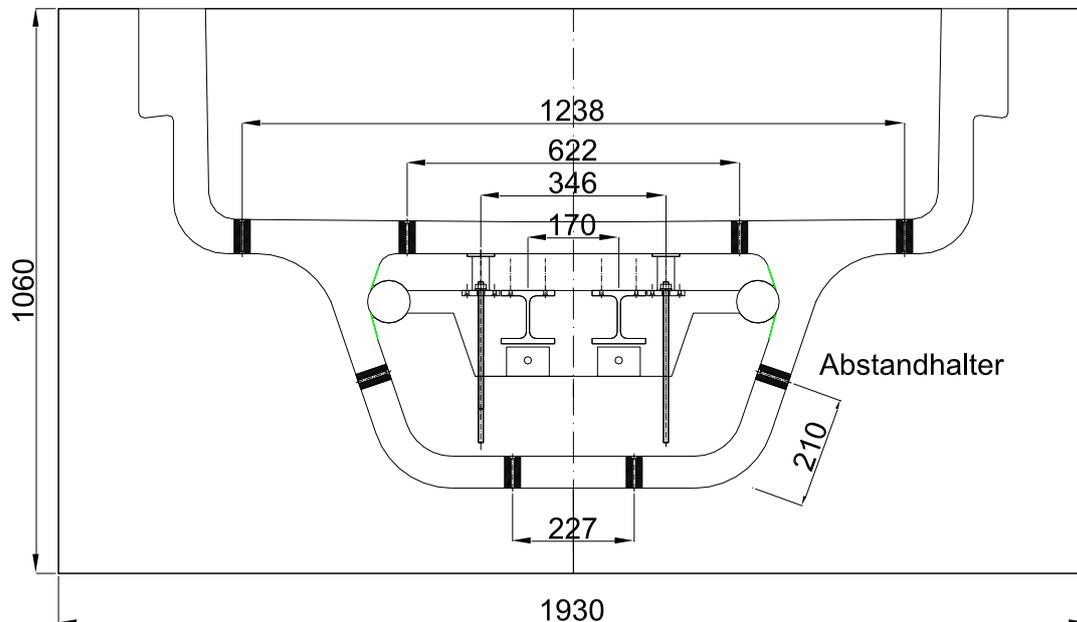


Innenschalungssystem Längsschnitt

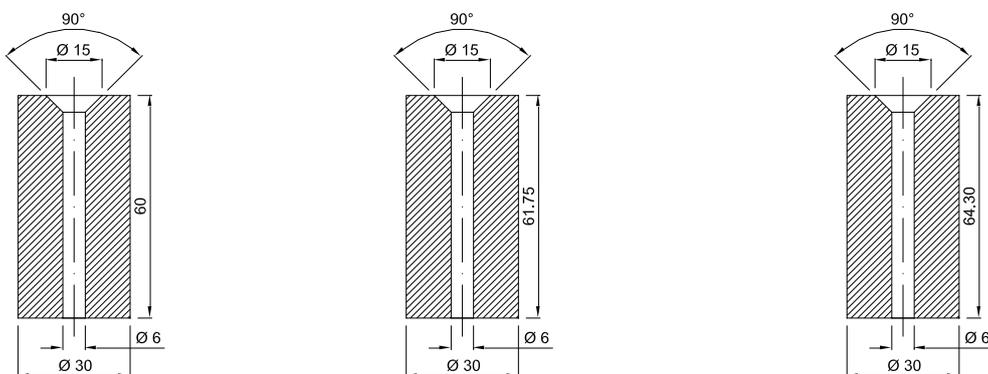
Abbildung 119: Stirrschalungen und Darstellung des gesamten Innenschalungssystems

5.2.3.6 Sonstige Bauteile

Die restlichen notwendigen Bauteile dienen der Durchführung der Monoliten und der Gesamtmontage der Schalung. Für die spätere Vorspannung der Fahrbahnträger werden an der Endrippe und der Brüstung Hüllrohre angebracht. Für die Endrippe werden einfache PVC –Hüllrohre ($\varnothing 22 \times 330\text{mm}$) zwischen Stirnschalungsplatte an der Endrippe und dem Unterteil der Innenschalung angebracht. Die Hüllrohre am Brüstungsbereich bestehen aus zwei Stahlrohren ($\varnothing 30 \times 3000\text{mm}$) die miteinander verschweißt sind (siehe Kapitel 5.2.10). Dies dient der Steifigkeit, da sich das Hüllrohr durch den Auftrieb bei der Betonage durchbiegen könnte. Für die Gesamtmontage werden für die Lagerung der Konterschalung und Innenschalung Abstandhalter aus Kunststoff gefertigt. Diese werden an der Außenschalung und dem Oberteil der zweiteiligen Innenschalung an den Drittelpunkten in Längsrichtung angebracht und dienen der Maßhaltigkeit der Betondicken der Fahrbahn und des Hohlkastens (siehe Abbildung 120).



Abstandhalter Positionen



Abstandhalter Fertigung
Abbildung 120: Abstandhalter

5.2.4 Schlauchversuch

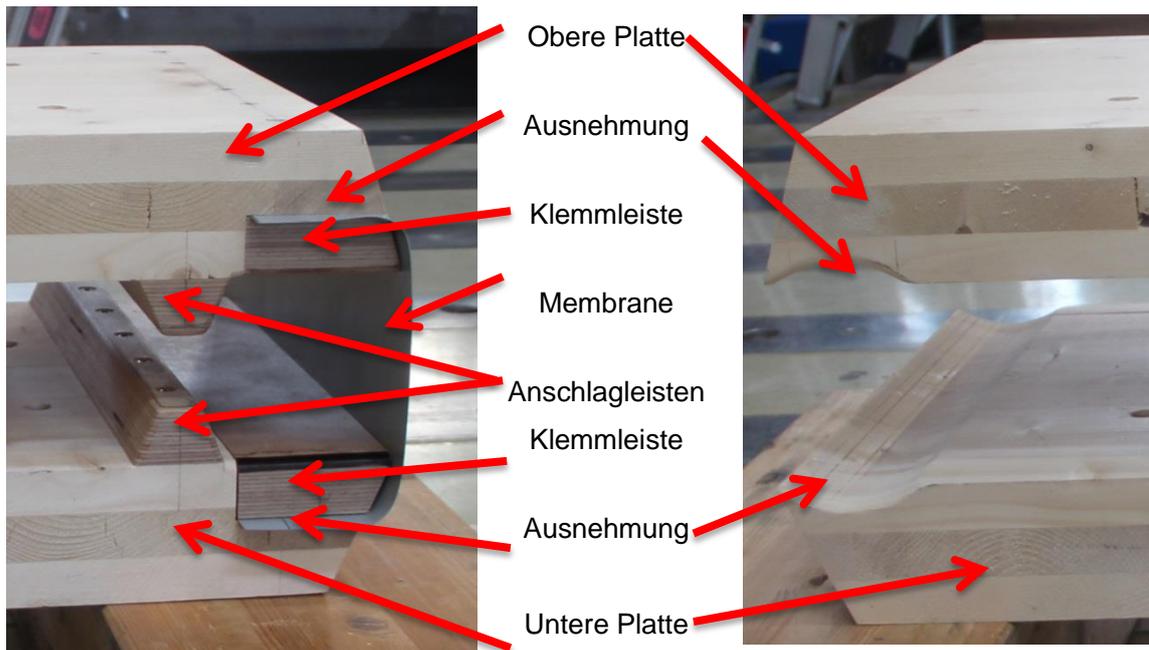
Für eine Entscheidungsfindung wird ein Versuch im Maßstab 1:1 durchgeführt. Dieser soll zeigen, ob die theoretischen Annahmen zutreffen und gegebenenfalls Modifikationen oder Erneuerungen an dem Schalungssystem vorgenommen werden müssen.

Für den Versuchsaufbau werden zwei 3 – Schicht (je 30mm) Brettsperrholzplatten genommen, die den Ober- und Unterteil der Innenschalung darstellen sollen. Diese werden auf das Format 500 x 700 mm zugeschnitten. Die exakte Außenkontur des Kerns müssen sie nicht aufweisen. Es wird lediglich die tangentielle Ende der Außenkontur zum Schlauch zugeschnitten. An der linken Seite wird die Variante 1 der Innenschalung ausgeführt, an der rechten die Variante 2 (siehe Abbildung 121).



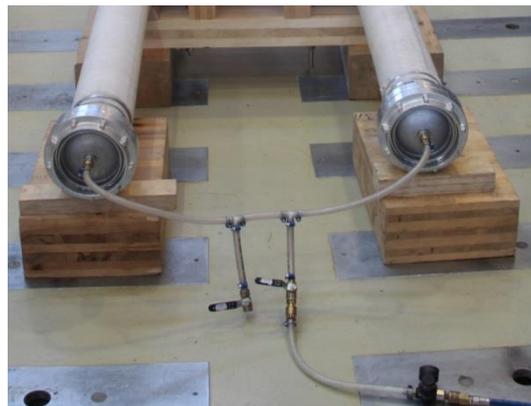
Abbildung 121: Platten Ober-, -unterseite

Die Variante 1 wird wie zuvor beschrieben ausgeführt. An den Platten werden die Ausnehmungen ausgeschnitten, passende Klemmleisten aus Hartholz zugeschnitten, zwischen denen dann die Membrane befestigt wird. Auch die Anschlagleisten werden aus Hartholz zugeschnitten. Für die zweite Variante werden die Ausrundungen ausgeschnitten und geschliffen. Des Weiteren werden für den Zusammenbau die Platten mit Bohrungen versehen. Vor der Montage werden alle Kanten an denen der Schlauch beschädigt werden könnte abgerundet und geschliffen. Beim Zusammenbau wird die untere Platte auf zwei BSH - Blöcke gelegt. Zuvor wurde schon die Membrane zwischen den Klemmleisten und der Unteren Platte verschraubt. Anschließend werden zwei Kanthölzer als Abstandhalter zwischen den beiden Platten verwendet. Der Abstand zwischen den Platten ist derselbe, der im Fertigen Zustand der Innenschalung in Maßstab 1:1 auch auftreten wird. Nun werden die beiden Schläuche auf die Platte positioniert. Die Schläuche sind einfache Bau-Kunst- Schläuche mit einem Innendurchmesser von 150mm, an den Enden sind Storz-Kupplungen mit Deckeln und Ventilen montiert. Danach kommt die obere Platte auf die Kanthölzer. Nun wird die Membran zwischen den Klemmleisten und der oberen Platte verschraubt. Über die vier Bohrungen der Unteren und oberen Brettsperrholzplatte werden Ankerstäbe gegeben miteinander verspannt. Werden (siehe Abbildung 122).

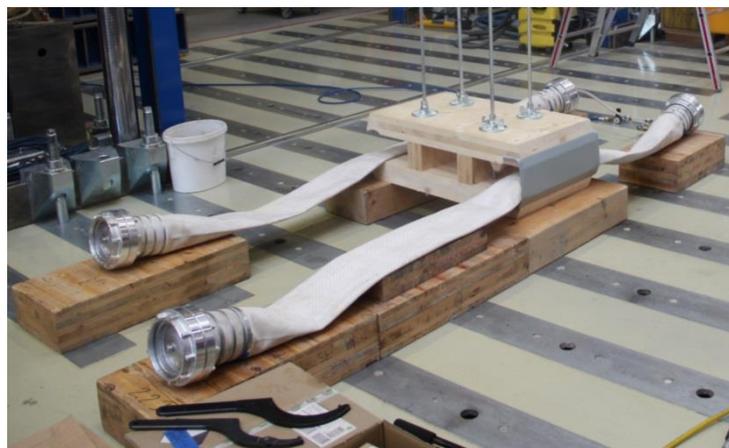


Variante 1 Membrane

Variante 2 Schlauch allein



Schlauch mit Kupplung, Deckel und Ventil



Gesamter Aufbau (Verspannt, Abstandhalter Schlauch lose)

Abbildung 122: Schlauchvarianten

5.2.4.1 Versuchsdurchführung

Nach Beendigung der Montage werden die Schlauchventile an die Druckluft angeschlossen und langsam und kontinuierlich wird Luft in die Schläuche eingelassen bis ein Druck von 3 bar erreicht wird (siehe Abbildung 123).

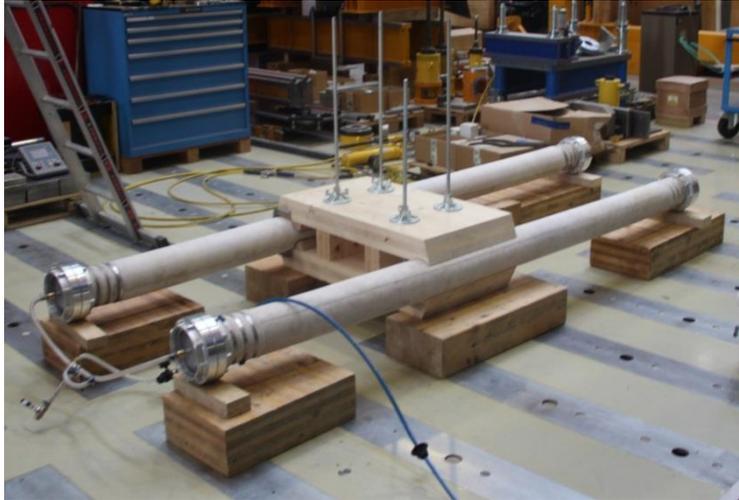


Abbildung 123: Schlauchversuch voll aufgeblasen

5.2.4.2 Auswertung

An der Variante 1 ist zu erkennen, dass der Schlauch zwischen den Platten eingezwängt wird und sich nach außen und innen wölbt. Man sieht auch, dass die Membran gespannt wird, jedoch nicht ganz nach außen gedrückt wird, um die spätere Kontur des Kerns einzunehmen, da der Schlauch sich auch nach Innen wölbt und ausdehnt. Daraus schließt sich, dass ebenfalls wie bei der zweiten Variante, die theoretische Kontur des Kerns nicht eingenommen werden kann und somit mehr Beton benötigt wird (siehe Abbildung 124).

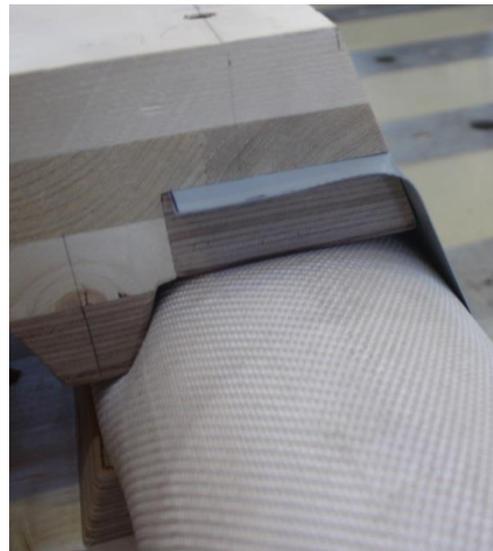


Abbildung 124: Schlauchvariante 1 (Membrane Spannung)

Bei diesem Versuch wird die Hubhöhe der Innenschalung durch die Anschlagleisten kleiner als bei der zweiten Variante. Somit verringert sich auch das Spaltmaß zum Kern. Das könnte zu Schwierigkeiten beim Herausnehmen der Schalung führen. Es wird anschließend ein zweiter Versuch mit niedrigeren Anschlagleisten, die den Hub wieder vergrößern durchgeführt. Dieser zeigt, dass die Membrane ebenfalls ausreichend gespannt und nicht signifikant weniger hinausgerückt wird. Somit könnten die kleineren Anschlagleisten zum Einsatz kommen (siehe Abbildung 125).



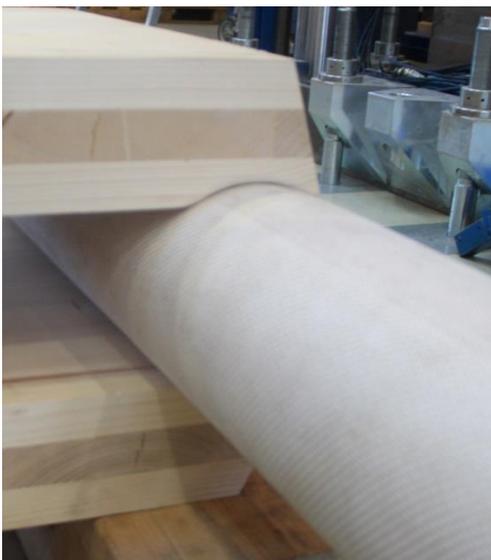
Hohe Anschlagleisten



Niedrige Anschlagleisten

Abbildung 125: Schlauchvariante 1 Anschlagleisten

An der zweiten Variante ist zu erkennen, dass der Schlauch zwar seinen ganzen Durchmesser einnimmt aber dennoch leicht gezwängt wird. Anschließendes Nachmessen ergibt, dass der Schlauch- Außendurchmesser 156mm beträgt und dadurch gezwängt wird. Trotzdem lässt sich erkennen, dass der Schlauch seine Position beibehält und nicht verrutscht. Auch die zuvor beschriebene Zwischenraum an dem sich eine Betonkante bilden könnte ist erkennbar. Dieser soll aber später mit einem 0,55mm dicken Blech abgedeckt werden (siehe Abbildung 126).

**Abbildung 126: Schlauchvariante 2 (Schlauch allein)**

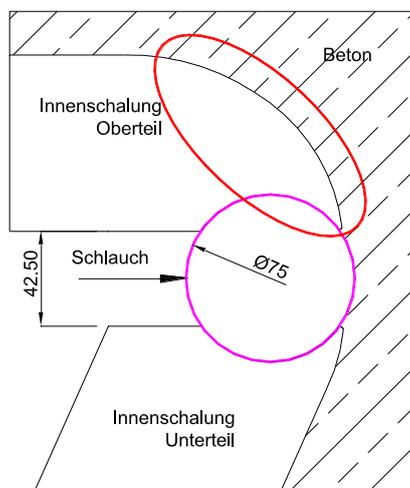
5.2.4.3 Variantenentscheid

An und für sich funktionieren beide Variante. Jedoch wurde schlussendlich die Entscheidung für die Variante 2 getroffen, da diese fertigungstechnisch leichter zu realisieren ist (keine zusätzlichen Teile müssten gefertigt werden). Auch an der Stirnseite würden bei der ersten Variante Probleme auftreten. Der Schlauch würde die Membrane an die Öffnung der Stirnschalung drücken. Dadurch würde ein sogenannter Zwickel entstehen, der wiederum mit Beton gefüllt und somit ein Ausschalen erschweren oder nicht möglich machen.

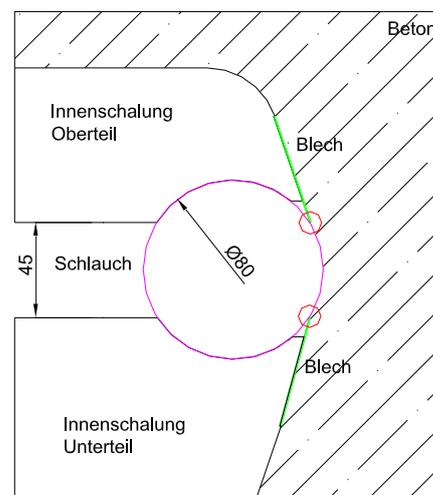
5.2.5 Modifikation an Schlauchvariante

Bei der nun fertigen Schlauchvariante sind einige Modifikationen getroffen worden. Erstens wurde aus Herstellergründen der Schlauchdurchmesser für die 1:2 Schalung von 75 auf 80mm erhöht. Der Schlauch nimmt im vollaufgeblasenen Zustand einen Außendurchmesser von 81,5mm ein. Trotzdem werden die Schalungsteile auf $\varnothing 80$ gefertigt und man damit der Schlauch sich zwischen den Schalungsteilen zwängt. Aufgrund, dass die Schalung aus Brettschichtholz gefertigt wird und dieses durch den gezwängten Schlauch auf Querbiegung beansprucht wird, wird ein Absplittern des Holzes befürchtet (Abbildung 127 , links rot eingekreist). Um dem entgegenzuwirken, wird die betroffene Stelle stärker ausgeführt. Zum Schluss wird noch das Blech an den Ober-, und Unterteil angebracht. Dazu wird ein Falz in die Schalung eingefräst. An diesem wird das Blech anschließen angenagelt. Das Blech ragt ca. 10mm über die Schalungskante hinaus und liegt an den aufgeblasenen Schlauch an.

Dieser drückt aufgrund seiner Auswölbung das Blech ein wenig hinaus. Bei der Betonage bildet sich diesmal eine viel kleinerer Kante (Abbildung 127, rechts rot eingekreist) die aber trotzdem zu Problemen beim Ausschalen führen könnte. Beim Ausschalen jedoch, wird die Luft zunächst aus den Schläuchen abgelassen und das Blech zieht sich wieder zurück. Dadurch behindert die entstehende Betonkante das Zusammenfahren der Schalungsteile nicht und ein Ausschalen sollte daher leicht möglich sein (siehe Abbildung 128).



Alte Variante (Gefahr des Absplitterns, Schlauch $\varnothing 75$ mm)



Neue Variante (stärkere Ausbildung, Schlauch $\varnothing 80$ mm, Blechabdeckung)

Abbildung 127: Modifikationen an Schlauchvariante

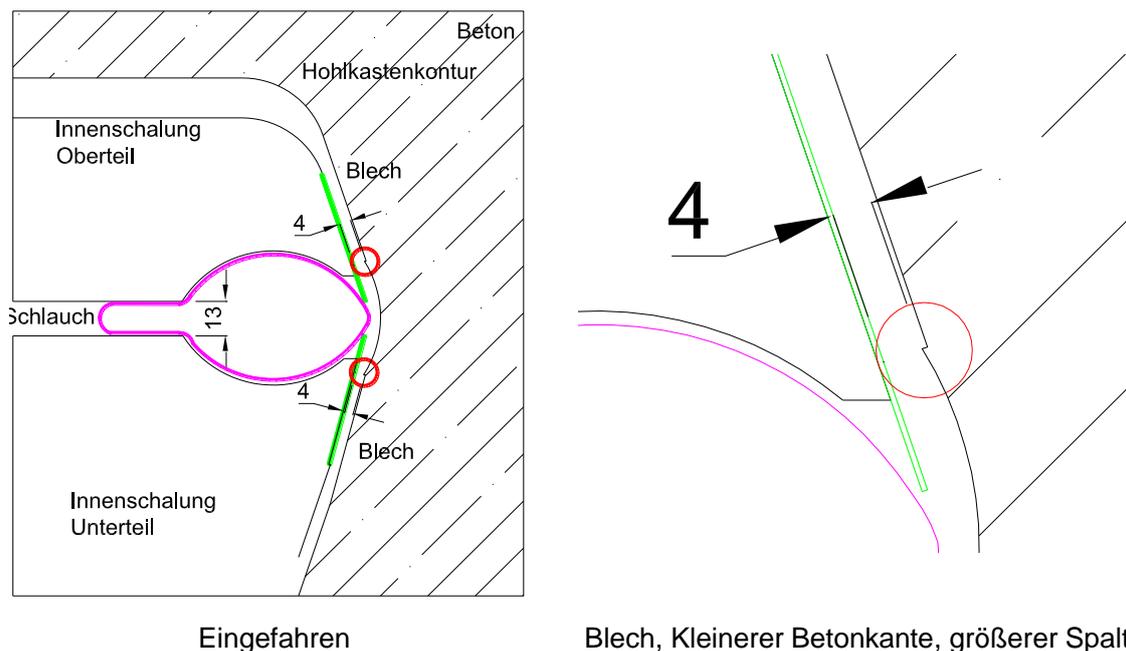


Abbildung 128: Modifizierte Schlauchvariante

5.2.6 Zug-, Drucksicherung

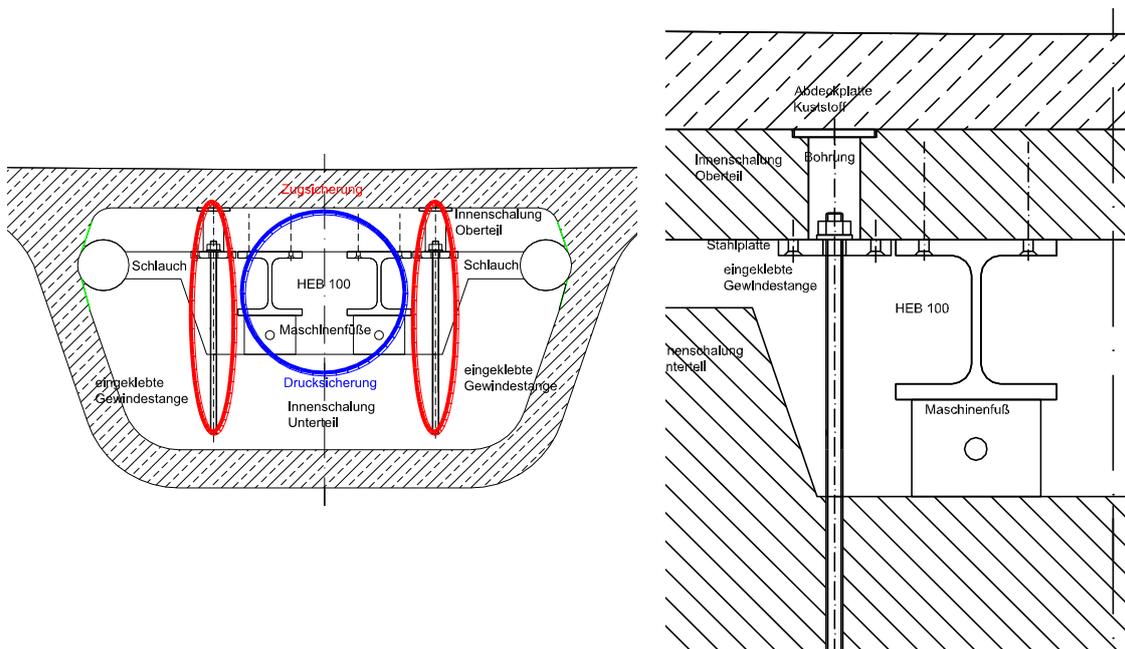
Da der Schlauch lediglich nur zum Verschließen der Öffnung zwischen Ober-, und Unterteil zum Einsatz kommt und nicht dazu gedacht ist, dem Betondruck alleine entgegenzuwirken, müssen für die Konstruktion der Innenschalung zwei Lastfälle berücksichtigt und gegebenenfalls Vorkehrungen getroffen werden.

Lastfall 1 tritt beim Zusammenbau des Innenschalungssystems auf, wenn der Schlauch vollständig aufgeblasen ist. Dieser Zustand bleibt bis zur Betonage erhalten, solange noch kein Beton in die Schalung fließt. Durch das Aufblasen des Schlauches drückt dieser gegen das Oberteil der Innenschalung und es hebt ab. Um diesen Lastfall entgegenzuwirken, muss eine sogenannte Zugsicherung eingebaut werden. Für diese Zugsicherung werden an den Drittelpunkten in Längsrichtung jeweils zwei M10 Gewindestangen in das Unterteil eingeklebt. Am Oberteil werden an den gleichen Positionen Bohrungen vorgesehen, durch die die Gewindestangen beim Zusammenbau hindurch gesteckt werden. Über an der Unterkante des Oberteils befestigte Stahlplatten und selbstsichernde Muttern an den Gewindestangen ist das Oberteil gegen das Abheben gesichert. Die Bohrungen werden zum Schluss mit Kunststoffdeckeln verschlossen und mit Silikon abgedichtet, damit kein flüssiger Beton eindringen kann.

Lastfall 2 tritt bei der Betonage selbst ein. Hier muss die Innenschalung dem Betondruck standhalten. Gegen das Zusammendrücken beider Hälften muss eine Drucksicherung eingebaut werden. Bei dieser „Drucksicherung“ werden an den Drittelpunkten in Längsrichtung jeweils zwei Maschinenfüße platziert. Diese können in die gewünschte Hübhöhe händisch ausgefahren werden. An der Unterkante des Oberteils werden zwei 4m lange HEB 100 – Träger montiert. Diese erhöhen gleichzeitig den Widerstand des Oberteils gegen den Betondruck. Beim Zusammenbau sind diese über den Maschinenfüßen

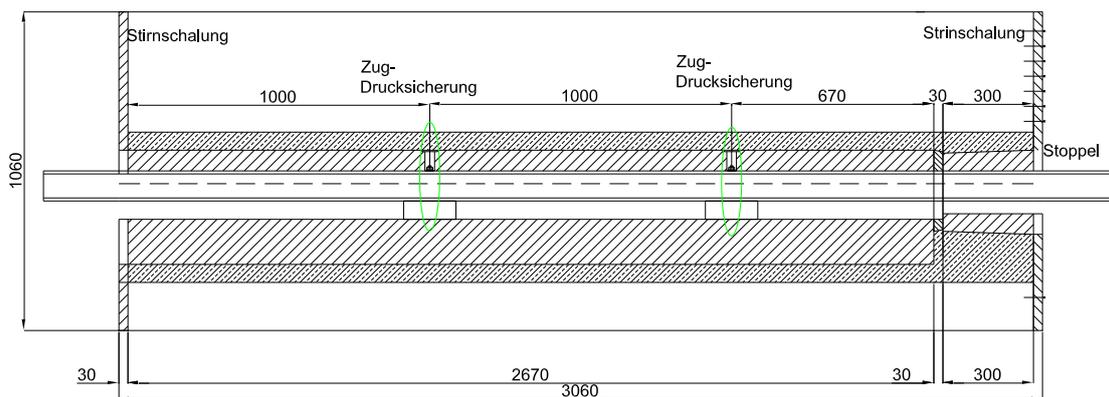
positioniert. Nun werden die Füße soweit ausgefahren, bis die gesamte Innenschalung ihre gewünschte Position (Höhe des Hohlkastens) einnimmt. Somit sind die Innenschalungsteile gegen das Zusammendrücken durch den Betondruck gesichert.

Für die exakte Lage der Teile zueinander, sind diese an den Stirnseiten mit Zentrierbohrungen versehen. Über Stifte werden die Teile mit der Stirnschalung und der Abdeckplatte befestigt, positioniert und verschraubt. Die 4m langen Träger ragen jeweils 0,5m durch die Schalung. Dafür wurden Ausnehmungen an den Stirnschalungen vorgesehen. Sie dienen nicht als Drucksicherung, sondern sind für das später Ausschalen von Nutzen (siehe Kapitel 5.2.10 und 5.4).



Zug-, Drucksicherung

Zug-, Drucksicherung Detail



Schnitt Gesamtschalung Zug-, Drucksicherung Anordnung

Abbildung 129: Zug- Drucksicherung Innenschalung

5.2.7 Einzelteile Fertigung

Die einzelnen Schalungsteile werden aus BSH Rohlingen gefertigt. Mittels eines CNC-gesteuerten Roboters werden die Konturen der Schalung aus diesen ausgefräst. Die Abdeckplatte wird aus einer 30mm dicken Sperrholzplatte ausgefräst (siehe Abbildung 130).



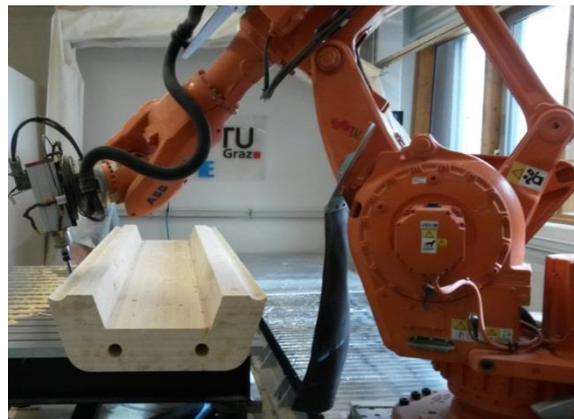
Außenschalung



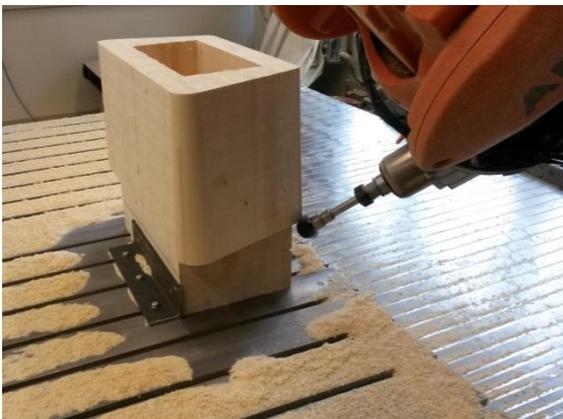
Konterschalung



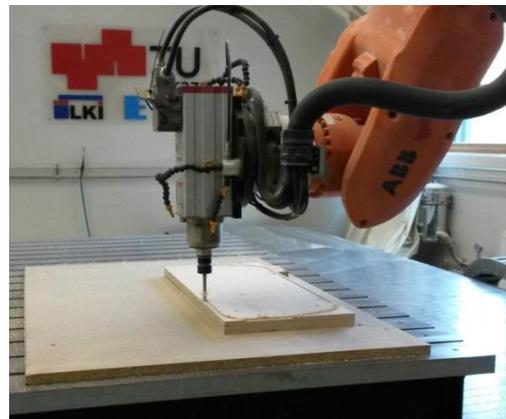
Innenschalung Oberteil



Innenschalung Unterteil



Stoppel



Abdeckplatte

Abbildung 130: Fertigung Einzelteile

Zuvor wurde an einem Musterstück erprobt, mit welcher Zustellung (Vorschub) der Roboter die Bearbeitung ausführen sollte (siehe Abbildung 131). Je größer die Zustellung ist, desto kürzer ist die Bearbeitungszeit, aber umso rauer ist die Oberfläche, die dann nachbearbeitet werden muss. Je niedriger die Zustellung ist, umso feiner ist die Oberfläche. An einem Musterstück wurden Probeflächen mit Zustellungen von 4, 6, 8 und 10mm gefräst.



Musterstück



4mm Zustellung



6mm Zustellung



8mm Zustellung



10mm Zustellung

Abbildung 131: Zustellungsproben am Musterstück

Für die Fertigung wurde schlussendlich eine Zustellung von 4mm gewählt, da der Nachbearbeitungsaufwand (Zeit) bei den anderen Zustellungen wesentlich höher wäre. Nach der Fertigung wurden die gefrästen Schalungsteile nachbearbeitet und beschichtet.

5.2.8 Beschichtung

Als Beschichtung für die Schalungsteile wird eine lösemittelfreies zwei Komponenten PU-System verwendet. Dieses System wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma PERI GesmbH von ihr empfohlen. Die Beschichtung ist von der Firma Emil Frei GmbH & Co. KG entwickelt worden und nennt sich „DURELASTIC PU-top Coat BD7289“ [33], [34]. Die zweite Komponente, der Härter nennt sich HD0233 und ist geheim, weshalb nur das Sicherheitsdatenblatt hier in der Literatur angegeben ist [35].

Bevor jedoch die Schalungsteile beschichtet werden können, müssen die mit Beton in Kontakt tretenden Oberflächen zuvor nachbearbeitet werden, d.h. sämtliche Holzfehler durch Äste, Risse und die Fräsrillen müssen geschliffen bzw. gespachtelt und geschliffen werden. In der Abbildung 132 ist ein Vergleich zwischen bearbeiteten (gefrästen), nachbearbeiteten und beschichteten Schalung dargestellt. Zu erwähnen ist, dass die Bleche für die Innenschalungsteile noch während der Beschichtung auf das Ober-, und unterteil genagelt wurden, damit die Beschichtung zwischen Blech und Holz liegt und so eine Schutzschicht gegen den Frischbeton in den Fugen bildet.



Gefräste Außenschalung



Fehlstellen (Riss, Ast)



Nachbearbeitung (gespachtelt und geschliffen)



Beschichtung

Abbildung 132: Bearbeitungsschritte der Schalung

5.2.9 Bemessung

Für die nun folgenden Bemessungen soll vermerkt sein, dass auf die Einwirkung des Eigengewichts der Schalung verzichtet wurde, da diese nicht sonderlich zum Tragen kommt. Sämtliche notwendigen Verschraubungen, oder eingeklebte Gewindestangen wurden nach enBR (eurocodenahe Bemessungsrichtlinie) bemessen.

In diesem Unterkapitel wird lediglich auf die Bemessung der einzelnen Schalungsteile eingegangen. Dabei wurden die Nachweise nach Eurocode 5 berechnet.

5.2.9.1 Betondruck

Der Betondruck ist die einzige Einwirkung, die auf die Schalungsteile wirkt. Nach DIN 18218: 2010 wird über die ganze Höhe der Schalung der hydrostatische Frischbetondruck angesetzt (siehe Abbildung 133). Für die Bemessung wurde die Einwirkung durch einen Teilsicherheitsbeiwert noch erhöht.

- Rohdichte UHPC: $\rho_{\text{UHPC}} = 2500 \text{ kg/m}^3$
- Frischbetondruckwichte UHPC: $\gamma_{\text{UHPC}} = 25 \text{ kN/m}^3$
- Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkung: $\gamma_s = 1,35$

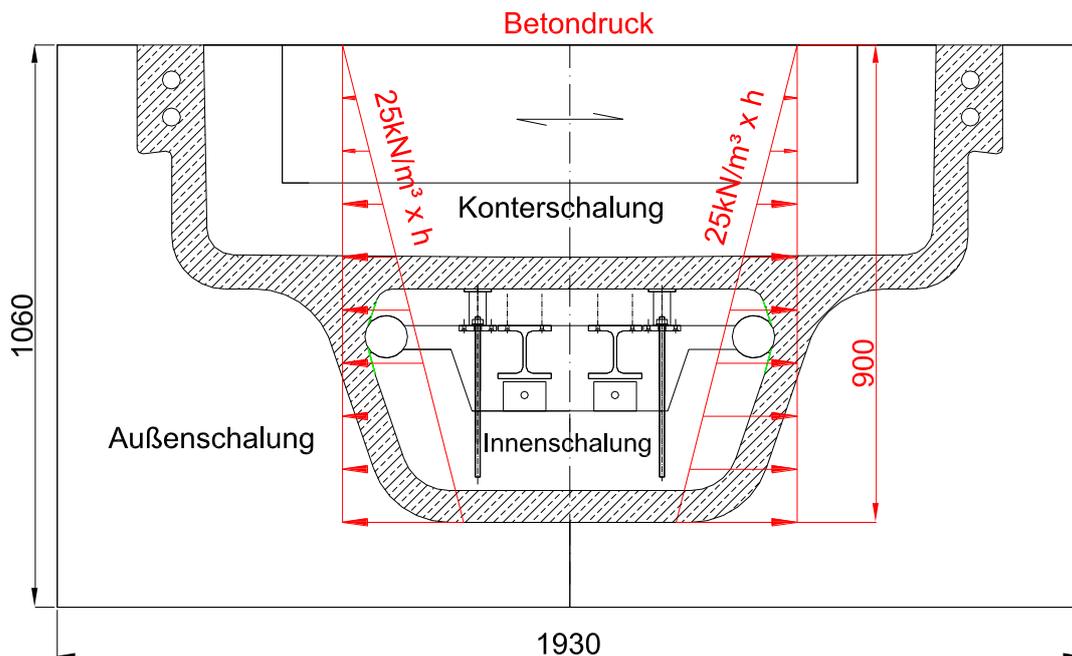


Abbildung 133: hydrostatischer Betondruck

5.2.9.2 Notwendiger Schlauchdruck

Da der Schlauch nur zum Schließen der Öffnung und nicht zur Sicherung des Zusammendrückens des Oberteils der Innenschalung dient, wird für die Ermittlung des notwendigen Schlauchdrucks nur der horizontale Betondruck herangezogen. Dieser wirkt nur zwischen den Schalungsteilen ($h_1=0,519\text{m}$ $h_2=0,58\text{m}$). Zunächst wird die resultierende Kraft des Betondrucks (Trapez) auf 1m Einflussbreite berechnet (Gl.1) (siehe Abbildung 134).

$$R = \frac{1}{2} \times [(\gamma_{UHPc} \times h_1 \times 1 + \gamma_{UHPc} \times h_2 \times 1) \times h_3] \quad (\text{Gl.1})$$

$$= \frac{1}{2} \times [(25 \times 0,519 \times 1 + 25 \times 0,58 \times 1) \times 0,061] = \mathbf{0,84 \text{ kN}}$$

Diese Kraft aufgeteilt auf die Öffnung der Lücke ($h_3 = 0,061\text{m}$) und 1m Einflussbreite multipliziert mit einem ausgemachten Sicherheitsfaktor von 2 ergibt den notwendigen Schlauchdruck (Gl.2)

$$P_{\text{Schlauch}} = \frac{R}{h_2 \times 1} \times 2 = \frac{0,84}{0,061 \times 1} \times 2 \approx \mathbf{27,54 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,28 \text{ bar}} \quad (\text{Gl.2})$$

Obwohl es nicht notwendig ist wird der Schlauchdruck nach Absprache auf $\mathbf{150 \text{ kN/m}^2 = 1,5 \text{ Bar}}$ erhöht.

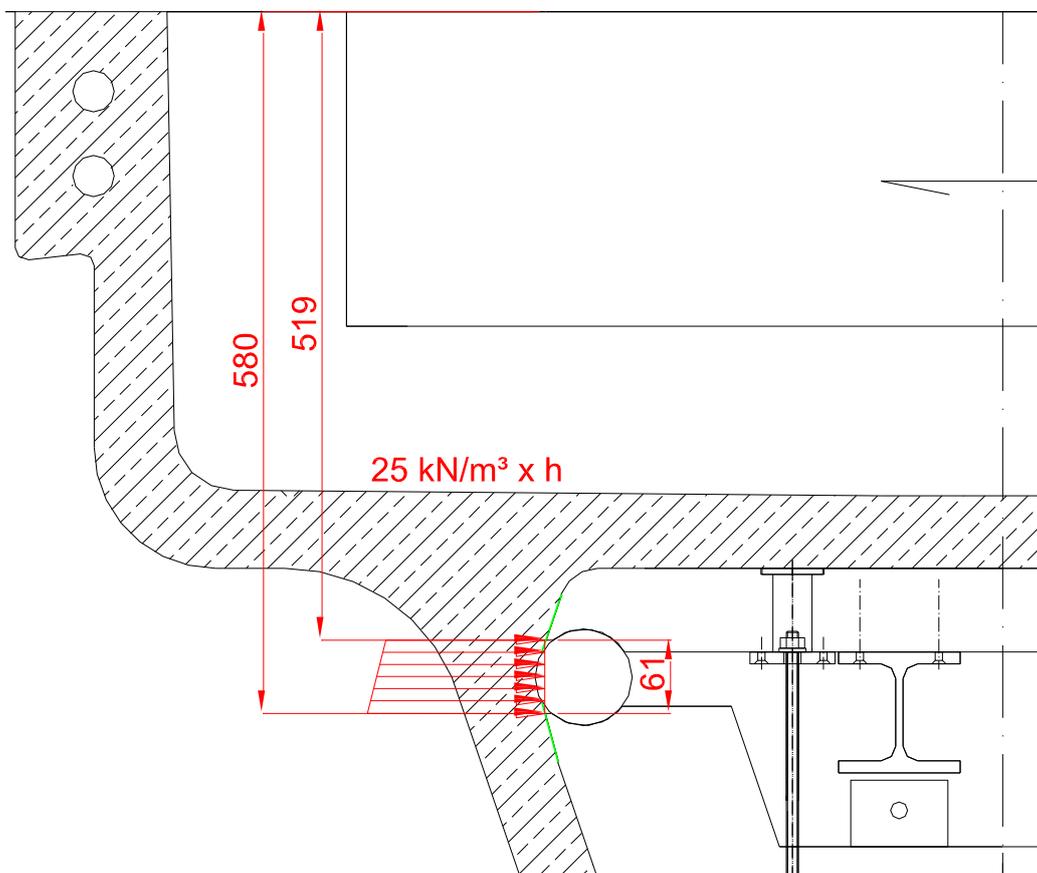


Abbildung 134: Betondruck auf Schlauch (Maße in mm)

5.2.9.3 Gezwängter Schlauch

Da der Schlauch beim Aufblasen einen größeren Durchmesser annimmt (>80mm), wird er zwischen den Innenschalungsteilen gezwängt. Daraus resultiert eine Druckkraft, die auf die Schalungsteile wirkt und für die Bemessung der Zugsicherung maßgebend ist.

Dabei wird aus Sicherheitsgründen angenommen, dass sich der Schlauch von 80 auf 84mm ausdehnt. Dies führt zu einer Zwängung des Schlauches und somit zu einer Flächenänderung und Druckerhöhung (siehe Abbildung 135). Diese Ermittlung ist eine reine Annahme

Durch die Komprimierung verändert sich die Kreisfläche von 5541,8mm² auf 5357mm². Dies führt zu folgender Druckänderung (Gl.3).

$$\frac{P_{\text{Schlauch}}}{A_2} = \frac{P_{S,\text{neu}}}{A_1} = \frac{150}{0,005357} = \frac{P_{S,\text{neu}}}{0,005542} \Rightarrow P_{S,\text{neu}} = 155 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,55 \text{ bar} \quad (\text{Gl.3})$$

Das ergibt eine Drucksteigerung von 0,05 bar die auf die Schalung wirken. Über den Kreisbogen an dem Ober- und Unterteil von (0,07m) und 1m Einflussbreite resultiert folgende einwirkende Kraft (Gl.4).

$$F = \Delta P \times \text{Bogenmaß} \times 1 = 5 \times 0,07 = 0,35 \text{ kN} \quad (\text{Gl.4})$$

gezwängter Schlauch Ø_a 84mm

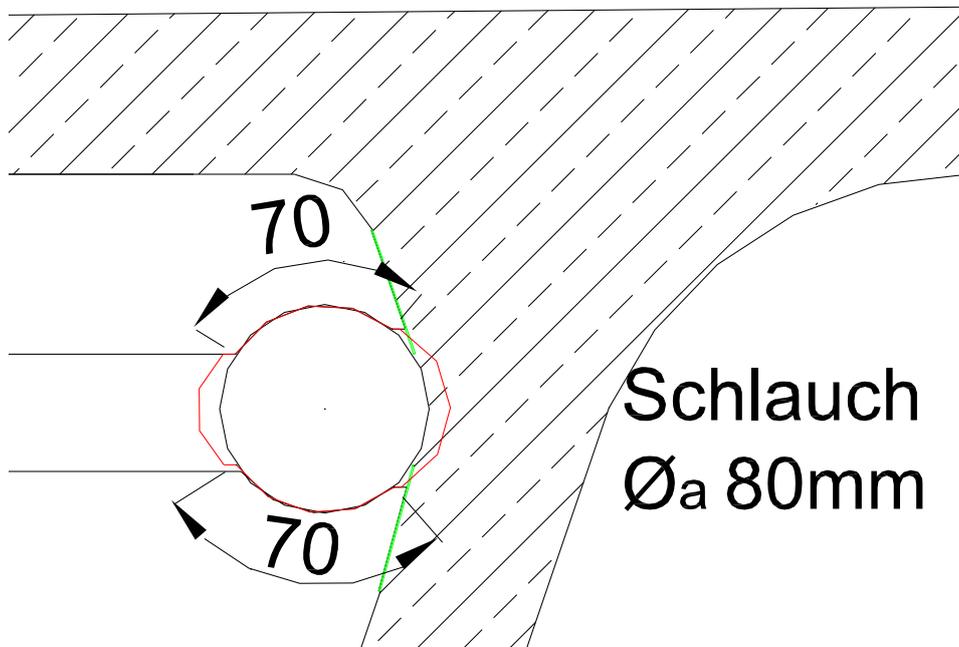


Abbildung 135: Komprimierung des Schlauches

5.2.9.4 Material

Das Material ist Fichten- Brettschichtholz GL 24h. Nach Eurocode 5 darf zur Abminderung der Festigkeitswerte ein Modifikationsfaktor k_{mod} von 0,9 und ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_m = 1,25$ genommen werden.

Anhand dieser Werte können nun die charakteristischen Festigkeitswerte in Designwerte umgerechnet werden (Gl.5).

$$f_d = \frac{k_{mod} \times f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Gl.5})$$

5.2.9.5 Außenschalung

Die Außenschalung besteht aus mehreren verleimten BSH – Trägern. Zunächst wird die maximal horizontale Druckkraft ermittelt, die die Schalungshälfte von der andern wegdrücken will. Dabei wird der hydrostatische Betondruck über die ganze Höhe angenommen und die Resultierende gebildet (Gl.7) (siehe Abbildung 136). Die Ermittlung der Resultierenden des vertikalen Drucks wird vernachlässigt, da diese vom Boden Aufgenommen wird und sich somit aufheben. Dadurch hat der vertikale Betondruck in den weiteren Berechnungen keinen Einfluss drauf.

$$R_d = \gamma_s \times \gamma_{UHPC} \times \frac{h^2}{2} \times 3m \text{ Länge} = 1,35 \times 25 \times \frac{0,9^2}{2} \times 3 = 41kN \quad (\text{Gl.7})$$

(3m ist die Länge der Schalung)

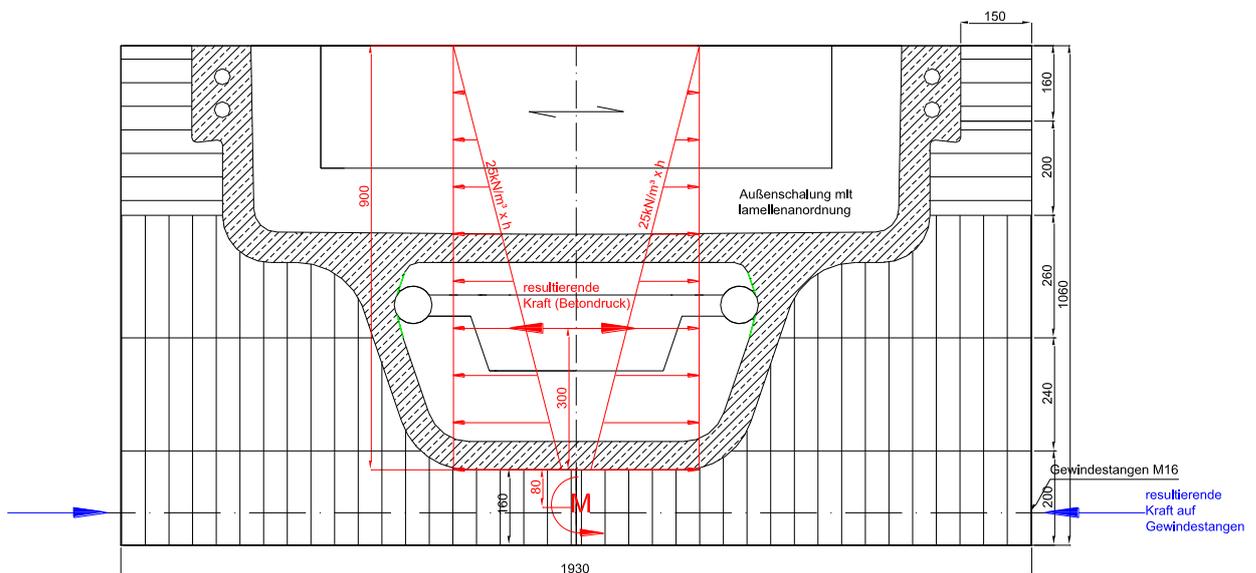


Abbildung 136: Betondruck Außenschalung

Diese Kraft wird von den 4 Gewindestange M16mm 8.8 aufgenommen. Jede Gewindestange muss somit 10kN aufnehmen können. Da die Gewindestäbe eine Zugfestigkeit von 800 N/mm² besitzen und somit eine Kraft von 125,6 kN aufnehmen können, stellt dies kein Problem dar.

Des Weiteren erzeugt die resultierende Kraft am Stoß der zwei zu verbindenden Schalungsteile ein Moment (Gl.8) und somit eine Spannung. Zur Aufnahme dieses Moments werden, die zwei Schalungsteile über die Gewindestangen vorgespannt.

$$M_d = R_d \times (0,3 + 0,08) = 41 \times 0,38 = 15,6 \text{ kNm} \quad (\text{Gl.8})$$

Über den Nachweis der Querbiegung auf der Biegezugseite kann die notwendige Vorspannung ermittelt werden (Gl.9).

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{\sigma_{p,min,d}} \leq 1 = \frac{\frac{15,6 \times 10^6}{3000 \times 160^2}}{\frac{6}{\sigma_{p,min,d}}} \leq 1 \Rightarrow \sigma_{p,min,d} = 1,22 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Gl.9})$$

W... Widerstandsmoment [mm³]

Um das Moment aufnehmen zu können, muss über die 4 Gewindestangen jeweils eine Vorspannung von min. 0,30 N/mm² aufgebracht werden. Das ergibt auf die Fläche im Bereich einer einzelnen Gewindestange (A = 750 x 160mm) eine Vorspannkraft von 36 kN pro Gewindestange.

Als nächstes wird der Nachweis der Biegedruckseite durchgeführt. Dabei soll sichergestellt werden, dass die max. Vorspannung mit der Biegedruckspannung kleine sind all die Druckfestigkeit quer zur Faser (Gl.10).

$$\frac{\frac{M_d}{W} + \sigma_{p,max,d}}{f_{c,90,d} \times k_{c,90}} \leq 1 = = \frac{\frac{3,90 \times 10^6}{750 \times 160^2} + 0,75}{\frac{6}{1,94 \times 1,0}} = 0,54 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.10})$$

A... Bruttoquerschnitt [mm²] (Breite des Blockes wurde gemittelt)

f_{c,90,d}... Bemessungswert Querdruckfestigkeit [N/mm²]

k_{c,90}... Beiwert zur Berücksichtigung der Geometrie der Lastanordnung

σ_{p,max,d}... max. Vorspannung = 2,5 x σ_{p,min,d}

Zum Schluss wird noch Drucknachweis der Vorgespannten Gewindestange am Stoß geführt (Gl.11):

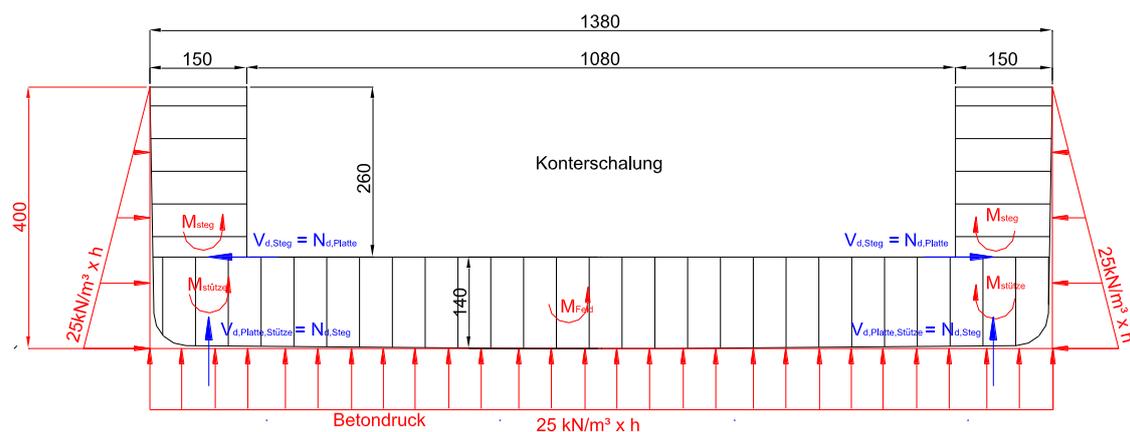
$$\frac{\frac{F_{c,90,d}}{A}}{f_{c,90,d} \times k_{c,90}} = \frac{\frac{36 \times 10^3}{750 \times 160}}{1,94 \times 1,0} = 0,15 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.11})$$

Für den Einbau der Gewindestäbe werden am unteren Ende Bohrungen (Ø20mm) gebohrt. Nach Eurocode 5 muss ein Mindestabstand zum Rand a_{4,c} = 3xd = 60mm betragen. Somit wäre eine Dicke von 120mm ausreichend jedoch wird aus Fertigungstechnischen Gründen die dicke auf 160mm erhöht (siehe Abbildung 136).

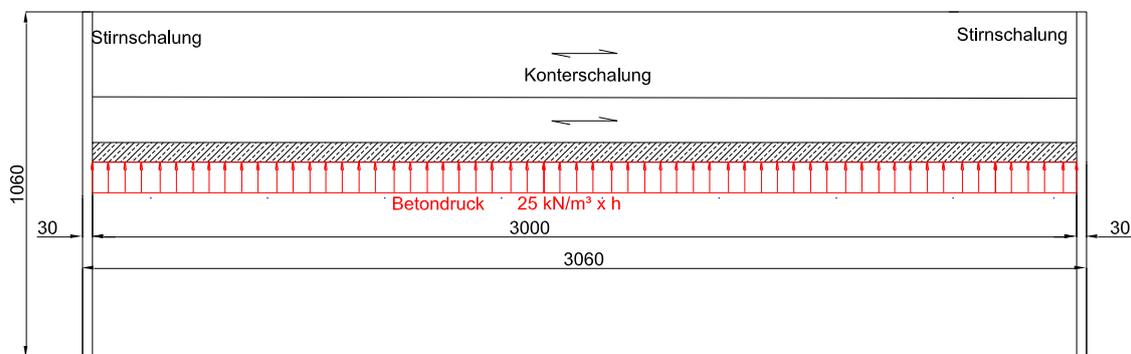
Das obere Ende ist 150mm dick. Die Dicke wurde aufgrund der Anbringung der Befüllvorrichtung für die Betonage so gewählt und anhand dieser wurde die restliche Schalung dementsprechend dimensioniert.

5.2.9.6 Konterschaltung

Die Konterschaltung ist aus drei BSH-Trägern verleimt. Einer 14cm dicken Platte und zwei 15cm dicken Stegen an der Seite. Für die Bemessung wird die Verbindung der Stege mit der Platte als Einspannung betrachtet. Die Einflussbreite beträgt 1,5m (halbe Schalungslänge) Mit Hilfe eines Statikprogramms ergeben sich folgende Schnittkräfte (siehe Abbildung 137). Dabei wurden alle Wert mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_s = 1,35$ erhöht.



Konterschaltung Aufsicht



Konterschaltung Längsschnitt

Abbildung 137: Betondruck Konterschaltung

Maßgebende Werte:

$$V_{d,Platte,Stütze} = -13,80 \text{ kN} = N_{d,Steg}$$

$$M_{d,Platte,Stütze} = -3,21 \text{ kNm}$$

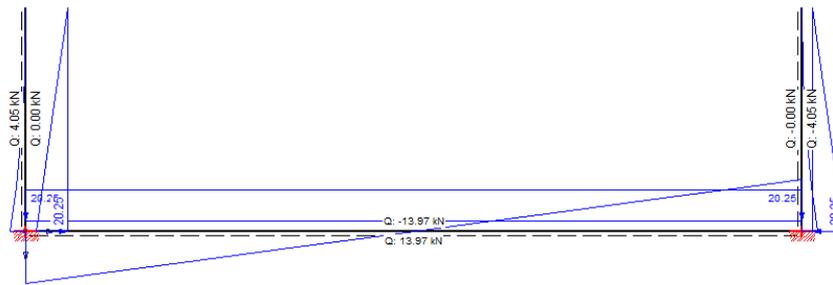
$$M_{d,Platte,Feld} = 1,61 \text{ kNm}$$

$$V_{d,Steg} = 4,05 \text{ kN} = N_{d,Platte}$$

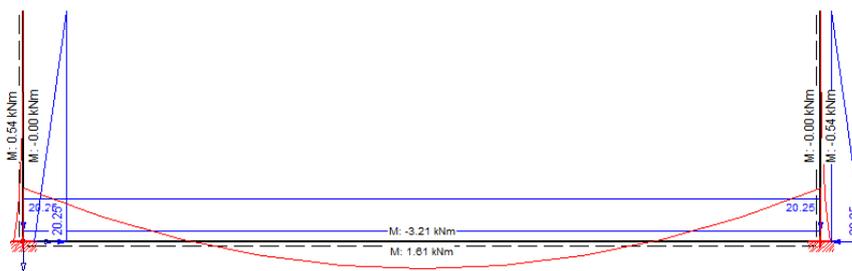
$$M_{d,Steg} = 0,54 \text{ kNm}$$

Mit N_d ist die Auflagerkraft gemeint, die für den Drucknachweis benötigt wird.

Dabei ergeben sich folgende Schnittkräfte



Querkraftverlauf



Momentenverlauf

Nachweise Platte, Stütze

Drucknachweis (Gl.12)

$$\frac{\frac{N_d}{A}}{f_{c,90,d} \times k_{c,90}} = \frac{4,05 \times 10^3}{1500 \times 140} = 0,01 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.12})$$

Schubnachweis (Rollschub) (Gl.14)

$$\frac{1,5 \times V_d}{f_{rd}} = \frac{1,5 \times 13,80 \times 10^3}{1500 \times 140} = 0,14 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.14})$$

Biegenachweis (Querzug) (Gl.15):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{t,90,d}} = \frac{\frac{3,21 \times 10^6}{1500 \times 400^2}}{0,36} = 0,22 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.15})$$

$f_{t,90,d}$... Bemessungswert Querzugfestigkeit [N/mm²]

Biegenachweis (Querdruk) (Gl.16):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{c,90,d}} = \frac{\frac{3,21 \times 10^6}{1500 \times 400^2}}{1,94} = 0,041 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.16})$$

Nachweise Steg

Drucknachweis (Gl.17)

$$\frac{\frac{N_d}{A}}{f_{c,90,d} \times k_{c,90}} = \frac{13,80 \times 10^3}{1500 \times 150} = 0,032 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.17})$$

Schubnachweis (Rollschub) (Gl.18)

$$\frac{1,5 \times V_d}{A} = \frac{1,5 \times 4,05 \times 10^3}{1500 \times 150} = 0,0375 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.18})$$

Biegnachweis (Querzug) (Gl.19):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{t,90,d}} = \frac{\frac{0,54 \times 10^6}{1500 \times 150^2}}{0,36} = 0,27 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.19})$$

Biegnachweis (Querdruck) (Gl.20):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{c,90,d}} = \frac{\frac{0,54 \times 10^6}{1500 \times 150^2}}{1,94} = 0,049 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.20})$$

Nachweise Feld

Biegnachweis (Querzug) (Gl.21):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{t,90,d}} = \frac{\frac{1,61 \times 10^6}{1500 \times 140^2}}{0,36} = 0,91 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.21})$$

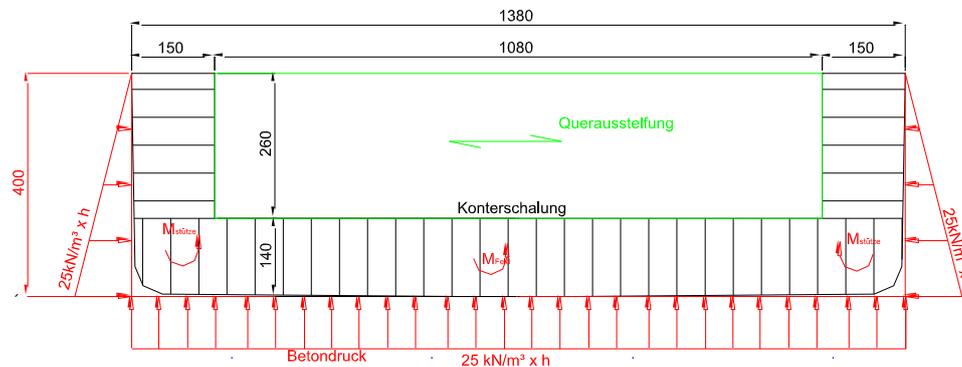
Biegnachweis (Querdruck) (Gl.22):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{c,90,d}} = \frac{\frac{1,61 \times 10^6}{1500 \times 140^2}}{1,94} = 0,17 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.22})$$

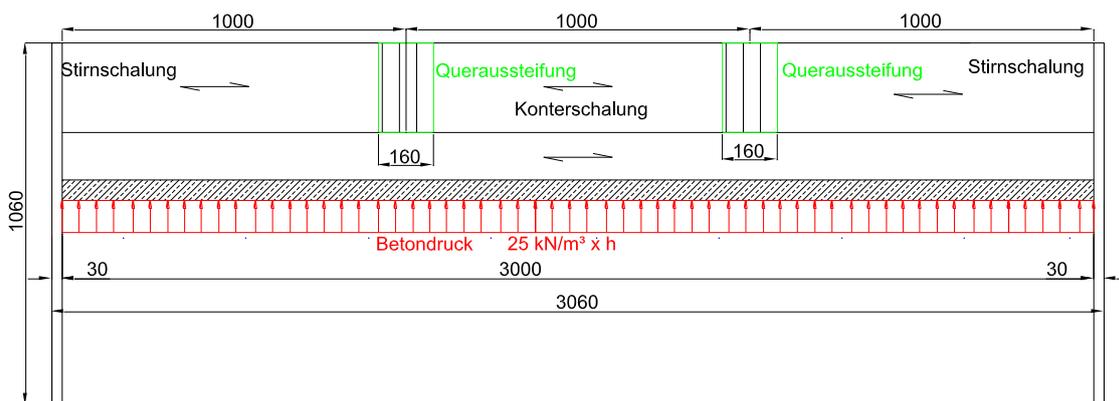
Durchbiegung:

Die Durchbiegung im Feld beträgt 0,076mm. Längs der Konterschalung ergibt sich in der Mitte eine maximale Durchbiegung von 5,66mm.

Aufgrund das die Durchbiegung im Feld zu groß ist, wurden an den Drittelpunkten Queraussteifungen vorgenommen. Somit wird die Platte in diesem Bereich Dicker und weist eine höhere Steifigkeit auf (siehe Abbildung 138).



Konterschaltung mit Queraussteifungen (Aufsicht)



Konterschaltung mit Queraussteifungen (Längsschnitt)

Abbildung 138: Konterschaltung mit Queraussteifungen

Durch die Queraussteifungen reduziert sich für die Bemessung die Einflussbreite auf 1,0m und somit auch die resultierenden Schnittkräfte. Da sich die Nachweise zuvor schon ausgingen, wird hier lediglich nochmal der kritischste Nachweis angeführt und die Durchbiegung.

Nachweise Feld neu

Biegenachweis (Querzug) (Gl.23) $M_{d,Feld,neu} = 1,08Nm$:

$$\frac{M_d}{f_{t,90,d} \cdot W} = \frac{1,08 \times 10^6}{\frac{100 \times 140^2}{6}} = 0,91 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (Gl.23)$$

Durchbiegung:

Die Durchbiegung im Feld beträgt 0,025mm. Längs der Konterschaltung ergibt sich eine maximale Durchbiegung von 0,036mm (an den Stirnschalungsseiten).

5.2.9.7 Innenschalung

Die Innenschalung besteht aus zwei Teilen, dem Ober-, und Unterteil. In der Abbildung 139 ist das idealisierte System zur Bemessung und die auftretende Kräfte dargestellt. Im Weiteren werden die zwei Teile getrennt betrachtet.

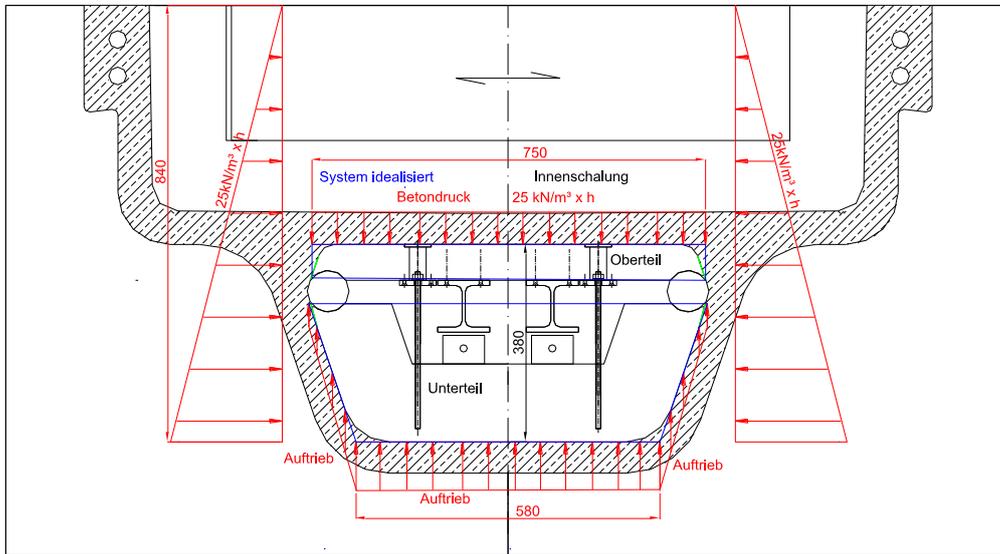


Abbildung 139: Innenschalung idealisiertes System, Betondruck

Unterteil:

Der Unterteil besteht aus drei verleimten BSH- Blöcken (zwei Stegen und einer Bodenplatte) und ist trapezförmig. Für die Bemessung sind zwei Lastfälle zu betrachten. Der Lastfall 1 betrifft die Montage. Dabei wirken die zwei aufgeblasenen, gezwängten Schläuche auf den Unterteil. Als Auflager dienen die zwei eingeklebten Gewindestangen (siehe Abbildung 141). Die Gewindestangen sind im 1m Abstand der Länge entlang angeordnet. Dadurch beträgt die Einflussbreite 1,0m. Die auftretenden Kräfte und Momente des Unterteils wurden mit einem Statikprogramm berechnet. Dabei wurden alle Werte mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_s = 1,35$ erhöht.

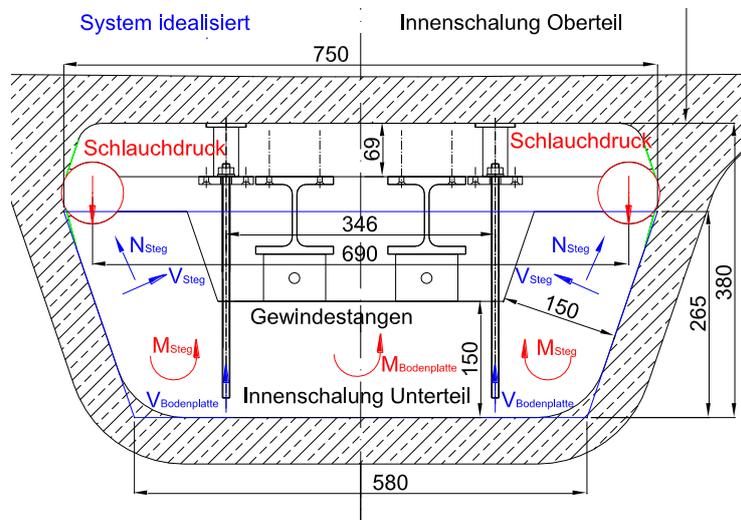


Abbildung 140: Bemessung Unterteil

Maßgebende Werte:

$$\begin{aligned}
 N_{d,\text{Steg}} &= -0,34 \text{ kN} \\
 V_{d,\text{Bodenplatte}} &= 0,35 \text{ kN} = \text{Schlauchdruck} & V_{d,\text{Steg}} &= 0,07 \text{ kN} \\
 M_{d,\text{Bodenplatte}} &= -0,06 \text{ kNm} & M_{d,\text{Steg}} &= -0,02 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Nachweise Steg:

Drucknachweis (Gl.24)

$$\frac{\frac{N_d}{A}}{f_{c,90,d} \times k_{c,90}} = \frac{0,34 \times 10^3}{1000 \times 150} = 0,002 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.24})$$

Schubnachweis (Rollschub) (Gl.25)

$$\frac{1,5 \times V_d}{A} = \frac{1,5 \times 0,07 \times 10^3}{1000 \times 150} = 0,005 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.25})$$

Biegnachweis (Querzug) (Gl.26):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{t,90,d}} = \frac{\frac{0,02 \times 10^6}{1000 \times 150^2}}{0,36} = 0,015 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.26})$$

Biegnachweis (Querdruck) (Gl.27):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{c,90,d}} = \frac{\frac{0,02 \times 10^6}{1000 \times 150^2}}{1,94} = 0,003 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.27})$$

Nachweise Bodenplatte:

Schubnachweis (Rollschub) (Gl.28)

$$\frac{1,5 \times V_d}{A} = \frac{1,5 \times 0,35 \times 10^3}{1000 \times 150} = 0,005 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.28})$$

Biegnachweis (Querzug) (Gl.29):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{t,90,d}} = \frac{\frac{0,02 \times 10^6}{1000 \times 150^2}}{0,36} = 0,044 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.29})$$

Biegnachweis (Querdruck) (Gl.30):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{c,90,d}} = \frac{\frac{0,06 \times 10^6}{1000 \times 150^2}}{\frac{6}{1,94}} = 0,008 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.30})$$

Der Lastfall 2 bezieht sich auf den Betondruck. Dabei wirken der horizontale Betondruck und der Auftrieb. Die Unterstützung des Schlauchdrucks wird vernachlässigt. Betrachtet werden die Biegemomente im Feld der Bodenplatte und an den Stegen. Als Auflager dienen die zwei angebrachten Maschinenfüße (siehe Abbildung 141). Diese sind im 1m Abstand der Länge entlang angeordnet. Dadurch beträgt die Einflussbreite, 1,0m Die dabei auftretenden Kräfte und Momente des Unterteils wurden mit einem Statikprogramm berechnet. Dabei wurden alle Werte mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_s = 1,35$ erhöht.

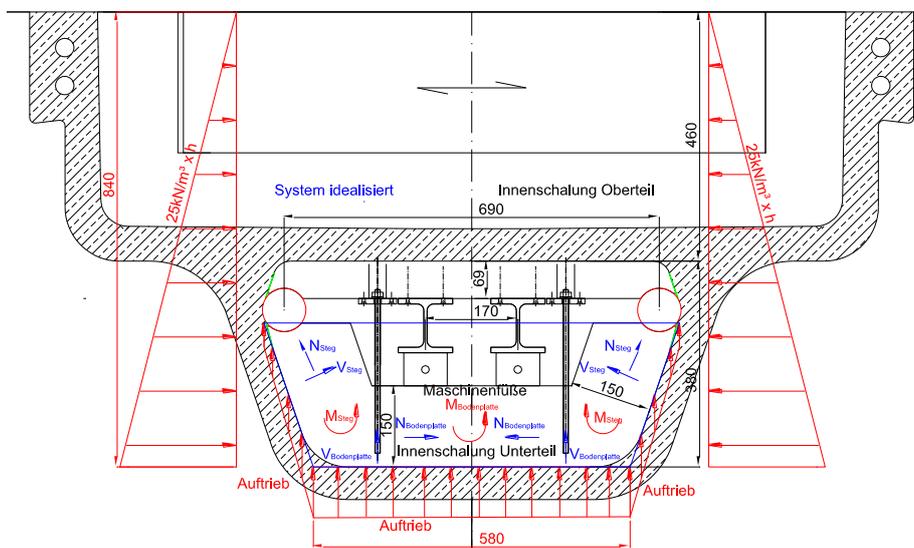


Abbildung 141: Bemessung Unterteil Betondruck

Maßgebende Werte:

$$N_{d,\text{Bodenplatte}} = -6,33 \text{ kN}$$

$$N_{d,\text{Steg}} = -0,84 \text{ kN}$$

$$V_{d,\text{Bodenplatte}} = -3,11 \text{ kN}$$

$$V_{d,\text{Steg}} = -6,28 \text{ kN}$$

$$M_{d,\text{Bodenplatte}} = -1,17 \text{ kNm}$$

$$M_{d,\text{Steg}} = 0,79 \text{ kNm}$$

Nachweise Steg:

Drucknachweis (Gl.31)

$$\frac{\frac{N_d}{A}}{f_{c,90,d} \times k_{c,90}} = \frac{\frac{0,84 \times 10^3}{1000 \times 150}}{1,94 \times 1,0} = 0,003 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.31})$$

Schubnachweis (Rollschub) (Gl.32)

$$\frac{1,5 \times V_d}{f_{rd}} = \frac{1,5 \times 6,28 \times 10^3}{0,72} = 0,087 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.32})$$

Biegnachweis (Querzug) (Gl.33):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{t,90,d}} = \frac{\frac{0,79 \times 10^6}{1000 \times 150^2}}{0,36} = 0,59 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.33})$$

Biegnachweis (Querdruck) (Gl.34):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{c,90,d}} = \frac{\frac{0,79 \times 10^6}{1000 \times 150^2}}{1,94} = 0,11 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.34})$$

Nachweise Bodenplatte:

Drucknachweis (Gl.35)

$$\frac{\frac{N_d}{A}}{f_{c,90,d} \times k_{c,90}} = \frac{\frac{6,33 \times 10^3}{1000 \times 150}}{1,94 \times 1,0} = 0,022 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.35})$$

Schubnachweis (Rollschub) (Gl.36)

$$\frac{\frac{1,5 \times V_d}{A}}{f_{rd}} = \frac{\frac{1,5 \times 3,11 \times 10^3}{1000 \times 150}}{0,72} = 0,043 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.36})$$

Biegnachweis (Querzug) (Gl.37):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{t,90,d}} = \frac{\frac{1,17 \times 10^6}{1000 \times 150^2}}{0,36} = 0,87 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.37})$$

Biegnachweis (Querdruck) (Gl.38):

$$\frac{\frac{M_d}{W}}{f_{c,90,d}} = \frac{\frac{1,17 \times 10^6}{1000 \times 150^2}}{1,94} = 0,168 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.38})$$

Oberteil:

Der Oberteil besteht aus einer BSH - Platte. Für die Bemessung werden die gleichen zwei Lastfälle betrachtet wie beim Unterteil. Beim Lastfall 1 wirken die zwei aufgeblasenen gezwängten Schläuche auf den Oberteil. Als Auflager dienen die zwei angebrachten Gewindestangen (siehe Abbildung 142). Diese sind im 1m Abstand der Länge entlang angeordnet. Dadurch beträgt die Einflussbreite 1,0m. Die auftretenden Kräfte und Momente des Oberteils wurden mit einem Statikprogramm berechnet. Dabei wurden alle Werte mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_s = 1,35$ erhöht.

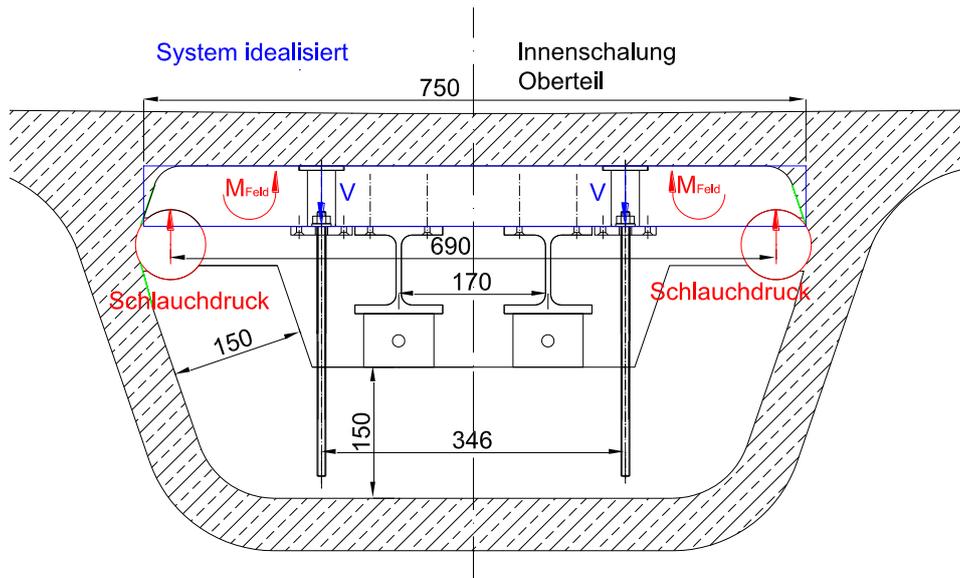
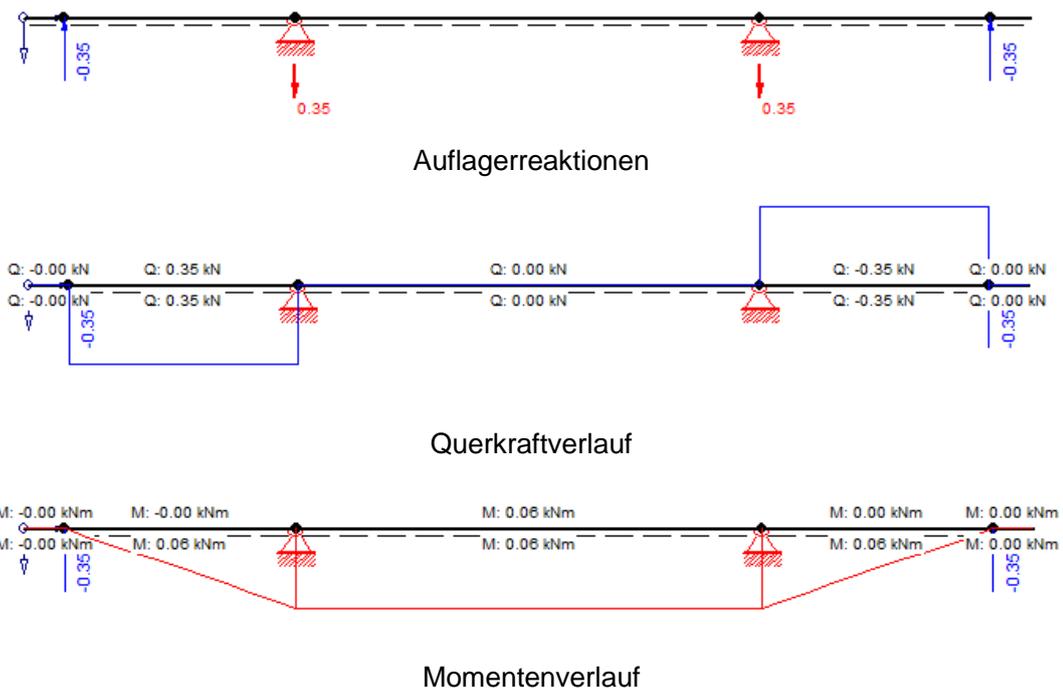


Abbildung 142: Bemessung Oberteil Schlauch

Dabei ergeben sich folgende Schnittkräfte



Maßgebende Werte:

$$V_d = -0,35 \text{ kN} = \text{Schlauchdruck}$$

$$M_{d,\text{Feld}} = -0,06 \text{ kNm}$$

Nachweise:

Schubnachweis (Rollschub) (Gl.39)

$$\frac{1,5 \times V_d}{A} = \frac{1,5 \times 0,35 \times 10^3}{1000 \times 69} = 0,01 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.39})$$

Biegnachweis (Querzug) (Gl.40):

$$\frac{M_d}{W} = \frac{0,06 \times 10^6}{1000 \times 69^2} = 0,21 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.41})$$

Biegnachweis (Querdruk) (Gl.42):

$$\frac{M_d}{W} = \frac{0,06 \times 10^6}{1000 \times 69^2} = 0,038 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.42})$$

Der Lastfall 2 bezieht sich auf den vertikalen Betondruck. Die Unterstützung des Schlauchdrucks wird mitberücksichtigt. Betrachtet werden dabei die Biegemomente im Feldbereich. Als Auflager dienen diesmal die zwei Schläuche und die HEB-Träger (siehe Abbildung 143). Die Einflussbreite beträgt 1,0m. Die auftretenden Kräfte und Momente Oberteils wurden mit einem Statikprogramm berechnet. Dabei wurden alle Werte mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_s = 1,35$ erhöht.

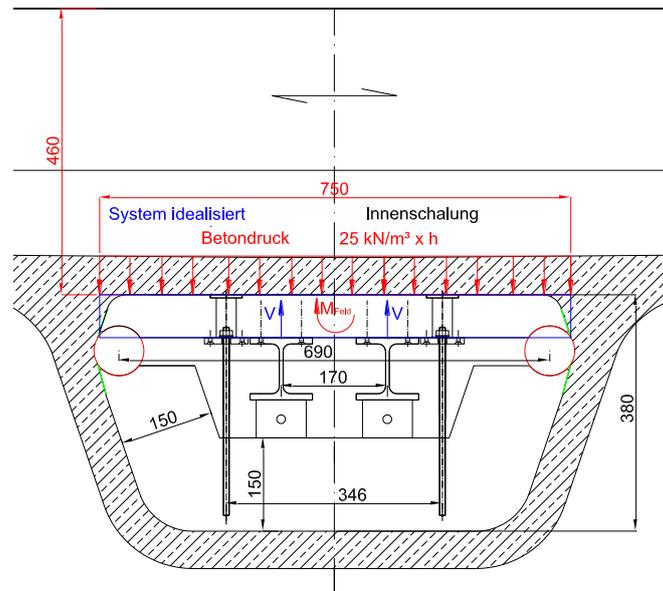


Abbildung 143: Bemessung Oberteil Betondruck

Dabei ergeben sich folgende Schnittkräfte (siehe Abbildung 144)

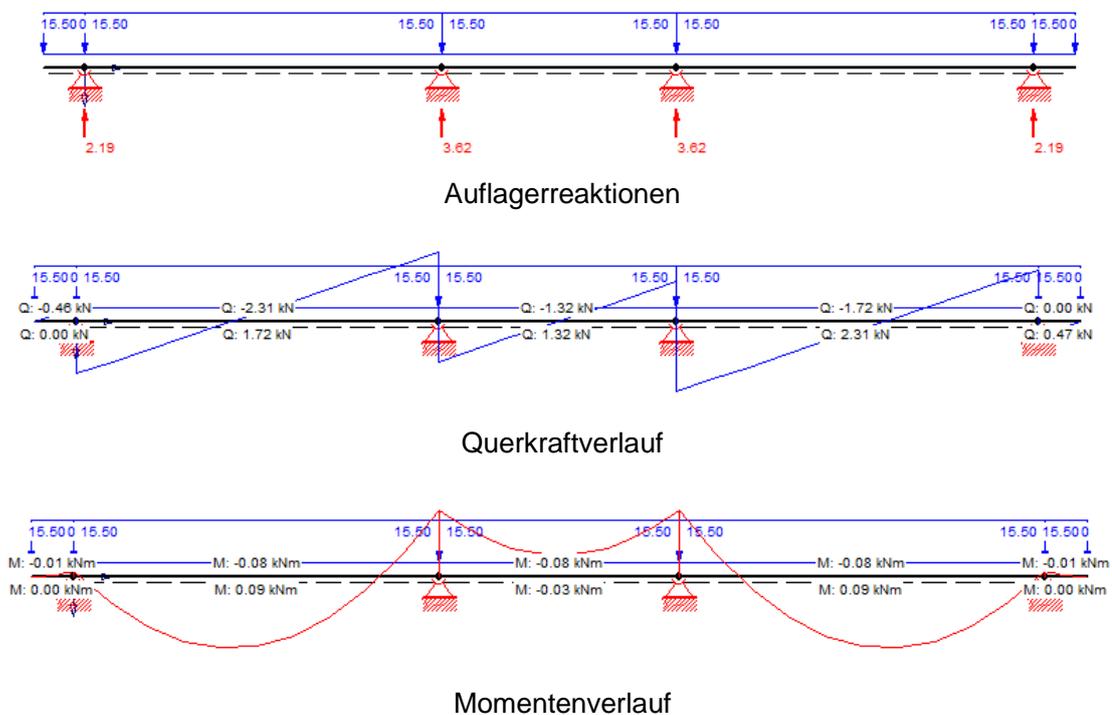


Abbildung 144: Schnittkraftverläufe

Maßgebende Werte:

$$N_d = 0 \text{ kN}$$

$$V_d = 2,31 \text{ kN}$$

$$M_{d,\text{Feld}} = -0,09 \text{ kNm}$$

Die Auflagerkraft von 2,31 kN wird durch das Hineindrücken (Zwängen) des Schlauches aktiviert.

Nachweise:

Schubnachweis (Rollschub) (Gl.43)

$$\frac{1,5 \times V_d}{A} = \frac{1,5 \times 2,31 \times 10^3}{1000 \times 69} = 0,07 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.43})$$
$$\frac{M_d}{f_{rd}} = \frac{0,09 \times 10^6}{0,72} = 0,07 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt}$$

Biegnachweis (Querzug) (Gl.44):

$$\frac{M_d}{W} = \frac{0,09 \times 10^6}{1000 \times 69^2} = 0,31 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.44})$$
$$\frac{M_d}{f_{t,90,d}} = \frac{0,09 \times 10^6}{0,36} = 0,31 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt}$$

Biegnachweis (Querdruck) (Gl.45):

$$\frac{M_d}{W} = \frac{0,09 \times 10^6}{1000 \times 69^2} = 0,05 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt} \quad (\text{Gl.45})$$
$$\frac{M_d}{f_{c,90,d}} = \frac{0,09 \times 10^6}{1,94} = 0,05 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt}$$

5.2.10 Zusammenbau/Gesamtmontage

Nach dem herstellen, schleifen und beschichten aller Schalungsteile, wird der Zusammenbau folgend ablaufen. Davor werden die Schalungsteile mit einem Trennmittel versehen.

Zuerst werden die zwei Außenschalungsteile mit vier Gewindestangen $\varnothing 16\text{mm}$ verspannt und auf den Betonierplatz positioniert. Anschließend werden die Abstandhalter für die Innenschalung auf die Außenschalung angeschraubt (siehe Abbildung 145).



Verspannung



Abstandhalter

Abbildung 145: Außenschalung

Als Nächstes wird das Innenschalungssystem zusammengebaut. Dabei werden zuerst die zwei Innenschalungsteile (Ober-, und Unterteil) zusammengesetzt. Am Oberteil werden die Bohrungen für die später durchgehenden Gewindestangen gebohrt, die Stahlplatten, zwei HEB-Träger und die Abstandhalter für die Konterschalung montiert (siehe Abbildung 146).



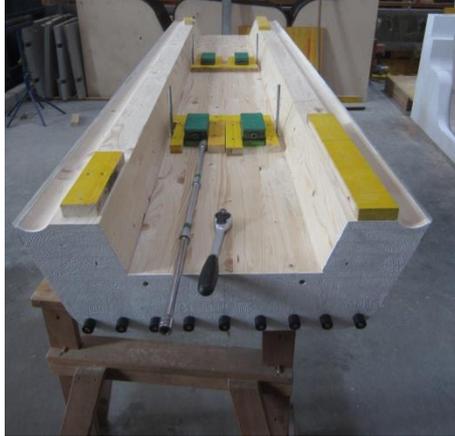
HEB Träger befestigen



Abstandhalter

Abbildung 146: Innenschalung Unterteil

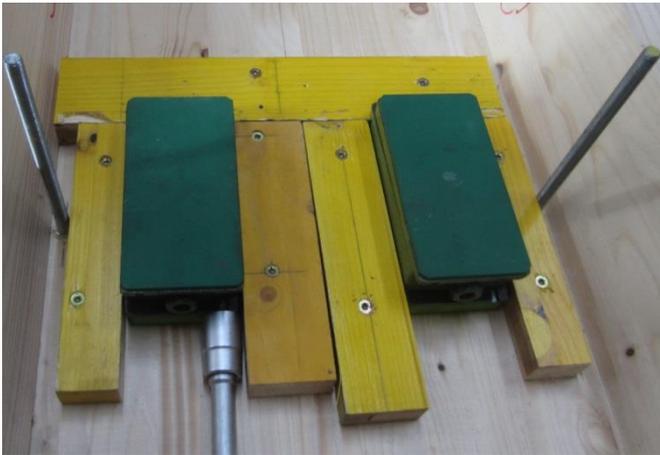
An dem Unterteil der Innenschalung werden zuerst die Gewindestangen eingeklebt. Anschließend werden die Maschinenfüße angebracht. An der Stirnseite der Endrippe, werden für die Hüllrohre Montagestopfel angeschraubt (siehe Abbildung 147).



Stirnseite Endrippe



Zweite Stirnseite



Maschinenfüße



Montagestopfel, Hüllrohr

Abbildung 147: Innenschalung Unterteil

Bei der anschließenden Gesamtmontage der beiden Teile wird genau auf die Positionierung geachtet. Die Maschinenfüße werden ausgefahren bis mit den Stahlträgern die gewünschte Position (Höhe des Hohlkastens) erreicht wird. Daraufhin werden die Gewindestangen mit den Stahlplatten und dem Oberteil über die Bohrungen durch selbstsichernde Muttern verschraubt (siehe Abbildung 148).



Maschinenfüße ausgefahren



Verschraubung Oberteil



Innenschalung gesamt

Abbildung 148: Innenschalung Montage

Nun kommt an die Stirnseite der zweiteiligen Innenschalung eine die Stirnschalungsplatte montiert, an der eine Ausnehmung für die Stahlprofilträger ausgeschnitten und für die Hüllrohre Montagestopfel angeschraubt wurden. An der zweiten Stirnseite (Endrippe) wird die Abdeckplatte montiert. Über Stifte und vorgesehene Bohrungen werden der Ober-, und Unterteil der Innenschalung in die gewünschte Position gebracht (siehe Abbildung 149).



Stirnschalung

Abdeckplatte

Abbildung 149: Stirnseiten der Innenschalung

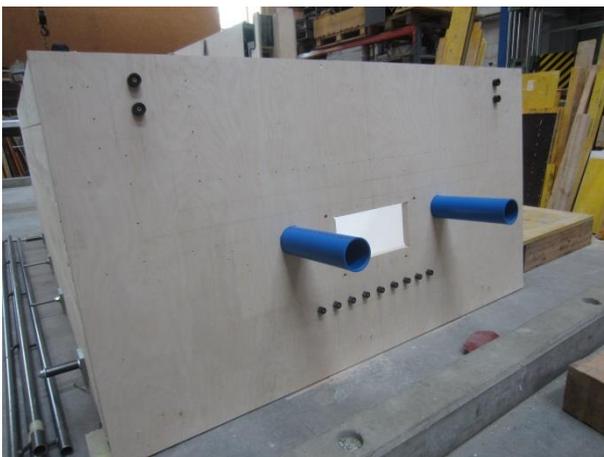
Nun wird der Stoppel über Stifte an die Abdeckplatte positioniert und mit der Schalung verschraubt. Anschließend werden die Hüllrohre und die zweite Stirnschalung, die ebenfalls die notwendigen Ausnehmungen und Montagestopfel besitzt montiert. Danach werden die Schläuche eingefädelt, verschlossen und aufgeblasen (siehe Abbildung 152).



Stoppel vor dem Verschrauben



Stoppel Zentrierstifte



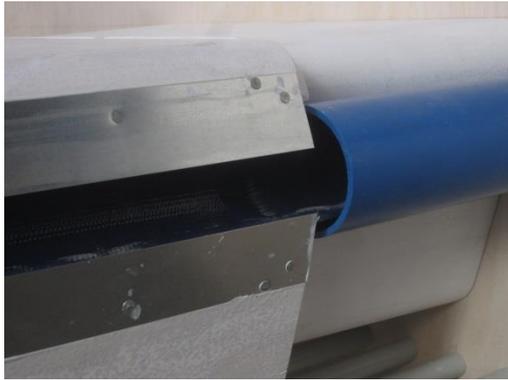
Stirnschalung der Endrippe (Montagestopfel und Hüllrohre)



Schläuche eingefädelt

Abbildung 150: Stoppel und zweite Stirnseite

Nachdem Aufblasen der Schläuche werden sämtliche Bereiche (siehe Abbildung 151), bei denen Beton in den Hohlraum eindringen oder aus der Stirnschalung ausdringen könnte, kontrolliert ob diese von den Schläuchen vollständig abgedeckt werden. Es wird ebenfalls der Bereich, bei dem sich eine Betonkante bilden und so zu Ausschalungsproblemen führen könnte, zwischen den Blechen und den Schläuchen kontrolliert. Sämtliche angeführte Problem trafen nicht ein.



Bereich Blech, Abdeckplatte, Hüllrohr ohne Schlauch



Bereich Blech, Abdeckplatte, Hüllrohr mit Schlauch



Bereich Blech, Abdeckplatte, Hüllrohr mit aufgeblasenen Schlauch



Bereich Stirnschalung Ausnehmung

Abbildung 151: Schlauchabdeckung

Zu guter Letzt werden noch die Fugen nachbearbeitet und mit Silikon aufgefüllt bzw. abgedichtet. Die Bleche werden mit Klebeband abgeklebt, damit diese später beim Ausschalen nicht hängen bleiben. Danach wird das ganze System auf die Außenschalung gehoben, ausgerichtet und die Stirnschalungen werden mit der Außenschalung verschraubt (siehe Abbildung 152).



Gesamte Innenschalung



eingehoben

Abbildung 152: Innenschalungssystem

Für die spätere Befüllung der Schalung mit dem dafür extra hergestellten Betontrog, wird ein L-Profil als Kippleiste an die Außenschalung angebracht. Des Weiteren werden noch Bleche, als Rinne für den Fließbeton an das Stahlprofil und der Außenschalung angeschraubt (siehe Abbildung 153).



L-Profil und Bleche



Befüllvorgang Test



Abbildung 153: Befüllungssystem

Die Konterschaltung wird nun noch in die Außenschalung eingehoben, positioniert und mit den Stirnschalungen verschraubt. Zum Schluss wird die ganze Schalung an der Stirnseite mittel Trägern und Ankerstäben verspannt (siehe Abbildung 154).



Einbau der Konterschaltung



fertige Gesamtschalung

Abbildung 154: Letzte Montageschritte

5.3 Betonage

Die Betonage erfolgte am 20.04.2016 und ist folgend vonstatten gegangen:

- Start des Betonmischens um 12:15 Uhr (siehe Betonierprotokoll)
- Von 12:15 bis 14:15 Uhr wurde die Betonmischung durchgeführt und in den Trog gegeben. Für spätere Prüfung der Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit E-Modul, Biegezug, Spaltzug) wurden jeweils sechs Würfel und Zylinder und jeweils 2 Platten betoniert. Aus jeder Mischung wurden Frischbetonproben entnommen. Genauere Angaben zum Mischablauf können dem Betonierprotokoll entnommen werden.
- Der Trog wurde über der Schalung positioniert und der Füllprozess begann (siehe Kapitelanfang). Die Befüllung der Schalung dauerte ca. 15 Minuten.



Positionierung des Betontrogs

Befüllung der Schalung

Abbildung 155: Betonage des Versuchsträgers

Die detaillierten Angaben zu Betonzusammensetzung, Betonmenge, Mischprozess und Frischbetonkennwerte sind dem Anhang A.6 zu entnehmen.

Die Zusammensetzung der Materialien und der Ablauf des Mischprozesses sind von Baumeister Dipl.-Ing. Philipp Hadl, BSc erstellt worden

5.4 Ausschalen

Als aller Erstes wurde die Luft aus den Schläuchen gelassen und diese herausgezogen. Anschließend wurden die Stirnschalungen abmontiert. Wie man an den beiden Bildern erkennen kann (siehe Abbildung 156), drang kein Beton zwischen Blechkante und Schlauch. Somit sollte das Zusammenfahren der beiden Hälften zu keinem Problem werden.



Linke Seite vorne

Rechte Seite vorne

Abbildung 156: entfernen der Schlauch

Anschließend wurde die Konterschalung herausgehoben. Dies führte Anfangs zu Problemen, da sie aufgrund der zu geringen Neigung der Stege feststeckte. Nach mehrmaligen Schlägen kam die Konterschalung frei und konnte weggehoben werden.

Mittels einer Jochkonstruktion und an den Stoppel befestigten Gewindestangen, (siehe Abbildung 157) sollte der Stoppel gezogen werden. Jedoch löste sich dieser erst nach mehrmaligen Schlägen auf der anderen Seite durch den Hohlkasten.

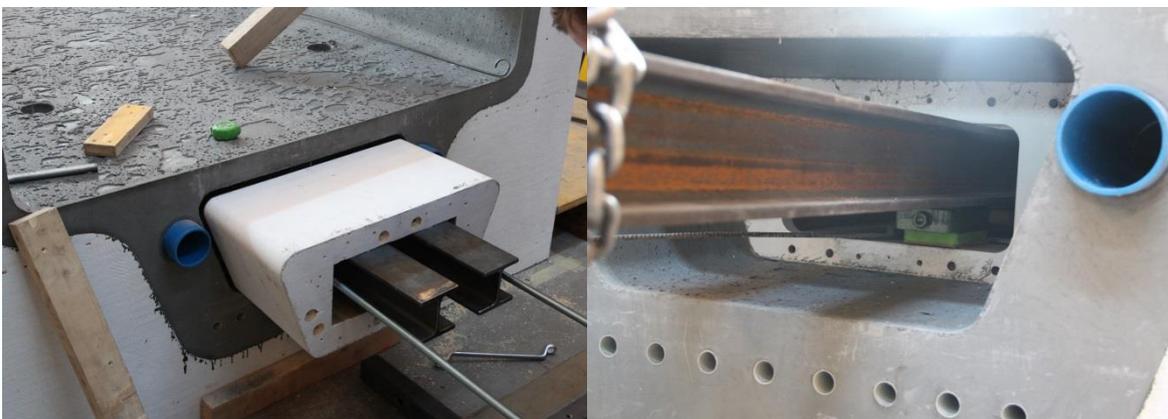
Nach dem Ziehen der Zentrierstifte zwischen Abdeckplatte und Innenschalung, wurden die Maschinenfüße runtergefahren. Dabei löste sich vorab der obere Teil der Innenschalung und fuhr ebenfalls runter, was nicht erwartet wurde. Somit konnte auf die Methode, den oberen Teil hinunterzudrücken, falls dieser feststecken sollte, verzichtet werden und es zeigt sich, dass die Beschichtung ideal für Schalungen geeignet ist.

Nun musste der obere Teil wieder angehoben werden, damit anschließend die Maschinenfüße rausgezogen werden konnten.



Herausheben der Konterschaltung

Jochkonstruktion zum Stoppelziehen

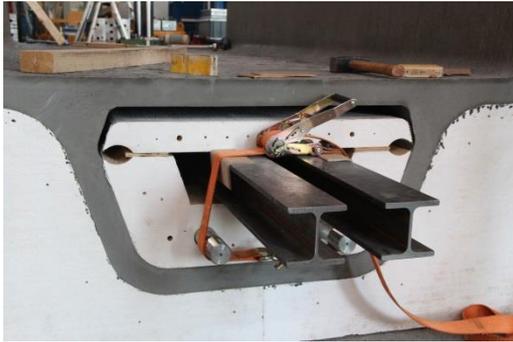


Stoppel rausschlagen

Maschinenfüße rausziehen

Abbildung 157: Ausschalen Teil 1

Beim Rausziehen der Innenschalung wurde folgend vorgegangen: Zuerst wurden die Verschraubungen der Abstandhalter, die auf dem Oberteil der Schalung angebracht waren, gelöst. Anschließend wurden an der Seite der zweiteiligen Innenschalung, zwei Bolzen in die dafür vorgesehenen Bohrungen angebracht. Diese wurden dann mittels eines Gurtes mit den Trägern verspannt. So sind Ober- und Unterteil der Schalung miteinander verbunden. An der Endrippenseite wurde dies anders gelöst. Hier wurde eine Platte zwischen die Träger gelegt, die dann mit dem Unterteil verschraubt wurde. Nun konnte der Kran an den Trägerenden die Innenschalung so hochheben, dass ein Rundumspalt entstand. Jetzt wurde die Schalung ein Stückweit herausgezogen, bis am Ende (der Endrippe) eine Schwerlastrolle zwischen Bodenplatte des Fahrbahnträgers und Stahlprofilen positioniert werden konnte. Dabei wurde die Abdeckplatte im Hohlkasten losgeschlagen. An der Seite zweiteiligen Innenschalung wurden nun die Träger mit einem Hubwagen angehoben. Mithilfe des Hubwagens und der Schwerlastrolle konnte die Innenschalung mit der Abdeckplatte vollständig aus dem Hohlkasten herausgezogen werden (siehe Abbildung 158).



Zusammenspannen von Ober- und Unterteil



Verschraubung Seite Endrippe



Anheben mit Kran (Rundumspalt)



Herausziehen mit Kran (zum Teil)



Schwerlastrolle



Anheben, herausziehen mit Hubwagen



Vollständiges Herausziehen

Abbildung 158: Ausschalen Teil 2

Zum Schluss wurden noch die Abstandhalter im Hohlkasten gelöst und der Fahrbahnträger konnte über die Kugelkopfancker aus der Außenschalung rausgehoben werden (siehe Abbildung 159.)



Lösen der Abstandhalter



Anheben des Fahrbahnträgers



Fertig ausgeschalter Träger

Abbildung 159: Ausschalen Teil 3

5.4.1 Oberfläche

Hier soll nur kurz die Auswirkung des Trennmittelauftrags auf die Schalung und der Betonoberfläche wiedergegeben werden. In der Abbildung 166 ist anhand der Außenschalung ist zu erkennen, dass auf der linken Seite große Rückstände der Betonage zu sehen sind auf der rechten nicht so viel. Das liegt daran, dass auf der rechten Seite das Schalungswachs dünn aufgetragen wurde auf der linken jedoch satt und dick. Auf der Oberfläche des Fahrbahnträgers ist jedoch kein Unterschied zu erkennen.



Außenschalung



Fahrbahnträger

Abbildung 160: Oberfläche

5.5 Fazit

Das Konzept eine Schalung aus Vollmaterial herzustellen ist realisierbar und kann genauso im Maßstab 1:1 angewendet werden. Durch eine geeignete Beschichtung lässt sich die Schalung mehrmals verwenden ohne sie nachbehandeln zu müssen.

Auch das Konzept der zweiteiligen Innenschalung lässt sich relativ leicht realisieren und kann ebenfalls für eine 1:1 Fahrbahnträger angewendet werden. Es ist jedoch eine Variante zu entwickeln, mit der man die das Abheben des Oberteils der Innenschalung (Zugkräfte) und den Betondruck entgegenwirkt und mit der man auch das Ein-, und Ausfahren der Schalungsteile steuert (hydraulische oder pneumatische Zylinder). Auch beim Ausschalen sollte das spätere Herausziehen nochmals überdacht werden. Es muss darauf geachtet werden, dass genügend Platz für etwaige Hilfsmittel vorhanden ist

Die Befüllung muss über die Ganze länge gleichmäßig stattfinden, damit es zu einem erfolgreichen Ergebnis der Betonage führt.

Das Schalungssystem ist funktionstauglich. Lediglich über die Wahl des Materials sollte nachgedacht werden. Beispielsweise könnten manche Bereiche mit BSP-Holz wesentlich, widerstandsfähiger und somit schlanker konstruiert werden. Oder generell andere Materialien (Kunststoff, Stahl) in Erwägung ziehen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Als Einstieg in das Thema der Arbeit wird zuerst das Forschungsprojekt QUICKWAY allgemein erklärt. Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit dem Teilgebiet der Fertigung der Fahrbahnträger aus diesem Projekt.

Zum besseren Verständnis und als theoretische Grundlage werden Einblicke zu den Themen UHPC (Ultra High Performance Concrete), Schalungsbau allgemein, Brückenbau und speziell dem Brückenbau aus UHPC wiedergeben und anhand aktueller Literatur und ausgeführten Bauwerken näher erläutert.

Anhand eines erarbeiteten Fertigungskonzeptes, für einen geraden oder gegebenenfalls gekrümmten Fahrbahnträger, dessen Länge bis zu 12,50m betragen kann, werden in dieser Diplomarbeit gewisse Bereiche genauere betrachtet.

Dazu wurde zu allererst eine Test- Schalung für einen 0,5m langen Fahrbahnträger im Maßstab 1:1 konstruiert und gebaut. Diese ist nach einem einfachen Prinzip aus Spanten und Beplankung aufgebaut und soll zeigen, dass diese Schalungsmethode auch für längere Fahrbahnträger geeignet ist. An dieser Schalung wurde eine geeignete Befüllmethode mittels zwei Betonversuchen erarbeitet, die es ermöglicht den gesamten Fahrbahnträger herzustellen, ohne das sich dabei Lufteinschlüsse bilden. Des Weiteren wurde mittels einer induktiven Messmethode (FibreScan) die Faserverteilung und Faserorientierung am hergestellten Fahrbahnträger ermittelt. Die Messungen ergaben, dass sich die Faserorientierung wie erwartet parallel zur Querschnittskontur einstellen. Bei der Faserverteilung zeigt sich ein leichtes aber akzeptables Absetzen der Fasern über die Querschnittshöhe. Auch ein Unterschied zwischen Einfüllseite und Austrittsseite ist zu erkennen. An der Austrittsseite ist ein höherer Fasergehalt als an der Eintrittsseite, dieser Unterschied jedoch ist minimal und in einem annehmbaren Bereich.

Vor dem zweiten Befüllversuch wurde eine kleine Modifikation am Querschnitt vorgenommen. Dabei handelt es sich um die Anbindung einer horizontalen Spanngliedumlenkung in einem Kurvenquerschnitt. Diese Umlenkung soll kontinuierlich über Umlenkkonsolen, die als „Sägezähne“ an der Bodenplatte ausgebildet sind, erfolgen. Bei der Betonage kam es zu keiner Beeinträchtigung des Fließverhaltens durch die Umlenkkonsolen.

Als nächstes wurde ein Versuchsträger im Maßstab 1:2, der später in einem Großversuch getestet wird, gefertigt. Dazu wurde eine Vollholzschalung mit einer speziellen Beschichtung versehen ist entwickelt. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Herstellung des Hohlkastens gelegt, da der Fahrbahnträger eine Endrippe aufweist. Dazu wurde ein Innenschalungssystem, welches aus drei Komponenten bestehend entwickelt. Die Hauptkomponente dieses System ist die zweiteilige Innenschalung. Diese lässt sich händisch ausfahren und die entstehende „Lücken“ zwischen den zwei Teilen (Ober- und Unterteil) wird mittels zweier aufgeblasener Schläuche so geschlossen, dass kein Beton eindringen kann. Beim Ausschalen lässt man die Luft aus den Schläuchen, zieht diese raus, fährt die Schalungsteile wieder zusammen und zieht sie gemeinsam aus dem Hohlkasten raus. Da die Endrippe mittels dieser Schalung alleine nicht herstellbar war, wurden zwei zusätzlich Komponenten (Abdeckplatte und Stoppel) hergestellt womit diese

realisiert werden konnte. Diese Komponenten sind zwei einfache, der Endrippenkontur entsprechend konisch hergestellten Schalungsteile aus Vollholz. Beim Ausschalen wurden diese einfach rausgeschlagen. Die Betonage erfolgte mittels eines hergestellten Betontroges der dieselbe Länge aufweist wie die Schalung. Somit konnte ein gleichmäßiger Betonfluss über die ganze Trägerlänge gewährleistet werden.

6.2 Ausblick

Diese Arbeit beinhaltet Anhaltspunkte und Erkenntnisse, welche für die Herstellung eines 12,50m langen QUICKWAY – Fahrbahnträger nützlich sind. Die Schalungsvariante aus Spanten und Beplankungen kann für die 2m langen Segmente angewendet werden. Genauso auch die Vollholzschalung. Jedoch ist hier der Kostenfaktor zu beachten. Das Innenschalungssystem kann ebenfalls für eine 1:1 Fahrbahnträger angewendet werden. Es ist jedoch eine Variante zu entwickeln, mit der man die das Abheben des Oberteils der Innenschalung (Zugkräfte) und den Betondruck entgegenwirkt und mit der man auch das Ein-, und Ausfahren der Schalungsteile steuert (hydraulische oder pneumatische Zylinder). Auch beim Ausschalen sollte das spätere Herausziehen nochmals überdacht werden. Es muss darauf geachtet werden, dass genügend Platz für etwaige Hilfsmittel vorhanden ist.

Die Befüllung muss über die Ganze länge gleichmäßig stattfinden, damit es zu einem erfolgreichen Ergebnis der Betonage führt.

Das Schalungssystem ist funktionstauglich. Lediglich über die Wahl des Materials sollte nachgedacht werden. Beispielsweise könnten manche Bereiche mit BSP-Holz wesentlich, widerstandsfähiger und somit schlanker konstruiert werden. Oder generell andere Materialien (Kunststoff, Stahl) in Erwägung ziehen.

Mit dem hergestellten Versuchsträger können nun die Außenschalung und die Konterschalung aus Beton hergestellt werden, indem man diesen als Schalung verwendet. Mit diesen Schalungen und der schon vorhandenen Innenschalung kann daraufhin der zweite Versuchsträger, der für den Großversuch benötigt wird gefertigt werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] L. Sparowitz, B. Freytag und V. T. Ngyen, „QUICKWAY - SMART TRAFFIC FOR SMART CITIES,“ in *in 38th Conferenze on Our World in Concrete & Structures*, pp. 49 - 60 , Singapore, 2013.
- [2] L. Sparowitz, B. Freytag und V. T. Nguyen, „QUICKWAY - Hochfahrwege aus UHPC,“ in *Beton- und Stahlbetonbau, Sonderheft Werkstoffe & Konstruktion*, Berlin, Ernst & Sohn, 2013, pp. 41-48.
- [3] F. Toutlemonde und M. Delort, „The newly enforced French Standard for UHPFRC specification, performance, production and conformity,“ in *Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*, Kassel, Universität Kassel, März 9-11, 2016, pp. 127-137.
- [4] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher und S. Fröhlich, „Ultrahochfester Beton UHPC,“ in *Betonkalender 2013*, Kassel, Ernsts & Sohn, 2013, pp. 119-239.
- [5] M. M. Reichel, *Dünnwandige Segmentfertigteildeckbauweisen im Brückenbau aus gefaserten Ultrahochleistungsbeton (UHFB) - tragverhalten, Bemessung und Konstruktion*, Graz, 2010.
- [6] O. Fischer, T. Lechner, M. Mensinger, J. Ndogmo, G. Seidl und M. Stambuk, *Entwicklung dünnwandiger flächenhafter Konstruktionselemente aus UHPC und geeigneter Verbindungstechniken zum Einsatz im Hoch- und Industriebau*, München: Fraubhofer IRB Verlag, 2014.
- [7] G. Heinzle, B. Freytag, J. Linder und L. Sparowitz, „Schubtragfähigkeit dünnwandiger Träger aus stahlfasrbewehrtem UHPC,“ *Bauingenieur*, Band 87. Heft 4. 2012. S. 182 - 193.
- [8] M. Escobar, B. Freytag, J. Linder und L. Sparowitz, „Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Beulen von dünnen Scheiben aus UHPFRC unter Druckbeanspruchung,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Band 107. Heft 1. 2012. S. 2-14.
- [9] Ö. Normungsinstitut, „ÖNORM EN 12350-1-12: Prüfung von Frischbeton - Teil1 -12,“ Wien, 2009.
- [10] Ö. Normungsinstitut, „ÖNORM EN 12350-6: Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte,“ Wien, 2009.
- [11] Ö. Normungsinstitut, „ÖNORM EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren,“ Wien, 2009.

- [12] A. Brunnsteiner, M. Lenz, J. Prabitz und J. Tritthart, „Baustofflehre GL Laborübung,“ TU Graz, 2010.
- [13] Ö. Normungsinstitut, „ÖNORM EN 12350-8: Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzflieversuch,“ Wien, 2009.
- [14] D. R. Wingenfeld, „Fügetechnische Konstruktionslösungen für Bauteile aus ultrahochfesten Beton (UHPC),“ TU München, 2013.
- [15] B. Freytag und G. Santner, „Bemessung von Bauteilen aus faserbewehrtem UHPC - Zug, Druck, Biegung-,“ in *Nachhaltiges Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion*, Graz, Technische Universität Graz, 2. Grazer Betonkolloquium 2014, pp. 73-86.
- [16] T. Leutbecher, „Rissbildung und Zugtragverhalten von im Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC),“ in *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 9*, Kassel, kassel university press GmbH,, 2008.
- [17] C. Breyer, „Faserverteilung im ultrahochfesten Beton,“ Technische Universität Graz, Graz, 2008.
- [18] M. Reichel, L. Sparowitz und B. Freytag, „Wildbrücke Völkermarkt - vorgespanntes Bogentragwerk aus UHFB-Segmentfertigteilen,“ in *Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 12*, Berlin, Ernst & Sohn, S. 827 - 835, 2011.
- [19] M. Lüftenegger, „Ermittlung der Stahlfaserorientierung an scheibenartigen Bauteilen aus ltrahochfeste Beton und Erfassen des Einflusses unterschiedlicher Herstellungsmethoden,“ Technischer Universität Graz, Graz, 2007.
- [20] B. Freytag, G. Heinzle und G. Santner, „FibreScan,“ Technische Universität Graz, Graz, 2013.
- [21] K. C. Thienel und A. Kustermann, „Sonderbetone,“ Universität München, Institut für Werkstoffkunde des Bauwesens, 2011.
- [22] M. Schmidt, „Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton,“ *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 561, 2007.
- [23] J. C. Scheydt, G. Herold und H. S. Müller, „Ultrahochfester Beton,“ 3. *Symposium Baustoffe und BAUwerkserhaltung*, 2006.
- [24] B. Freytag und S. Lutz, „UHPC im Brückenbau - Anwendungsbeispiele,“ in *Die Vielseitigkeit eines Baustoffes*, Graz, TU Graz, 1. Grazer Betonkolloquim 2012, pp. 31-47.
- [25] C. Hofstadler, *Scholarbeiten*, Graz: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

- [26] G. Mehlhorn, Handbuch Brücken Entwerfen, Konstruieren Berechnen, Bauen und Erhalten, Berlin: Springer Verlag, 2010.
- [27] H. J. Bargel und G. Schulze, Werkstoffkunde, 10. bearbeitete Auflage, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [28] faigle Kunststoffe GmbH, „<http://www.faigle.com/de>,“ faigle, [Online]. Available: <http://www.faigle.com/de/produkte-loesungen/downloads-agb-broschueren/techn-broschueren/kunststoff-daten-werte/>. [Zugriff am 15 09 2015].
- [29] Evonik Performance Materials GmbH, „<http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/Pages/default.aspx>,“ [Online]. Available: <http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/Documents/Verarbeitungsrichtlinien/311-5-Tipps-zur-Verarbeitung-von-PLEXIGLAS-de.pdf>. [Zugriff am 12 09 2015].
- [30] Evonik Performance Materials GmbH, „<http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/Pages/default.aspx>,“ [Online]. Available: <http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/Documents/PLEXIGLAS/211-1-PLEXIGLAS-GS-XT-de.pdf>. [Zugriff am 12 09 2015].
- [31] MOTIP DUPLI GmbH, „<http://www.motipdupli.com/en/home.html>,“ [Online]. Available: <http://www.motipdupli.com/de/produkte/presto/spachtelprodukte/ipg-1098/tm-1098.html>. [Zugriff am 07 11 2015].
- [32] BASF Performance Products GmbH, „<http://www.master-builders-solutions.basf.at/de-at>,“ [Online]. Available: <http://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20%28Austria%29/basf-masterfinish-fw-323-tds.pdf>. [Zugriff am 05 11 2015].
- [33] Emil Frei GmbH & Co. KG, „<http://www.freilacke.de>,“ [Online]. Available: <http://www.freilacke.de/service/download/technische-datenblaetter/>.
- [34] Emil Frei GmbH & Co. KG, „<http://www.freilacke.de>,“ [Online]. Available: <http://www.freilacke.de/service/download/sicherheitsdatenblaetter/>.
- [35] Emil Frei GmbH & Co. KG, „<http://www.freilacke.de>,“ [Online]. Available: <http://www.freilacke.de/service/download/sicherheitsdatenblaetter/>.
- [36] Kellner & Kunz AG, „<http://www.reca.co.at/>,“ 0896 710 300 arecal PFTE-Schmierspray 300ML.pdf. [Online]. Available: <http://www.reca.co.at/de/downloads/datenblaetter/techn-datenblaetter-chemie.html>. [Zugriff am 19 02 2016].
- [37] Rhein-Chemotechnik GmbH, „<http://www.rhein-chemotechnik.com/de/start.html>,“ [Online]. Available: <http://www.rhein-chemotechnik.com/de/produkte/betontrennmittel.html>. [Zugriff am 22 02 2016].

- [38] Rhein-Chemotechnik GmbH, „<http://www.rhein-chemotechnik.com/de/start.html>,“
[Online]. Available: <http://www.rhein-chemotechnik.com/de/produkte/betontrennmittel.html>. [Zugriff am 22 02 2016].

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: geplante Anordnung eines QUICKWAYS [1].....	2
Abbildung 2: Prinzip der Überdachung mit Photovoltaik und Regenwasserableitung [1].....	3
Abbildung 3: Standard QUICKNET–Masche mit Fahrspuren auf den Levels 0, 1 und 2 [1].....	4
Abbildung 4: Bushaltestelle [1].....	5
Abbildung 5: Die Fahrwege kreuzen einander auf unterschiedlicher Höhe [1].....	5
Abbildung 6: Teile des Gesamtsystems [1].....	6
Abbildung 7: Standardquerschnitt.....	7
Abbildung 8: Fahrwegträger auf von den Stützen ausragenden Querriegeln aufliegend [2].....	8
Abbildung 9: Zwei Felder einer Baustelle.....	9
Abbildung 10: Qualitativer Vergleich von σ - ϵ Beziehungen unter Druck mit steigender Festigkeit [5].....	12
Abbildung 11: Intensivmischer.....	13
Abbildung 12: Luftporentopf [12].....	14
Abbildung 13: Anheben des Trichters.....	15
Abbildung 14: Messung des Ausbreitmaßes.....	15
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Linien von normalfestem und hochfestem Beton sowie von UHPC mit und ohne Fasern [5].....	16
Abbildung 16: Einordnung des UHFB bezüglich Druckfestigkeit und E-Modul [5].....	16
Abbildung 17: Dreidimensionale, zweidimensionale und eindimensionale Faserorientierung [17].....	18
Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Faserorientierung mit linearem Ansatz im2D- Raum [15].....	19
Abbildung 19: Hauptorientierungsbeiwerte für sehr dünne Bauteile [15].....	19
Abbildung 20: Fibre Scan Komponenten.....	20
Abbildung 21: Magnetfeld [20].....	21
Abbildung 22: Berücksichtigung der Fließrichtung und des 3D-Raums [20].....	23
Abbildung 23: links obenliegendes Verlegegerüst, rechts untenliegendes Verlegegerüst [26].....	30
Abbildung 24: Pont de la Chabotte (Segment) [24].....	31
Abbildung 25: Match-Cast-Verfahren (vertikal) [24].....	32
Abbildung 26: Segmente der WILD-Brücke [24].....	33
Abbildung 27: Befüllung WILD-Brücke [18].....	33
Abbildung 28: Zusammenbau der WILD-Brücke [24].....	34
Abbildung 29: Einklappen der zwei Bogenhälften [24].....	34
Abbildung 30: Flughafenbrücke am Tokyo Airport [24].....	35
Abbildung 31: Fahrbahnträger.....	37
Abbildung 32: Herstellung der Außenschalung.....	39
Abbildung 33: Innenschalung Varianten zur Spaltlösung.....	40
Abbildung 34: Fahrbahnträgerschalung komplett.....	42
Abbildung 35: Füllprozess.....	43

Abbildung 36: Temporäre Abschalung	44
Abbildung 37: Ausschalen	45
Abbildung 38: Schalung für Befüllversuch	47
Abbildung 39: Farbindikatoren	48
Abbildung 40: Laschenstoß	49
Abbildung 41: Deckel	49
Abbildung 42: Schalungsteile mit Beplankung	50
Abbildung 43: Abdichtung Kederprofil	50
Abbildung 44: Stirnschalung mit Acrylglasplatte	50
Abbildung 45: Stirnschalung mit Schaltafeln	50
Abbildung 46: Fräsroboter	53
Abbildung 47: Querschott (Innenschalung)	53
Abbildung 48: Beplankung mit Blech und Schalungsplatten (Innenschalung)	53
Abbildung 49: Spanten mit Querschotten verschraubt (Konterschalung)	54
Abbildung 50: Spanten mit Querschotten gesamt (Konterschalung)	54
Abbildung 51: Anbringung der Dokaplex- Platten und Bleche (Konterschalung)	54
Abbildung 52: Schalungsteile (Außen-, Konter-, Innenschalung)	55
Abbildung 53: Verspachteln und Schleifen der Innenschalung	55
Abbildung 54: Anbringung des Dichtungsprofils an Schalungsteile	56
Abbildung 55: Klammern	56
Abbildung 56: Außenschalung mit Schalungstafel	56
Abbildung 57: Innenschalung mittels Ankerstäben an Stirnschalung befestigt.	57
Abbildung 58: Befestigung der Konterschalung mittels Ankerstäben	58
Abbildung 59: zweite Schaltafel	58
Abbildung 60: Fertige Montage	58
Abbildung 61: Krankübel	59
Abbildung 62: Betonflusssteuerung	59
Abbildung 63: Start des Befüllens	60
Abbildung 64: Ende des Befüllens	60
Abbildung 65: Fließprozess	61
Abbildung 66: Farbindikatorspuren nach dem Ausschalen	62
Abbildung 67: Anheben der Konterschalung	63
Abbildung 68: Lösen der Innenschalung	63
Abbildung 69: Anheben des Querschnitts	64
Abbildung 70: Ausgeschalter Querschnitt	64
Abbildung 71: Oberfläche Flusseite	64
Abbildung 72: Oberfläche Eifüllseite, Stromflussänderung	64
Abbildung 73: Oberfläche Stirnseite (Doka- Schaltafel)	65
Abbildung 74: Oberfläche Außenseite der Leitplanke (Flusseite)	66
Abbildung 75: Oberfläche Außenseite der Leitplanke (Eifüllseite)	66
Abbildung 76: Oberfläche Innenwand der Leitplanke (Flusseite)	66

Abbildung 77: Oberfläche Innenwand der Leitplanke (Einfüllseite)	66
Abbildung 78: Oberfläche der Fahrbahn	67
Abbildung 79: Betonoberfläche im Bereich der verzinkten Bleche (Beton)	67
Abbildung 80: Betonoberfläche im Bereich der verzinkten Bleche (Schalung)	67
Abbildung 81: Umlenkkonsolen.....	69
Abbildung 82: Gesamtschalung zweiter Befüllversuch	70
Abbildung 83: Ventile zum Luft ablassen	70
Abbildung 84: Zweiter Befüllversuch.....	71
Abbildung 85: Fließprozess	72
Abbildung 86: Ausgeschalter Träger.....	73
Abbildung 87: Oberfläche Flusseite	74
Abbildung 88: Oberfläche Eifüllseite, Stromflussänderung	74
Abbildung 89: Oberfläche Flusseite, Stromflussänderung	74
Abbildung 90: Oberfläche Eifüllseite	74
Abbildung 91: Oberfläche Außenseite der Leitplanke (Flusseite).....	75
Abbildung 92: Oberfläche Außenseite der Leitplanke (Einfüllseite)	75
Abbildung 93: Oberfläche Innenwand der Leitplanke (Flusseite)	75
Abbildung 94: Oberfläche Innenwand der Leitplanke (Einfüllseite)	75
Abbildung 95: Oberfläche der Fahrbahn	76
Abbildung 96: Betonoberfläche im Bereich der verzinkten Bleche (Beton)	76
Abbildung 97: Betonoberfläche im Bereich der verzinkten Bleche (Schalung)	76
Abbildung 98: Querschnitt Messstellen	77
Abbildung 99: Faserverteilung Brüstung unterer Bereich.....	78
Abbildung 100: Faserverteilung Hohlkasten Steg	79
Abbildung 101: Faserverteilung Hohlkasten Steg (Wertetabelle).....	80
Abbildung 102: Faserverteilung Fahrbahn	81
Abbildung 103: Querschnitt Messstellen Betonflüsse	82
Abbildung 104: gemessene Faserorientierungen am Querschnitt	82
Abbildung 105: Faserorientierung (Brüstung Fahrbahn)	83
Abbildung 106: Faserorientierung Hohlkasten	84
Abbildung 107: Fahrbahnträgerquerschnitte M 1:2	87
Abbildung 108: Schalungsfertigung	88
Abbildung 109: Erste Trägerhälfte	89
Abbildung 110: Außenschalung Einzelteil	90
Abbildung 111: Konterschalung	91
Abbildung 112: Darstellung zweiteilige Innenschalung ausgefahren	92
Abbildung 113: Variante 1 (Membrane)	93
Abbildung 114: Variante 2 (Schlauch allein)	94
Abbildung 115: Stoppel mit Bohrungen und Hohlraum	95
Abbildung 116: Innenschalung Abdeckung ohne Abdeckplatte	95
Abbildung 117: Innenschalung Abdeckung mit Abdeckplatte	96

Abbildung 118: Schläuche (Deckel und Ventile)	96
Abbildung 119: Stirnschalungen und Darstellung des gesamten Innenschalungssystems	97
Abbildung 120: Abstandhalter	98
Abbildung 121: Platten Ober, -unterseite	99
Abbildung 122: Schlauchvarianten.....	100
Abbildung 123: Schlauchversuch voll aufgeblasen	101
Abbildung 124: Schlauchvariante 1 (Membrane Spannung)	101
Abbildung 125: Schlauchvariante 1 Anschlagsleisten.....	102
Abbildung 126: Schlauchvariante 2 (Schlauch allein)	102
Abbildung 127: Modifikationen an Schlauchvariante.....	103
Abbildung 128: Modifizierte Schlauchvariante	104
Abbildung 129: Zug- Drucksicherung Innenschalung.....	105
Abbildung 130: Fertigung Einzelteile.....	106
Abbildung 131: Zustellungsproben am Musterstück	107
Abbildung 132: Bearbeitungsschritte der Schalung	108
Abbildung 133: hydrostatischer Betondruck.....	109
Abbildung 134: Betondruck auf Schlauch (Maße in mm)	110
Abbildung 135: Komprimierung des Schlauches.....	111
Abbildung 136: Betondruck Außenschalung	112
Abbildung 137: Betondruck Konterschalung	114
Abbildung 138: Konterschalung mit Queraussteifungen	117
Abbildung 139: Innenschalung idealisiertes System, Betondruck	118
Abbildung 140: Bemessung Unterteil.....	118
Abbildung 141: Bemessung Unterteil Betondruck	120
Abbildung 142: Bemessung Oberteil Schlauch	122
Abbildung 143: Bemessung Oberteil Betondruck	124
Abbildung 144: Schnittkraftverläufe	124
Abbildung 145: Außenschalung	126
Abbildung 146: Innenschalung Unterteil	126
Abbildung 147: Innenschalung Unterteil	127
Abbildung 148: Innenschalung Montage.....	128
Abbildung 149: Stirnseiten der Innenschalung.....	128
Abbildung 150: Stoppel und zweite Stirnseite	129
Abbildung 151: Schlauchabdeckung.....	130
Abbildung 152: Innenschalungssystem.....	130
Abbildung 153: Befüllungssystem	131
Abbildung 154: Letzte Montageschritte	131
Abbildung 155: Betonage des Versuchsträgers	132
Abbildung 156: entfernen der Schlauch	133
Abbildung 157: Ausschalen Teil 1	134
Abbildung 158: Ausschalen Teil 2.....	135

Abbildung 159: Ausschalen Teil 3.....	136
Abbildung 160: Oberfläche	137
Abbildung 161: Mischer Eirich links, Zyklus rechts	153
Abbildung 162: Igelbildung.....	157
Abbildung 163: AFM 2. Mischung Zyklus	159
Abbildung 164: AFM 3. Mischung Eirich	159
Abbildung 165: AFM Krankübel	159
Abbildung 166: Schalung	161
Abbildung 167: Oberflächen Innenwände	161
Abbildung 168: Rheofinish 323P Dokplex Seite.....	163
Abbildung 169: Rheofinish 323P Blech Seite.....	163
Abbildung 170: PTFE - Spray Dokplex Seite	164
Abbildung 171: PTFE - Spray Blech Seite	164
Abbildung 172: Formenöl Dokplex Seite.....	165
Abbildung 173: Formenöl Blech Seite.....	165
Abbildung 174: Supercast Dokplex Seite.....	166
Abbildung 175: Supercast Blech Seite.....	166
Abbildung 176: Oberfläche Dokplex Seite	167
Abbildung 177: Oberfläche Blech Seite	167

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften von PMMA [27]	51
Tabelle 2: Frischbetonprüfung	158
Tabelle 3: Frischbetonprüfung Befüllversuch 2	174

Anhang A.1 Betonage 1.Befüllversuch M1:1

A.1.1 Beton

Für die Betonage wurde ein UHPC mit 1,25 Vol.-% Stahlfasern verwendet. Für die vollständige Befüllung der Schalung werden $0,466\text{m}^3$ Beton benötigt plus eine zusätzliche Menge für die Festbetonprüfung erstellten Würfel und Zylinder.

A.1.2 Materialien

Für die Herstellung des UHPCs werden folgende Materialien verwendet:

- Feinstoffe
 - Zement
 - Silikastaub (Microsilika)
 - Feine Quarzsand (100 -200) μm
- Grobmaterialien
 - grober Quarzsand (0,3 – 0,8) mm
 - Quarzmehl
- Wasser und Fließmittel
- Verzögerer und Entschäumer
- Stahlfasern

Da das Betonvolumen für die vorhandenen Mischer am LKI zu groß ist, wird dies auf zwei Mischer zu jeweils drei Mischungen aufgeteilt. Als Mischer werden die zwei Intensivmischer (Eirich und Zyklos) verwendet (siehe Abbildung 161).



Abbildung 161: Mischer Eirich links, Zyklos rechts

A.1.3 Mischzusammensetzung

Einsatzstoff		Gehalt [kg/m³]	Stoffraum [dm³/m³]	Ansatz: 86.8 Ltr.		
Luftporengehalt in V%=Luftg.	2.0 %	--	20.0	mit trockenem Ausgangsstoffen	Berücksichtigung des Wassers in Zuschlägen	
W&P CEM I 42.5R Nov.2015	z	720	236.1	62.50 kg	62.500 kg	
RW Füller Q1	MS	13.00 %	93.6	41.6	8.12 kg	8.125 kg
Quarzmehl Dorsilit 16900		40.00 %	288.0	108.7	25.00 kg	25.000 kg
Wasser w/z-Wert (äqu.)	w	0.2550	183.6	163.4	14.19 kg	14.187 kg
Zusatzmittel						
BT3 Prement H500	FM	3.50 %	25.20	23.55	2.187 kg	2.187 kg
BT3 Premtard VZG 100		0.25 %	1.80	1.68	0.156 kg	0.156 kg
BT3 Premaad Foam EX T	LP	0.25 %	1.8	1.68	0.156 kg	0.156 kg
Leim (Vol.%)				593.3		
Glasfaser						
Stahlfaser 20/0.2 mm	SF	1.25 Vol.-%	98.1	12.5	8.52 kg	8.518 kg
Gesteinkörnung						
I. Geba Quarzpowder 100 - 200 µm		25.0 %	261	98.5	22.67 kg	22.668 kg
II. Dorsilit Nr. 8 (0.3 - 0.8) mm		75.0 %	783	295.6	68.00 kg	68.003 kg
II. Basaltdelsplitt 2-4 mm		0.0 %	0	0.0	0.00 kg	0.000 kg
IV.		0.0 %	0	0.0	0.00 kg	0.000 kg
Summe Zuschlag		100 %				
Beton			2439	1000.0	Setzfließmaß (mm)	
w/z-Wert			0.26		Vw/Vp =	0.475
w/b-Wert (w/(z+SFA))			0.23			
Rohdichten						
	ρ_d					ρ_d
1 Geba Quarzpowder 100 - 200 µm	2.650	Wassergehalt= 0.00%		W&P CEM I 42.5R Nov.2015		3.050
2 Quarzsand 0.3-0.8 mm	2.650	Wassergehalt= 0.00%		RW Füller Q1		2.250
3 Basaltdelsplitt	3.050	Wassergehalt= 0.00%		Quarzmehl Dorsilit 16900		2.650
4 Stahlfaser	7.850	Wassergehalt= 0.00%		BT3 Prment H500		1.070
Anmerkung:						
<u>Hägermann Flow</u>						
<u>Ausbreitmaß</u>						
<u>Frischbetontemperatur</u>						
<u>Datenlogger Nummer</u>						

Institut für Betonbau
Lessingstraße 25/I
8010 Graz
Tel : +43 (0)316 873 - 6191



Baustelle:
Labor für konstruktiven
Ingenieurbau - LKI
Inffeldgasse 24
8010 Graz

Bauteil: Schubversuche

24112015 - Quickway - 1.25%

A.1.4 Mischprozess

Der theoretische Mischablauf läuft folgend ab.

- Vor Mischbeginn: Zugabe der Feinstoffe und Stahlfasern
- Beim Mischen: Zugabe von Wasser und Verzögerer (ohne Zuschalten des Wirblers), Mischzeit 2,5 min.
- Zugabe des Fließmittels (Zuschalten des Wirblers), Mischzeit 3 min.
- Zugabe der Grobstoffe (ohne Zuschalten des Wirblers), Mischzeit 3 min.
- Zugabe des Entschäumers, Mischzeit 1 min.

Änderungen des Mischprozesses sind dem Betonierprotokoll zu entnehmen.

A.1.5 Betonierprotokoll: (QUICKWAY 1. Befüllversuch vollmaßstäblich)

Datum: 24.11.2015

Protokoll: Gerhard Santner, (Mischer: Zyklus)
Josef Linder, (Mischer: Eirich)

<u>Beteiligte:</u>	Mischer (Zyklus):	Hannes Koitz
	Befüller (Zyklus):	Philipp Pucher, Valentino Sliskovic
	Mischer (Eirich):	Philipp Hadl
	Befüller (Eirich):	Christoph Mosinz +1
	Scheibtruhe:	Uwe Fülöp, Johannes Oppeneder
	Kran & Krankübel:	Reinhard Holzschuster
	Frischbetonprüfung:	Rudolf Panik
	Helfer:	Goran Vojvodic

Ablauf allgemein:

Mischen mit Eirich & Zyklus; je 3 Mischungen zu je (~ 87L)

Zwischenlagerung in Krankübel im Kellerloch; Transport mit Scheibtruhen

Mischen und Frischbetonprüfung:

M1	Zyklus/ Eirich
14:43	Befüllung: Feinstoffe + Stahlfasern
14:48	Mischbeginn: Wasserzugabe + Verzögerer (kein Wirbler zugeschaltet)
14:51	Zugabe Fließmittel (Wirbler zugeschaltet)
14:54	Zugabe Quarzsand (kein Wirbler zugeschaltet)
14:59	Zugabe: Entschäumer (kein Wirbler zugeschaltet)
15:00	Stop: sehr hohe Igelbildung (siehe Bild), Probenentnahme
15:08	Entleerung in 1. Scheibtruhe dann in Krankübel
15:10	Entleerung in 2. Scheibtruhe (Rest) dann in Krankübel
15:05	Eirich: Entleerung in beide Scheibtruhen, dann in Krankübel

M2	Zyklus/Eirich
15:12	Befüllung: Feinstoffe + die Hälfte der Stahlfasern (in offenen Mischer von Hand leicht hineingerieselt.
15:13	Mischbeginn: Wasserzugabe + Verzögerer (kein Wirbler zugeschaltet)
15:16	Zugabe der zweiten Hälfte der Stahlfasern
15:17	Zugabe Fließmittel (Wirbler zugeschaltet)
15:20	Zugabe Quarzsand + Quarzmehl (kein Wirbler zugeschaltet)
15:25	Zugabe: Entschäumer (kein Wirbler zugeschaltet)
15:26	Stop: Igelbildung, Probenentnahme
15:29	Entleerung in 1. Scheibtruhe dann in Krankübel
15:32	Entleerung in 2. Scheibtruhe (Rest) dann in Krankübel
15:27	Eirich: Entleerung in beide Scheibtruhen, dann in Krankübel

M3	Zyklus/Eirich
15:34	Befüllung: Feinstoffe + die Hälfte der Stahlfasern (in offenen Mischer von Hand leicht hineingerieselt).
15:36	Mischbeginn: Wasserzugabe + Verzögerer (kein Wirbler zugeschaltet)
15:40	Zugabe der zweiten Hälfte der Stahlfasern + Fließmittel
15:44	Zugabe Quarzsand + Quarzmehl (kein Wirbler zugeschaltet)
15:48	Zugabe: Entschäumer (kein Wirbler zugeschaltet)
15:49	Stop: Beton Abkratzen
15:52	Entleerung in beide Scheibtruhen dann in Krankübel
15:55	Eirich: Probenentnahme Entleerung in beide Scheibtruhen dann in Krankübel

Anmerkungen:

Die Stahlfasern wurden als ganzes Bündel aus dem Sack oder Eimer in den zuvor geöffneten Mischer hineingeschüttet. Dabei kam es zu einer schlechten Vermischung mit den Restlichen Materialien, sodass sich Klumpen (Igel) bildeten (siehe Abbildung 162).



Abbildung 162: Igelbildung

Diese Igel wurden natürlich sorgfältig aus den Mischern entfernt, bevor der Beton in den Krankübel gegeben wurde, damit diese nicht in die Schalung gelangen. Jedoch ist damit die gewünschte Stahlfasermenge von 1,25% nicht mehr gegeben.

Befüllung:

- 16:05 Anheben des Krankübels aus Kellerloch, Probenentnahme für Frischbetonprüfungen
- 16:11 Positionierung auf Schalung
- 16:14 Beginn der Befüllung
- 16:16 Schalung voll (bis auf 5cm)
- 16:21: Ende (Krankübel weggehoben)

Frischbetonprüfung:

Für die Frischbetonprüfung wurden jeweils Proben aus den Mischern (Eirich und Zyklus) und aus dem Krankübel nachdem alle Mischungen hineingeben und vermengt wurden entnommen. Dabei wurden folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Bestimmung des Luftporengehalts gemäß ÖNORM EN 12350-7
Hierfür wurden 3 Proben aus den Mischern entnommen (2 aus dem Zyklus und eine aus dem Eirich). Die genaue Vorgehensweise wurde schon im Kapitel 2.1.3 beschrieben.
- Bestimmung der Konsistenz gemäß ÖNORM EN 12350-8
Hierfür wurden 3 Proben aus den Mischern entnommen (eine jeweils aus dem Zyklus und dem Eirich und eine aus dem Krankübel). Die genaue Vorgehensweise wurde schon im Kapitel 2.1.3 beschrieben. Auf die Ermittlung der Zeit t_{500} wurde verzichtet.

Auf die Ermittlung der Rohdichte und der Temperatur wurden ebenfalls verzichtet.

Die Zahlenwerte für die Frischbetonprüfungen können der nachfolgenden Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Frischbetonprüfung

		Mischer / Kübel				
		Zyklus 1. Mischung	Zyklus 2. Mischung	Eirich 3. Mischung	Krankübel	
Frischbetonprüfung	Luftporengehalt [%]	2,3	1,2	2,8		
	Konsistenz	AFM [cm]		82	80/81	73/74,5
		Zeit t [s]		180	180	180

Anzumerken sei, dass bei der Bestimmung des Ausbreitfließmaßes bei der 3. Probe des Eirich- Mischers, sich drei Igel darauf befanden. Dies verfälschte natürlich das Ergebnis. (siehe Abbildung 163 - Abbildung 165)



Abbildung 163: AFM
2. Mischung Zyklos

Abbildung 164: AFM
3. Mischung Eirich

Abbildung 165: AFM
Krankübel

Begleitproben:

Es wurde aus dem Krankübel Beton für 4 Würfel (10 x 10 x 10 cm) und 3 Zylinder ($\varnothing 10$ x 20 cm) entnommen.

Anhang A.2 Trennmitteltest vor zweiter Betonage

Da beim Ausschalen die Oberflächen des Fahrbahnquerschnitts an den Bereichen der positionierten Bleche zu einem derart unerwartetem rauhen und unebenen Ergebnis führte, wird vor der zweiten Betonage ein Trennmitteltest erfolgen.

Dabei werden vier Quader (300 x 150 x 50 mm) aus UHPC erstellt. Die dafür konstruierten Schalungen (siehe Abbildung 166 und Abbildung 167) besteht aus Dokaplex Platten. An einer der Innenwände wird ein verzinktes Blech angeschraubt, die andere Wand wird nicht verkleidet. Anschließend werden die Verschraubungen mit derselben Masse wie zuvor bei der Schalung zur Beobachtung des Betonflusses verspachtelt und geschliffen.

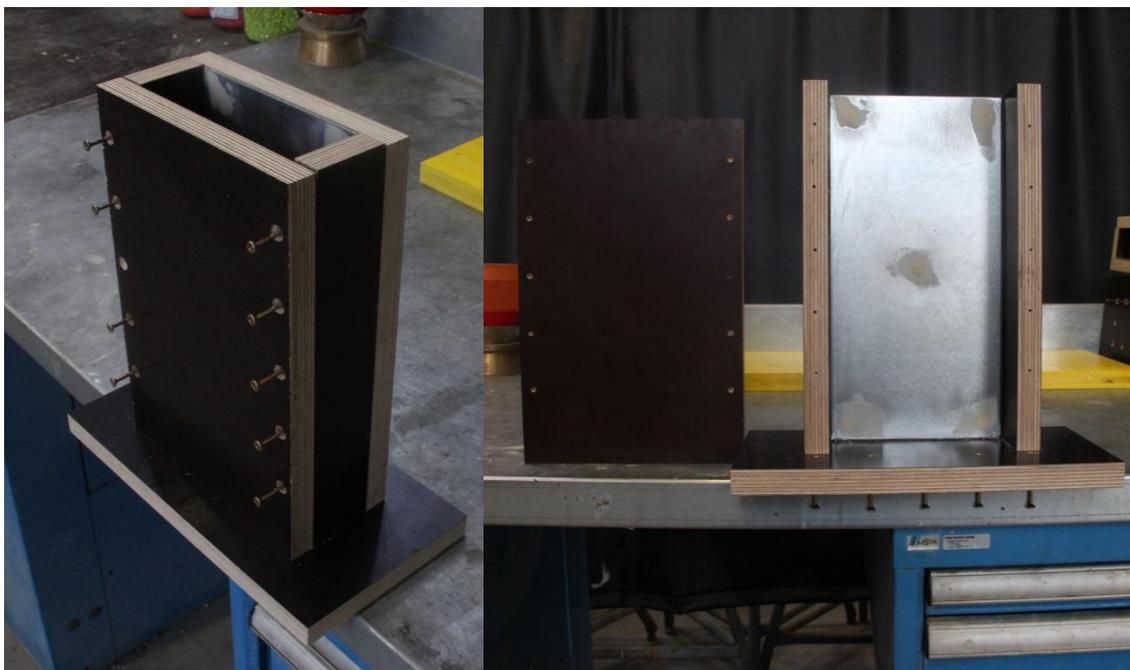


Abbildung 166: Schalung

Abbildung 167: Oberflächen Innenwände

Vor dem Befüllen werden die Schalungen mit vier verschiedenen Trennmitteln versehen:

- dem zuvor verwendeten Rheofinish 323 P als Referenzwert
- Ein PTFE – Trennspray. Optimal geeignet als Trenn-, Gleit- und Schmiermittel für reibungsbelastete Materialien. Sehr gute Trenneigenschaften bei der Kunststoff- und Gummiverarbeitung.
- Betontrennmittel tectol Supercast 3100. Spezial-Trennmittel für hochwertige Sichtbetonoberflächen. Ausgezeichnete Trennwirkung, ergibt saubere, fleckenfrei und nahezu porenfreie Oberflächen, mit hochwertigem Korrosionsschutz, sehr sparsam im Gebrauch.

- Betontrennmittel tectol Formenöl RC 120. Bewährtes Universaltrennmittel für saugende und nichtsaugende Schalungen aus Holz, beschichteten Holzwerkstoffplatten, Stahl und Kunststoff. Ausgezeichnetes Haftvermögen auf der Schalung, leichte, saubere Trennung, fleckenfreie, porenarme Oberflächen.

Genauere Angaben zu den einzelnen Trennmitteln können den Technischen Datenblättern aus der Literatur [32], [36], [37] und [38] entnommen werden.

A.2.1 Betonage

Als Beton wird ein UHPC mit 2% Fasergehalt verwendet. Der UHPC wird zuvor am Zyklusmischer hergestellt. Dieser Prozess dauert ca. 20 min. Anschließend werden die Formen befüllt und der Beton wird an den Einfüllseiten der Schalungen abgezogen und mit einer Folie abgedeckt.

A.2.2 Ausschalen/Analyse

Das Ausschalen erfolgte ca. 20 Stunden nach der Betonage und brachte folgende Oberflächen zum Vorschein. Es sei vermerkt, dass beim Trennmitteltest eine rein optische Beurteilung erfolgte

A.2.3 Rheofinish 323P

Wie schon an der Schalung für den Befüllprozess zeigte sich an der Dokplex Seite des Betonquaders eine gleichmäßige glatte Oberfläche mit wenig nur sehr kleinen Lunkern (siehe Abbildung 168). An der Blechbeplankten Seite entstand eine raue ungleichmäßige Oberfläche mit vielen kleinen Lunkern (siehe Abbildung 169). Im Vergleich zum ausgeschalteten Querschnitt kam es jedoch nur zu einer kleinen oder fast garkeiner chemischen Reaktion des Betons mit dem verzinkten Blech, da sich keine großen Lunker bildeten und am Blech keine Betonreste zurückblieben. Dieses Ergebnis liegt daran, da das Blech nur vertikal als Schalung verwendet wurde und nicht wie bei den Abrundungen des Querschnitts bei der Befüllschalung. Des Weiteren wurde das Blech auch nicht bearbeitet, sprich in eine Runde Form abgekantet. Es könnte auch daran liegen, dass am Blech das Trennmittel dick aufgetragen wurde.



Abbildung 168: Rheofinish 323P Dokplex Seite

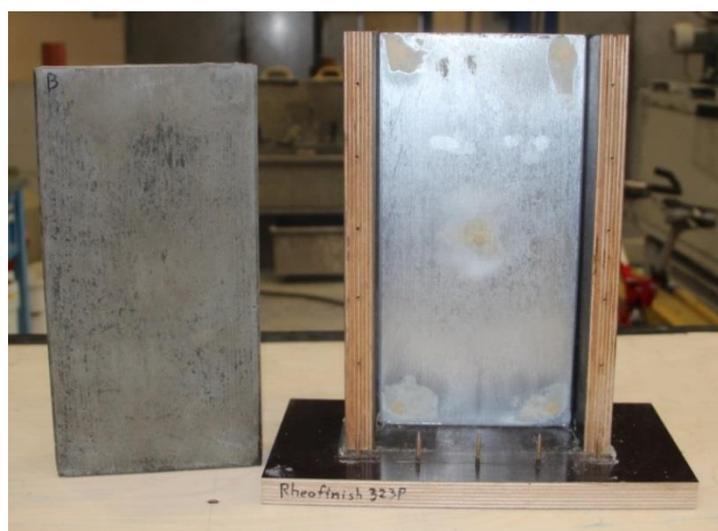


Abbildung 169: Rheofinish 323P Blech Seite

A.2.4 PTFE-Trennspray

An der Dokplex- Seite zeigt sich eine matte, glatte, gleichmäßige Oberfläche (siehe Abbildung 170). An der Blechseite jedoch ergab sich eine raue mit großen Lunkern (speziell an den Verschraubungen) versehene Oberfläche (siehe Abbildung 171). Die Spachtelmasse löste sich auch zum Teil in blieb am Beton haften. Es sei noch erwähnt, dass das Ausschalen sehr schwierig war, da durch das PTFE-Spray das Blech sehr gut am Beton haften blieb.

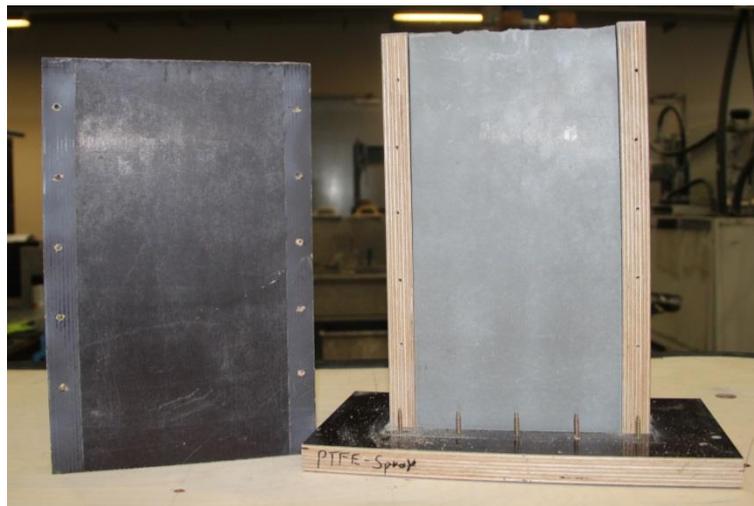


Abbildung 170: PTFE - Spray Dokplex Seite



Abbildung 171: PTFE - Spray Blech Seite

A.2.5 Tectol Formenöl RC 120

Beim Formenöl ergab sich auf der Dokplex- Seite eine gleichmäßige glatte Oberfläche mit sehr wenigen, sehr kleinen Lunkern (siehe Abbildung 172). Bei der Blechbeplankten Seite bildeten sich viel Lunker, speziell an den Verschraubungen (siehe Abbildung 173). Es entstand dabei eine raue Oberfläche. Am Blech blieben Betonreste haften.

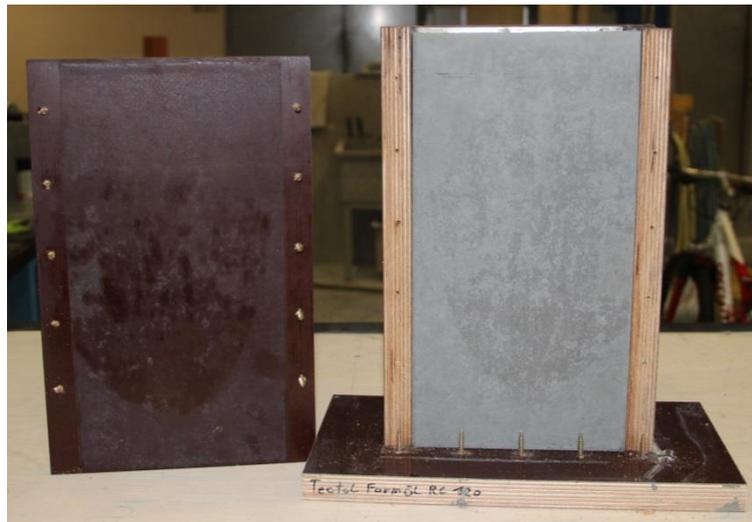


Abbildung 172: Formenöl Dokplex Seite



Abbildung 173: Formenöl Blech Seite

A.2.6 Tectol Supercast 3100

An der Dokaplex- Seite zeigte sich eine gleichmäßige glatte Oberfläche mit sehr wenigen, sehr kleinen Lunkern (siehe Abbildung 174). Bei der Blechseite bildeten sich viel Lunker, speziell an den Verschraubungen (siehe Abbildung 175). Es entstand dabei eine raue Oberfläche. Am Blech blieben ebenfalls wie beim Formenöl Betonreste haften.

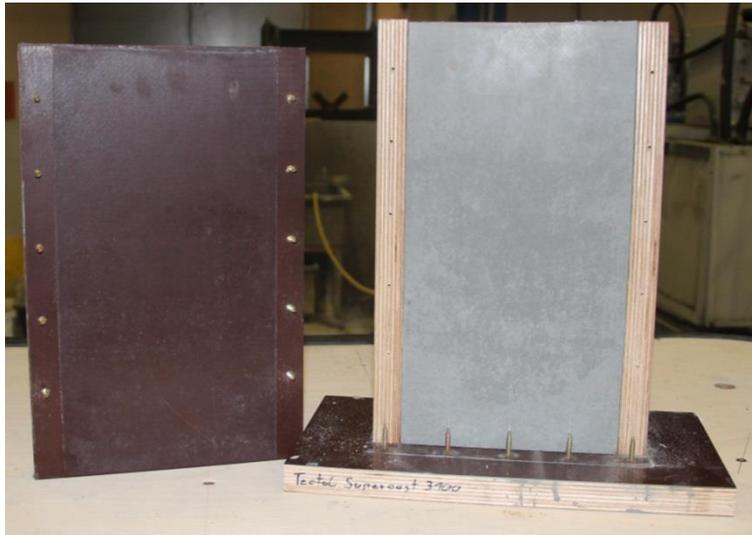


Abbildung 174: Supercast Dokplex Seite

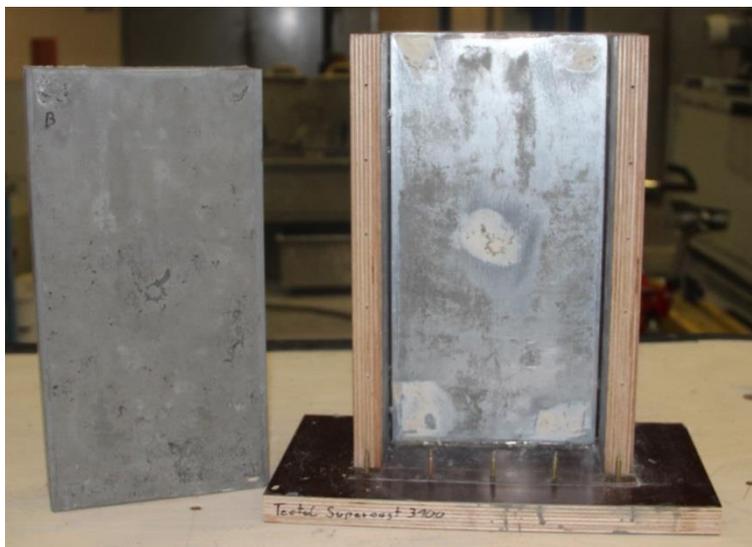


Abbildung 175: Supercast Blech Seite

A.2.7 Fazit

Da sich aus dem Trennmitteltest keines sich für verzinkte Bleche als geeignet herausstellte, um eine, den Ansprüchen nach als Sichtbeton geltende Oberfläche zu bekommen wird bisweilen (auch aus Zeitgründen) das schon zuvor verwendete Trennmittel (Rheofish 323P) weiterhin genutzt. Für weiterfolgende Betonagen an der Schalung zur Befüllversuchen sollten weitere Trennmittel für Bleche getestet werden. In der Abbildung 176 und Abbildung 177 sehen Sie nochmals alle getesteten Trennmittel nebeneinander aufgestellt.

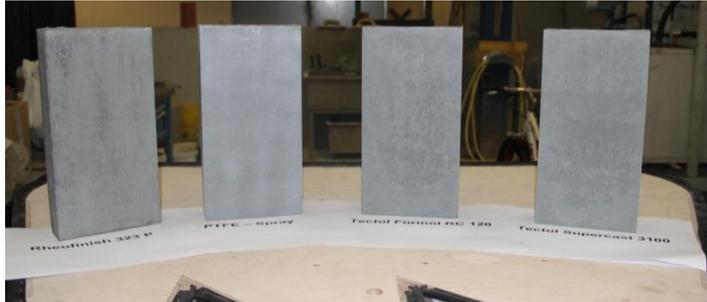


Abbildung 176: Oberfläche Dokaplex Seite

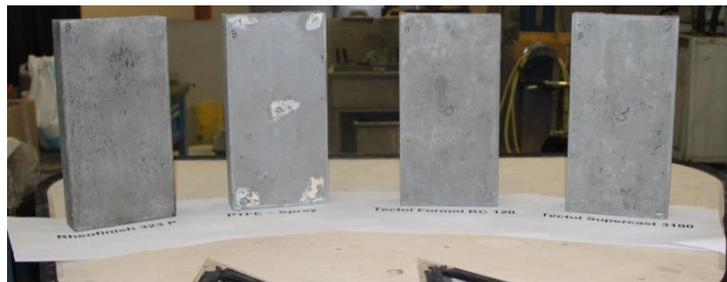


Abbildung 177: Oberfläche Blech Seite

Anhang A.3 Betonage 2.Befüllversuch M1:1

A.3.1 Beton

Auf Grund, da es beim ersten Befüllversuch zu einer starken Igelbildung kam, wird nochmals derselbe UHPC, jedoch mit mehr Stahlfasern (2,00 Vol.-%) verwendet und darauf geachtet, dass sich die Stahlfasern ordentlich vermischen. Für die vollständige Befüllung der Schalung werden diesmal $0,476\text{m}^3$ Beton benötigt plus eine zusätzliche Menge für die Festbetonprüfung erstellten Würfel und Zylinder.

A.3.2 Mischung

Für die Herstellung werden dieselben Materialien und Mischer verwendet, wie beim ersten Befüllversuch.

A.3.3 Mischzusammensetzung

Institut für Betonbau Lessingstraße 25/I 8010 Graz Tel.: +43 (0)316 873 - 6191		 Graz University of Technology			
Zielsetzmaß auf trockener Platte Verdichtung Verdichtungsdauer Gesamtmenge Herstelldatum: Lufttemperatur Ausbreitmaß mit Fasern	> 220 mm F52 - 90.0 Liter > 50 cm	Baustelle: Labor für konstruktiven Ingenieurbau - LKI Inffeldgasse 24 8010 Graz <hr/> Bauteil: Schubversuche 17.03.2016 - Quickway			
Einsatzstoff		Gehalt	Stoffraum	Ansatz: 90.0 Ltr.	
Luftporengehalt in V%=Luftg.	2.0 %	--	20.0	mit trockenen Ausgangsstoffen	Berücksichtigung des Wassers in Zuschlägen
W&P CEM I 42.5R Nov.2015	z	720	236.1	64.80 kg	64.800 kg
RW Füller Q1	MS	13.00 %	93.6	41.6	8.42 kg 8.424 kg
Quarzmehl Dorsilit 16900		38.58 %	277.8	104.8	25.00 kg 25.000 kg
Wasser w/z-Wert (äqu.)	w	0.2550	183.6	164.4	14.80 kg 14.800 kg
Zusatzmittel					
BT3 Prement H500	FM	3.50 %	25.20	23.55	2.268 kg 2.268 kg
BT3 Prementard VZG 100		0.10 %	0.72	0.67	0.065 kg 0.065 kg
BT3 Premaad Foam EX T	LP	0.20 %	1.4	1.35	0.130 kg 0.130 kg
Leim (Vol.%)					
Stahlfaser					
Baumbach Metall 12.7/0.175 mm	SF	2.00 Vol.-%	157.0	20.0	14.13 kg 14.130 kg
Gesteinkörnung					
I. Geba Quarzpowder 100 - 200 µm			19.3 %	199	75.0
II. Dorsilit Nr. 8 (0.3 - 0.8) mm			80.7 %	833	314.5
III. Basaltdedelsplitt 2-4 mm			0.0 %	0	0.0
IV.			0.0 %	0	0.0
Summe Zuschlag			100 %		
Beton			2474	1000.0	Setzfließmaß (mm)
w/z-Wert			0.26	Vw/Vp = 0.480	
w/b-Wert (w/(z+SFA))			0.23		
Rohdichten					
1 Geba Quarzpowder 100 - 200 µm	2.650	Wassergehalt=	0.00%	W&P CEM I 42.5R Nov.2015	
2 Quarzsand 0.3-0.8 mm	2.650	Wassergehalt=	0.00%	RW Füller Q1	
3 Basaltdedelsplitt	3.050	Wassergehalt=	0.00%	Quarzmehl Dorsilit 16900	
4 Stahlfaser	7.850	Wassergehalt=	0.00%	BT3 Prment H500	
Anmerkung: <u>Hägermann Flow</u> <u>Ausbreitmaß</u> <u>Frischbetontemperatur</u> <u>Datenlogger Nummer</u>					

A.3.4 Mischprozess

Der theoretische Mischablauf läuft folgend ab.

- Vor Mischbeginn: Zugabe der Feinstoffe
- Beim Mischen: Zugabe von Wasser und Verzögerer (ohne Zuschalten des Wirblers), Mischzeit 1 min
- Zugabe des Fließmittels (Zuschalten des Wirblers), Mischzeit 3 min.
- Zugabe der Grobstoffe (ohne Zuschalten des Wirblers), Mischzeit 3 min.
- Zugabe der Stahlfasern
- Zugabe des Entschäumers, (ohne Zuschalten des Wirblers) Mischzeit 1 min.

Änderungen des Mischprozesses sind dem Betonierprotokoll zu entnehmen.

A.3.5 Betonierprotokoll: (QUICKWAY 2. Befüllversuch vollmaßstäblich)

Datum: 17.03.2016

Protokoll: Gerhard Santner, (Mischer: Zyklus, Eirich)

<u>Beteiligte:</u>	Mischer (Zyklus):	Hannes Koitz
	Befüller (Zyklus):	Valentino Sliskovic, Roswitha Marius
	Mischer (Eirich):	Philipp Hadl
	Befüller (Eirich):	Philipp Taibon, Daniel Nigitz
	Scheibtruhe:	Goran Vojvodic,
	Kran & Krankübel:	Reinhard Holzschuster
	Frischbetonprüfung:	Philipp Pucher
	Helfer:	Uwe Fülöp, Christoph Mosinz

Ablauf allgemein:

Mischen mit Eirich & Zyklus; je 3 Mischungen zu je (~ 90L)

Zwischenlagerung in Krankübel im Kellerloch ; Transport mit Scheibtruhen

Start 09:11

Mischen und Frischbetonprüfung:

M1	ZYKLOS	M1	EIRICH
09:13	Befüllung Feinstoffe	09:12	Befüllung Feinstoffe
09:16	Mischbeginn: Wasserzugabe (ein wenig verschüttet, nachgefüllt)	09:15	Mischbeginn: Wasserzugabe
09:18	Zugabe Fließmittel	09:18	Zugabe Fließmittel
09:21	Zugabe Quarzsand	09:22	Stop, Zugabe Quarzsand (150U/min)
09:24	Zugabe Stahlfasern (Einstreuen von bzw. Kelle/Gitter Hand)	09:26	Zugabe Stahlfasern (Einstreuen von Hand)
09:32	Zugabe Entschäumer	09:32	Zugabe Entschäumer
09:33	Stop Mischung zu weich	09:33	Stop Mischung zu weich
09:38	Zugabe + 1kg Quarzmehl	09:38	Zugabe + 1kg Quarzmehl
09:39	Stop	09:39	Stop
09:42 bis 09:48	Entleeren in Krankübel Temperatur T = 24°C	09:41 bis 09:44	Entleeren in Krankübel

M2	ZYKLOS (+1,5 kg Quarzmehl)	M2	EIRICH (+1,0 kg Quarzmehl)
09:42	Befüllung Feinstoffe	09:46	Befüllung Feinstoffe
09:51	Mischbeginn: Wasserzugabe	09:48	Mischbeginn: Wasserzugabe (150U/min)
09:53	Zugabe Fließmittel	09:50	Zugabe Fließmittel (450 - 500 U/min)
09:56	Zugabe Quarzsand	09:53	Stop, Zugabe Quarzsand
		09:55	Weitermischen (150U/min)
09:58	Zugabe Stahlfasern	09:56	Zugabe Stahlfasern
10:06	Zugabe Entschäumer	10:03	Zugabe Entschäumer
10:08	Stop Zugabe + 1kg Quarzmehl	10:04	Stop
10:10	Stop	10:06	Entleeren in Krankübel Temperatur T = 24,8°C
10:12 bis 10:16	Entleeren in Krankübel Temperatur T = 27°C		

M3	ZYKLOS	M3	EIRICH
10:16	Befüllung Feinstoffe	10:10	Befüllung Feinstoffe
10:18	Mischbeginn: Wasserzugabe	10:13	Mischbeginn: Wasserzugabe (150U/min)
10:20	Zugabe Fließmittel	10:15	Zugabe Fließmittel (450 - 500 U/min)
10:23	Zugabe Quarzsand	10:18	Stop, Zugabe Quarzsand
		10:19	Weitermischen
10:27	Zugabe Stahlfasern	10:22	Zugabe Stahlfasern
10:33	Zugabe Entschäumer	10:28	Zugabe Entschäumer
10:34	Stop	10:30	Stop Zugabe + 1kg Quarzmehl Temperatur T = 28,5°C
10:35	Entleeren in Krankübel Temperatur T = 28°C	10:33	Stop, Abkratzen, Mischen
		10:35	Entleeren in Krankübel

Anmerkungen:

Diesmal kam es bei der Zugabe der Stahlfasern zu keine Igelbildung, da man die Fasern vorsichtig hineinstreute.

Befüllung:

10:47 Start

10:51 Stop Entnahme (ca. eine Scheibtruhe) für Begleitkörper

10:56: restliche Befüllung Schalung an Einfüllseite

11:01 Ende (Krankübel weggehoben)

Frischbetonprüfung:

Für die Frischbetonprüfung wurde diesmal nur eine Probe aus dem Krankübel nachdem alle Mischungen hineingeben und vermengt wurden entnommen. Dabei wurden folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Bestimmung der Rohdichte gemäß ÖNORM EN 12350-6
- Bestimmung des Luftporengehalts gemäß ÖNORM EN 12350-7
- Bestimmung der Konsistenz gemäß ÖNORM EN 12350-8.
Wurde erst nach dem Befüllen durchgeführt. Diesmal wurde Zeit t_{500} ermittelt.

Die Bestimmung der Rohdichte wurde zugleich mit der Luftporenmessung durchgeführt, indem man den Luftporentopf als Messbehälter verwendet. Die Temperaturen wurden diesmal bei jeder Mischung gemessen, bevor sie in den Krankübel gelehrt wurden.

Die Zahlenwerte für die Frischbetonprüfungen können der nachfolgenden Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Frischbetonprüfung Befüllversuch 2

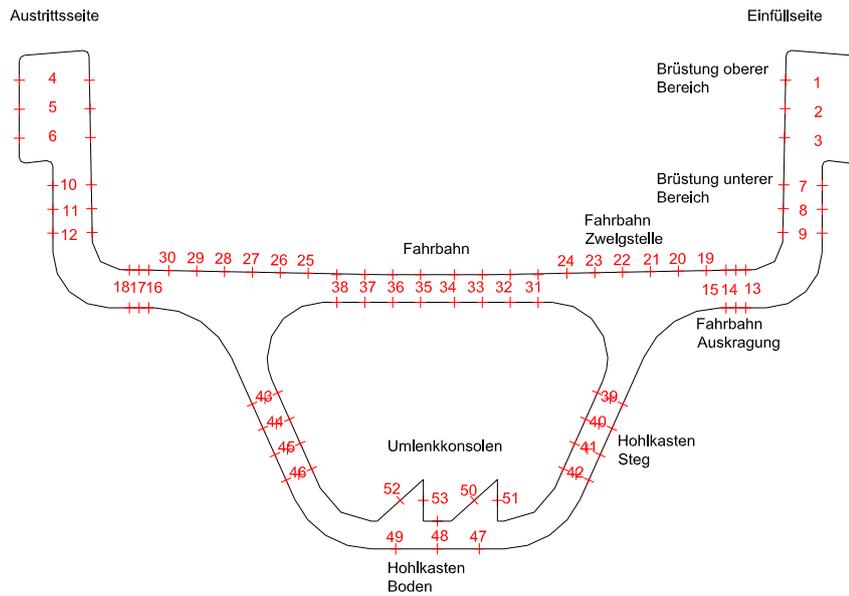
Frischbetonprüfung	Luftporengehalt [%]		2,4
	Konsistenz	AFM [cm]	67
		Zeit t [s]	120
		Zeit t_{500} [s]	30
	Durchschnittstemperatur aller Mischungen[°C]		26,46
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		2,4437

Begleitproben:

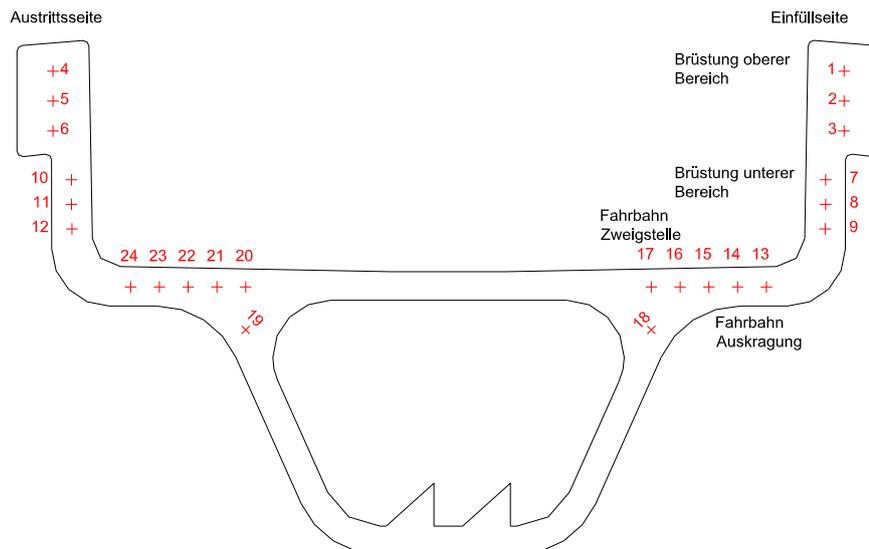
Es wurde aus dem Krankübel Beton für 4 Würfel (10 x 10 x 10 cm) und 3 Zylinder (ø10 x 20 cm) entnommen.

Anhang A.4 Faserverteilung Datenblätter

A.4.1 Messpunkte



A.4.2 Messpunkte Stirnseite



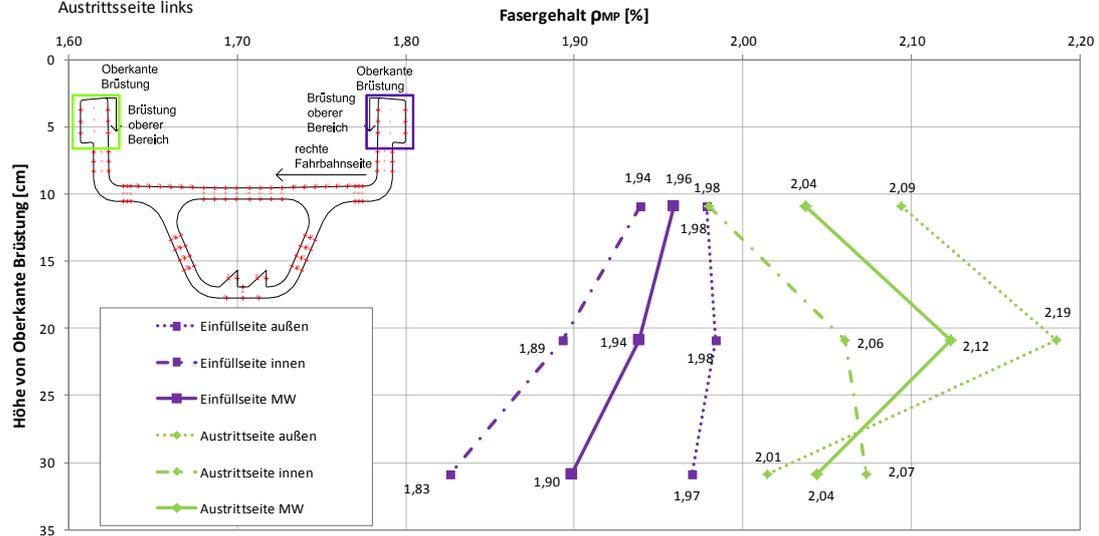
A.4.3 Brüstung oberer Bereich

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

Bereich Brüstung oberer Bereich Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %]

Einfüllseite rechts
Austrittsseite links



Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
1	10,90	Einfüllseite	25	3,64	3,72	3,45	3,38	3,55	1,98	1,96	1,94	3,48	3,69	3,73	3,30	3,19
2	20,90			3,35	3,71	3,69	3,48	3,56	1,98	1,94	1,89	3,40	3,41	3,42	3,40	3,35
3	30,90			3,20	3,43	3,89	3,61	3,53	1,97	1,90	1,83	3,28	3,37	3,20	3,19	3,34

Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
4	10,90	Austrittsseite	25	3,96	3,93	3,49	3,64	3,76	2,09	2,04	1,98	3,55	3,75	3,80	3,33	3,32
5	20,90			4,08	4,03	3,67	3,90	3,92	2,19	2,12	2,06	3,70	3,98	3,75	3,37	3,68
6	30,90			3,53	3,48	3,77	3,67	3,61	2,01	2,04	2,07	3,72	4,14	3,72	3,36	3,65

Legende:						
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung		90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung		135°	

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,59 [mH]

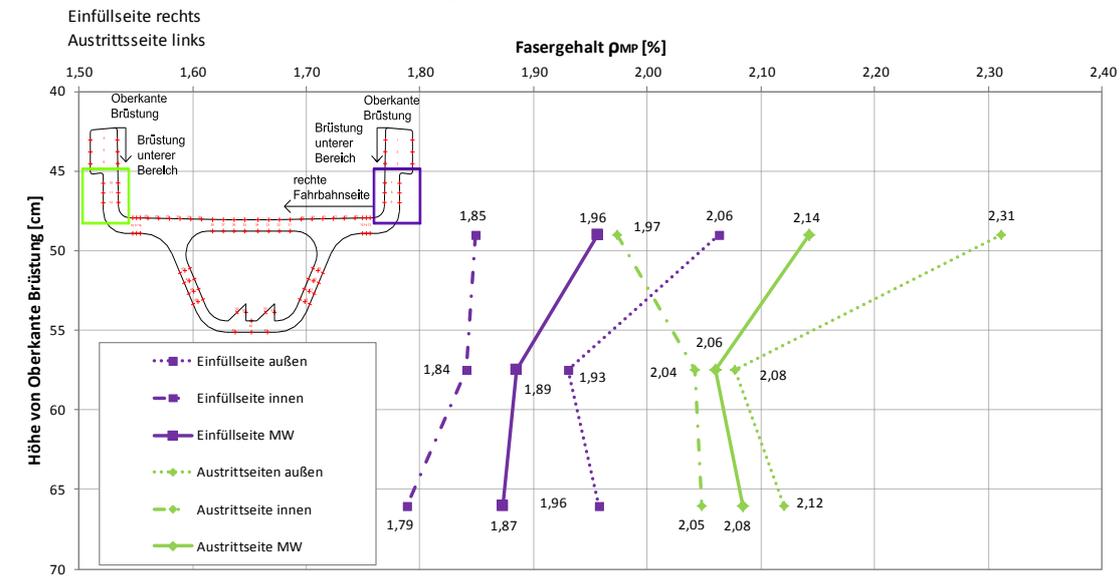
$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.4 Brüstung unterer Bereich

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

Bereich Brüstung unterer Bereich Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %]



Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
7	49,00	Einfüllseite	13,80	3,83	3,43	3,38	3,92	3,64	2,06	1,96	1,85	3,26	3,47	3,10	3,08	3,40
8	57,50		13,90	3,78	3,30	3,07	3,47	3,41	1,93	1,89	1,84	3,25	3,56	3,19	2,92	3,32
9	66,00		14,10	3,81	3,39	3,10	3,51	3,45	1,96	1,87	1,79	3,16	3,49	3,05	2,85	3,23

Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
10	49,00	Austrittsseite	13,80	4,79	3,98	3,32	4,22	4,08	2,31	2,14	1,97	3,48	4,13	3,48	2,80	3,52
11	57,50		13,90	4,15	3,70	3,16	3,65	3,67	2,08	2,06	2,04	3,60	4,25	3,68	2,98	3,50
12	66,00		14,10	4,24	3,73	3,18	3,81	3,74	2,12	2,08	2,05	3,61	4,24	3,56	3,02	3,63

Legende:						
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung		90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung		135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,53 [mH]

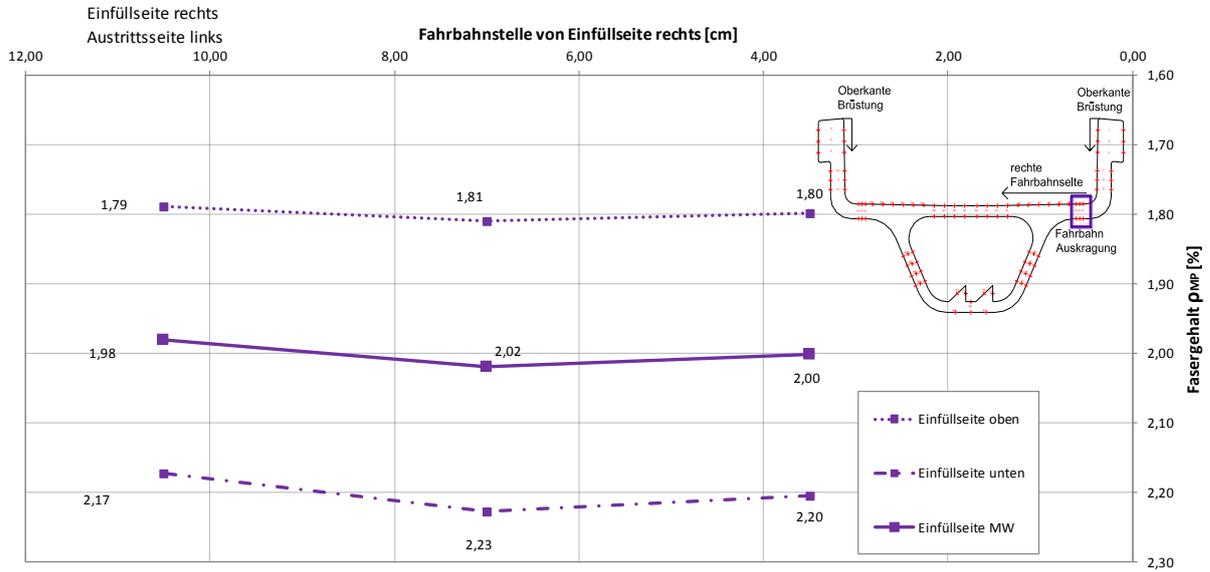
$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.5 Bereich Auskragung an Einfüllseite

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

Bereich Auskragung an Einfüllseite Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %]



Mess- punkt [MP]	Fahrbahn- stelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} oben					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} unten				
					0°	45°	90°	135°	MW oben	oben	MW	unten	MW unten	0°	45°	90°	135°
					[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
13	3,50		Einfüllseite	13,60	3,32	2,91	2,71	3,15	3,02	1,80	2,00	2,20	3,71	4,08	3,71	3,32	3,72
14	7,00	86,50	Einfüllseite	13,60	3,42	2,98	2,67	3,10	3,04	1,81	2,02	2,23	3,75	4,21	3,75	3,28	3,74
15	10,50		Einfüllseite	13,60	3,38	2,94	2,67	3,04	3,01	1,79	1,98	2,17	3,65	4,10	3,55	3,32	3,64

Legende:					
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung	90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung	135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,36 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

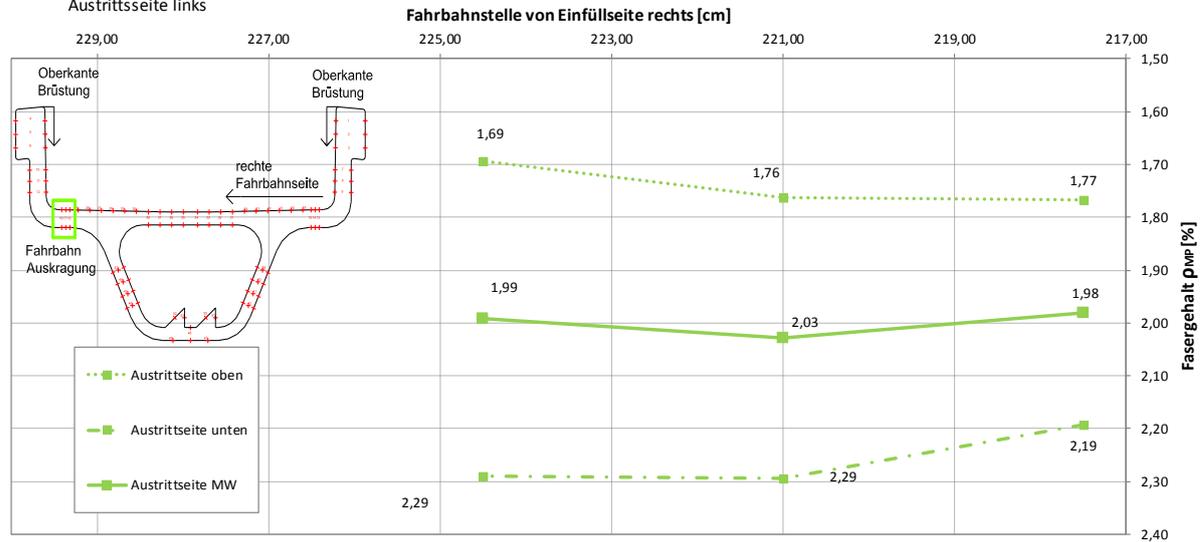
A.4.6 Bereich Auskragung an Austrittseite

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

Bereich Auskragung an Austrittseite Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %]

Einfüllseite rechts
Austrittsseite links



Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} oben					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} unten				
					0°	45°	90°	135°	MW oben	oben	MW	unten	MW unten	0°	45°	90°	135°
					[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
16	217,50		Austrittsseite	13,60	3,73	3,22	2,53	3,16	3,16	1,77	1,98	2,19	3,92	4,66	3,46	3,56	4,00
17	221,00	86,50	Austrittsseite	13,60	3,62	3,14	2,70	3,15	3,15	1,76	2,03	2,29	4,10	4,75	4,16	3,44	4,06
18	224,50		Austrittsseite	13,60	3,52	3,07	2,55	2,97	3,03	1,69	1,99	2,29	4,09	4,76	4,10	3,43	4,08

Legende:						
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung		90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung		135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,58 [mH]

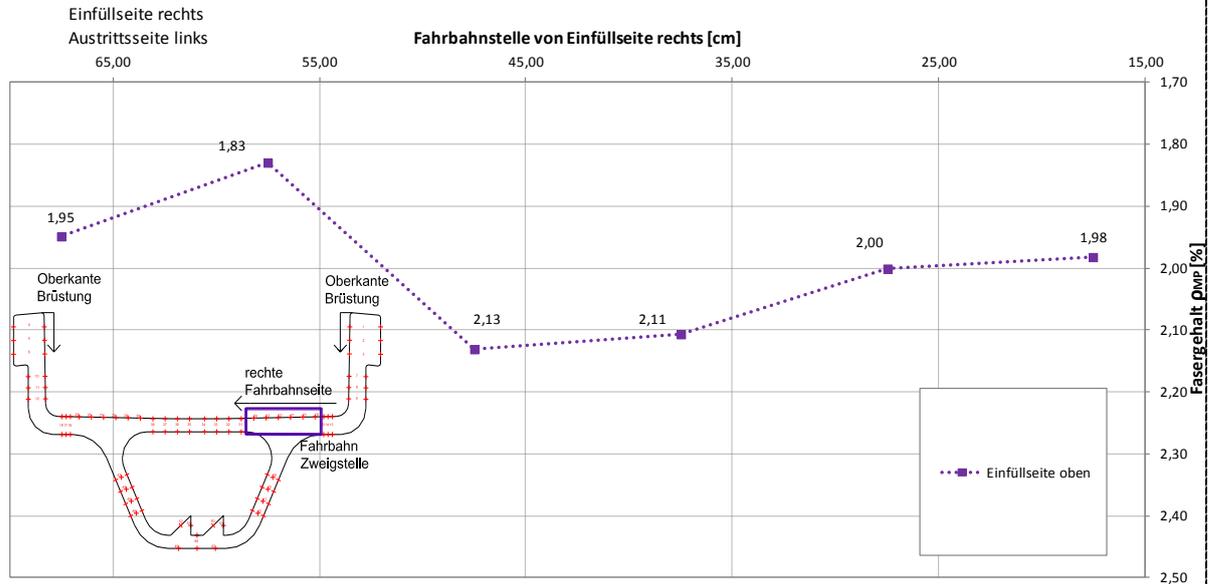
$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{soll}}{\Delta L_{MW,alle}} \quad [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.7 Fahrbahn Zweigstelle an Einfüllseite

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

Bereich Zweigstelle an Einfüllseite Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %] Anmerkung: Es wurde nur oben gemessen



Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} oben					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} unten					
					0°	45°	90°	135°	MW oben	oben	MW	unten	MW unten	0°	45°	90°	135°	
					[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	
19	17,50		Einfüllseite	13,90	3,44	3,01	3,69	3,08	3,31	1,98								
20	27,50			17,30	3,76	3,35	2,89	3,34	3,34	2,00								
21	37,50	86,50		26,50	4,10	3,46	2,95	3,54	3,51	2,11								
22	47,5			47,80	4,13	3,47	3,01	3,60	3,55	2,13								
23	57,50			17,80	3,40	2,95	2,70	3,15	3,05	1,83								
24	67,50			11,20	3,56	3,25	2,89	3,30	3,25	1,95								

Legende:						
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung		90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung		135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,33 [mH]

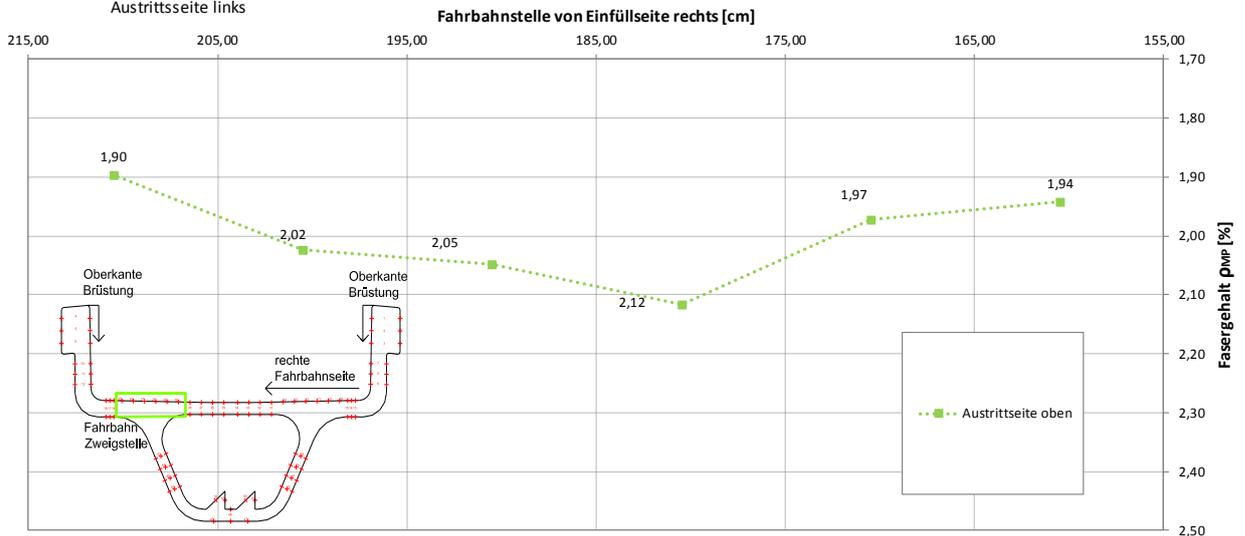
$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} \quad [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.8 Fahrbahn Zweigstelle linke Seite

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

Bereich Zweigstelle an Einfüllseite Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %] Anmerkung: Es wurde nur oben gemessen
Einfüllseite rechts
Austrittsseite links



Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} oben					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} unten					
					0°	45°	90°	135°	MW oben	oben	MW	unten	MW unten	0°	45°	90°	135°	
					[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]		
25	160,50		Austrittsseite	13,90	3,84	3,24	2,73	3,32	3,28	1,94								
26	170,50			17,30	3,80	3,38	2,84	3,31	3,33	1,97								
27	180,50	86,50		26,50	4,14	3,65	2,99	3,52	3,58	2,12								
28	190,50			47,80	4,03	3,48	2,91	3,42	3,46	2,05								
29	200,50			17,80	4,03	3,37	2,88	3,40	3,42	2,02								
30	210,50			11,20	3,76	3,15	2,68	3,23	3,21	1,90								

Legende:							
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung			90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung			135°	135° zur Fließrichtung

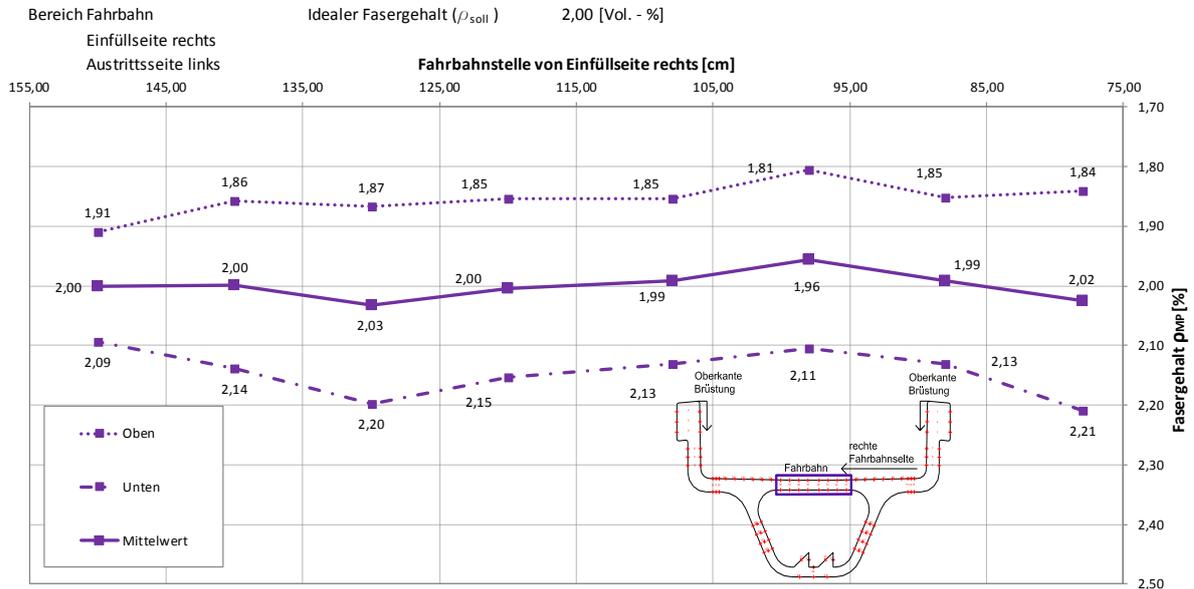
Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,38 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{soll}}{\Delta L_{MW,alle}} \quad [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.9 Fahrbahn

Ermittlung der Faserverteilung durch FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016



Mess- punkt [MP]	Fahrbahn- stelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} oben					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} unten				
					0°	45°	90°	135°	MW oben	oben	MW	unten	MW unten	0°	45°	90°	135°
					[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
31	78,00				3,69	3,05	2,59	3,22	3,14	1,84	2,02	2,21	3,77	4,33	3,67	3,39	3,68
32	88,00				3,60	3,06	2,75	3,22	3,16	1,85	1,99	2,13	3,63	4,31	3,54	3,00	3,68
33	98,00				3,53	3,08	2,63	3,08	3,08	1,81	1,96	2,11	3,59	4,11	3,50	2,99	3,76
34	108,00	86,00		10	3,68	3,03	2,68	3,25	3,16	1,85	1,99	2,13	3,63	4,17	3,35	3,06	3,95
35	120,00				3,60	3,18	2,79	3,08	3,16	1,85	2,00	2,15	3,67	4,22	3,58	3,07	3,82
36	130,00				3,71	3,10	2,69	3,23	3,18	1,87	2,03	2,20	3,75	4,43	3,65	3,11	3,80
37	140,00				3,67	3,12	2,69	3,19	3,17	1,86	2,00	2,14	3,65	4,27	3,65	3,03	3,64
38	150,00				3,77	3,21	2,75	3,29	3,26	1,91	2,00	2,09	3,57	4,13	3,56	3,01	3,58

Legende:							
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung			90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung			135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,41 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

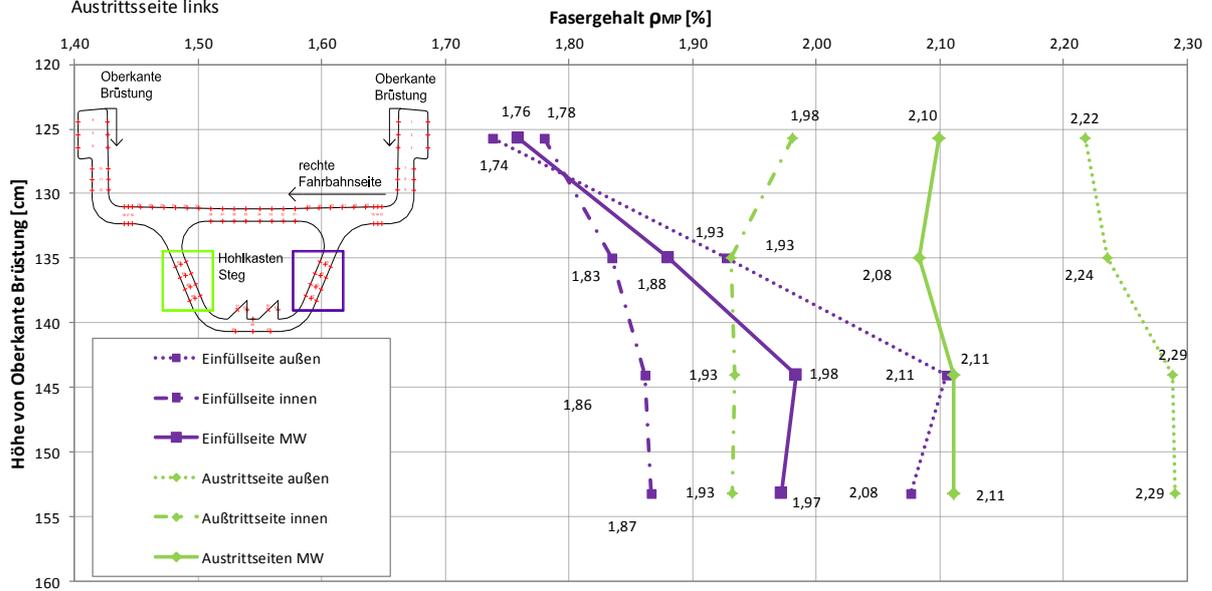
A.4.10 Hohlkasten Stege

**Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method**

Datum: 23.03.2016

Bereich Hohlkasten Steg Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %]

Einfüllseite rechts
Austrittsseite links



Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	
39	125,70	Einfüllseite	10	3,67	3,13	2,57	3,07	3,11	1,74	1,76	1,78	3,19	3,77	3,20	2,60	3,17
40	135,00			3,96	3,43	3,04	3,36	3,45	1,93	1,88	1,83	3,28	3,96	3,20	2,63	3,34
41	144,00			4,24	3,85	3,25	3,73	3,77	2,11	1,98	1,86	3,33	3,95	3,35	2,71	3,31
42	153,20			4,32	3,76	3,18	3,60	3,72	2,08	1,97	1,87	3,34	4,00	3,34	2,77	3,25

Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen				
				0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	
43	125,70	Austrittsseite	10	4,57	4,00	3,38	3,92	3,97	2,22	2,10	1,98	3,55	3,92	3,37	3,69	3,20
44	135,00			4,59	4,01	3,37	4,03	4,00	2,24	2,08	1,93	3,46	4,01	3,35	2,86	3,60
45	144,00			4,73	4,03	3,47	4,15	4,10	2,29	2,11	1,93	3,46	4,07	3,37	2,87	3,53
46	153,20			4,66	4,16	3,47	4,10	4,10	2,29	2,11	1,93	3,46	4,10	3,54	2,87	3,32

Legende:								
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung			90°	waagrecht zur Fließrichtung	
		45°	45° zur Fließrichtung			135°	135° zur Fließrichtung	

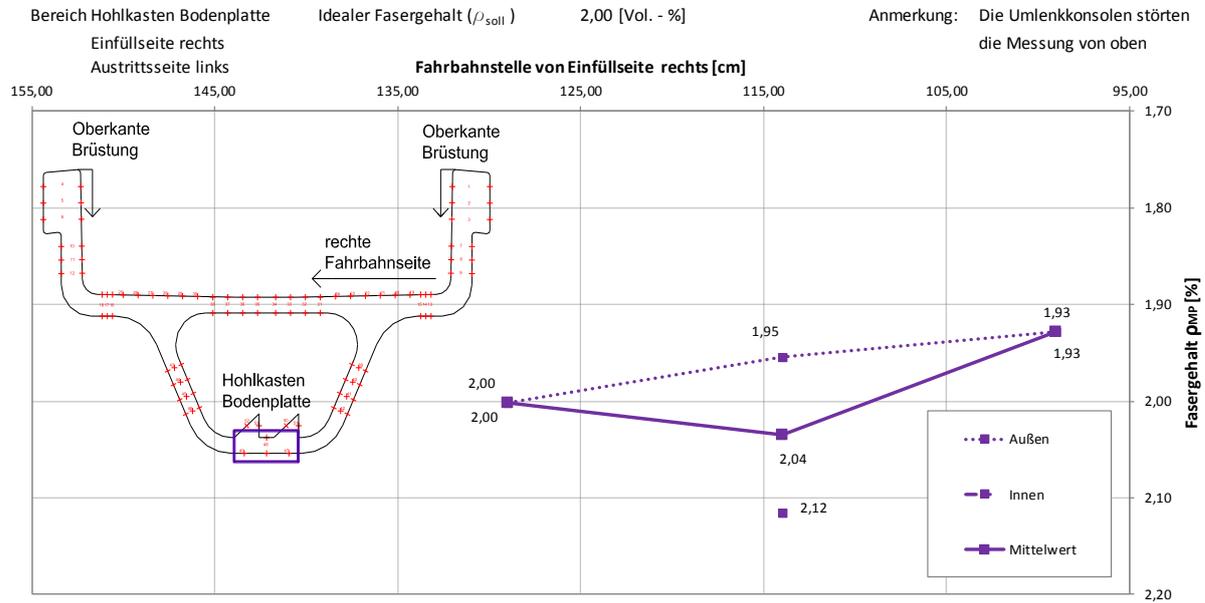
Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,58 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.11 Hohlkasten Bodenplatte

Ermittlung der Faserverteilung durch FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016



Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen					
					0°	45°	90°	135°	MW außen	außen	MW	innen	MW innen	0°	45°	90°	135°	
					[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	
47	99,00				4,02	4,06	3,58	3,97	3,91	1,93	1,93							
48	114,00	175,00		10	4,61	3,69	3,29	4,25	3,96	1,95	2,04	2,12	4,29	5,48	4,28	3,27	4,12	
49	129,00				4,76	4,12	3,53	3,81	4,06	2,00	2,00							

Legende:							
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung			90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung			135°	135° zur Fließrichtung

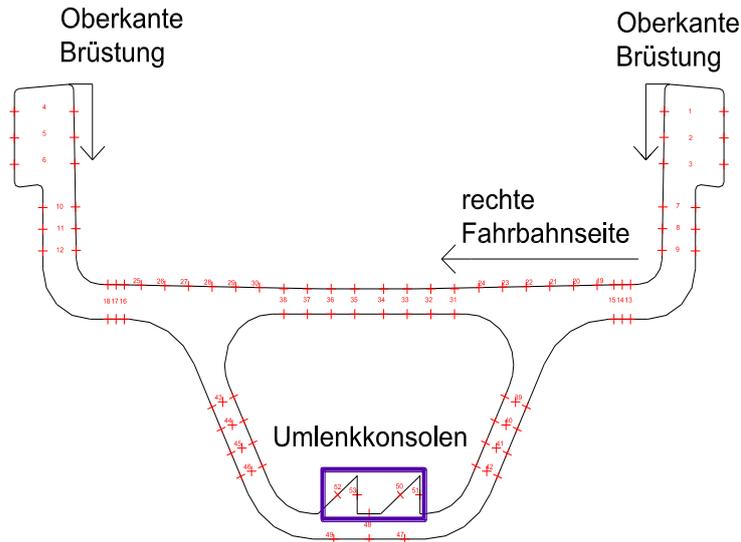
Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 4,05 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} \quad [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.12 Umlenkconsolen

Ermittlung der Faserverteilung durch FibreScan - Method

Datum: 23.03.2016

 Bereich Umlenkconsolen
 Einfüllseite rechts
 Austrittsseite links
 Idealer Fasergehalt (ρ_{soll}) 2,00 [Vol. - %]


Umlenkconsole rechts

Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen					
					0° [mH]	45° [mH]	90° [mH]	135° [mH]	MW außen [mH]	außen [Vol.-%]	MW [Vol.-%]	innen [Vol.-%]	MW innen [mH]	0° [mH]	45° [mH]	90° [mH]	135° [mH]	
50	100,00	162,50	Schräge	10,30	4,23	3,73	3,04	3,77	3,69		1,89							
51	92,40		Vertikal	0,83	4,86	3,90	3,50	3,96	4,06		2,07							

Umlenkconsole links

Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} außen					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} innen					
					0° [mH]	45° [mH]	90° [mH]	135° [mH]	MW außen [mH]	außen [Vol.-%]	MW [Vol.-%]	innen [Vol.-%]	MW innen [mH]	0° [mH]	45° [mH]	90° [mH]	135° [mH]	
52	127,50	162,50	Schräge	10,30	4,76	4,18	3,45	4,13	4,13		2,11							
53	118,90		Vertikal	0,83	4,22	3,68	3,30	3,83	3,76		1,92							

Legende:							
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung			90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung			135°	135° zur Fließrichtung

 Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,91 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.13 Stirnseite Brüstung oberer Bereich

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method (Induktivitätsmessung)

Datum: 23.03.2016

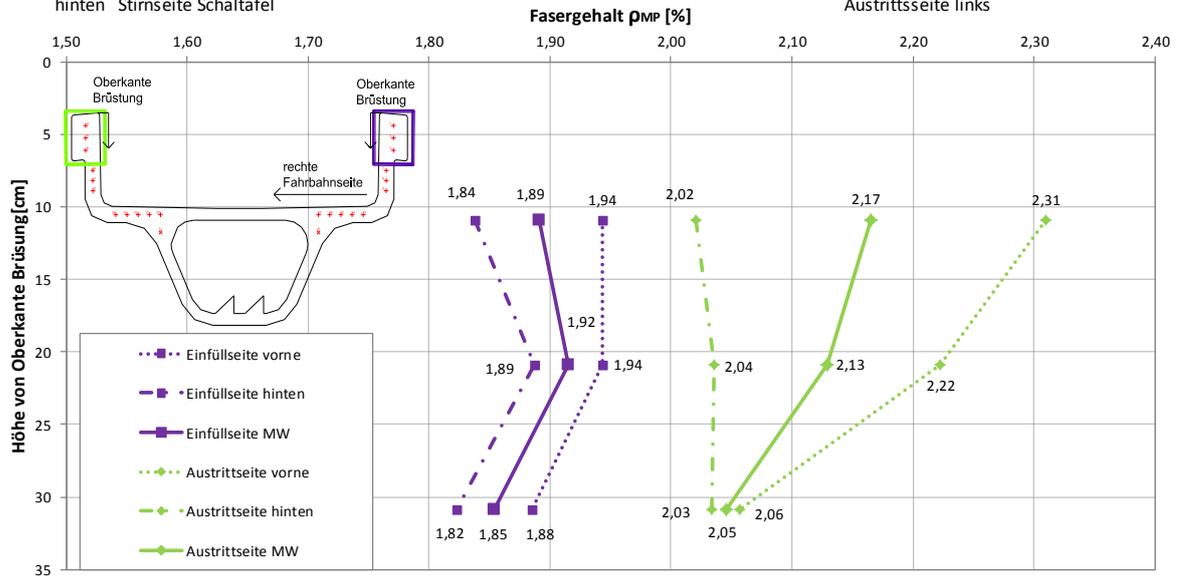
Bereich: Stirnseite Brüstung oberer Bereich

Idealer Fasergehalt (ρ_{soll})

2,00 [Vol. - %]

vorne Stirnseite Plexiglas
hinten Stirnseite Schalttafel

Einfüllseite rechts
Austrittsseite links



Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} vorne					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} hinten				
				0°	45°	90°	135°	MW vorne	vorne	MW	hinten	MW hinten	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
1	10,90	Einfüllseite	50	3,20	3,80	3,89	3,32	3,55	1,94	1,89	1,84	3,36	3,72	3,33	3,05	3,34
2	20,90	Einfüllseite	50	3,65	3,95	3,46	3,15	3,55	1,94	1,92	1,89	3,45	3,83	3,75	3,04	3,18
3	30,90	Einfüllseite	50	3,89	3,87	3,00	3,02	3,45	1,88	1,85	1,82	3,33	3,56	3,87	3,06	2,84

Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} vorne					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} hinten				
				0°	45°	90°	135°	MW vorne	vorne	MW	hinten	MW hinten	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
4	10,90	Austrittsseite	50	3,92	4,19	4,03	4,75	4,22	2,31	2,17	2,02	3,69	3,78	3,60	3,65	3,74
5	20,90	Austrittsseite	50	4,00	4,16	4,20	3,89	4,06	2,22	2,13	2,04	3,72	3,83	3,73	3,62	3,70
6	30,90	Austrittsseite	50	3,65	3,74	3,85	3,80	3,76	2,06	2,05	2,03	3,72	3,75	3,71	3,65	3,76

Legende:									
MW	Mittelwert		0°	entlang der Fließrichtung			90°	waagrecht zur Fließrichtung	
			45°	45° zur Fließrichtung			135°	135° zur Fließrichtung	

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,66 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.14 Stirnseite Brüstung unterer Bereich

**Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method (Induktivitätsmessung)**

Datum: 23.03.2016

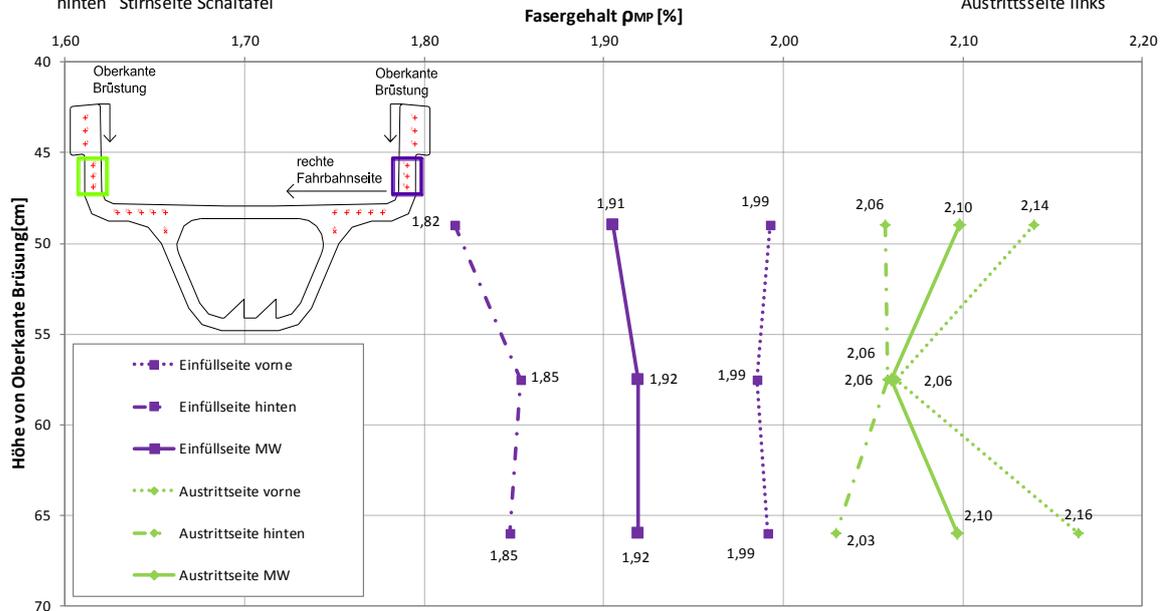
Bereich: Stirnseite Brüstung oberer Bereich

Idealer Fasergehalt (ρ_{soll})

2,00 [Vol. - %]

vorne Stirnseite Plexiglas
hinten Stirnseite Schalttafel

Einfüllseite rechts
Austrittsseite links



Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} vorne				Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} hinten					
				0°	45°	90°	135°	MW vorne	vorne	MW	hinten	MW hinten	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
7	49,00	Einfüllseite	50	4,18	3,43	2,47	3,07	3,29	1,99	1,91	1,82	3,00	3,80	3,07	2,30	2,82
8	57,50	Einfüllseite	50	4,08	3,25	2,44	3,33	3,28	1,99	1,92	1,85	3,06	3,77	3,12	2,32	3,02
9	66,00	Einfüllseite	50	4,09	3,18	2,52	3,35	3,29	1,99	1,92	1,85	3,05	3,75	3,16	2,35	2,93

Messpunkt [MP]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} vorne				Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} hinten					
				0°	45°	90°	135°	MW vorne	vorne	MW	hinten	MW hinten	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
10	49,00	Austrittsseite	50	4,03	3,44	3,00	3,65	3,53	2,14	2,10	2,06	3,39	3,90	3,43	2,81	3,43
11	57,50	Austrittsseite	50	4,04	3,32	2,76	3,49	3,40	2,06	2,06	2,06	3,40	4,09	3,15	2,96	3,38
12	66,00	Austrittsseite	50	4,31	3,60	2,95	3,42	3,57	2,16	2,10	2,03	3,35	4,07	3,32	2,71	3,29

Legende:					
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung	90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung	135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,30 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.15 Stirnseite Zweigstelle rechte Seite

Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method (Induktivitätsmessung)

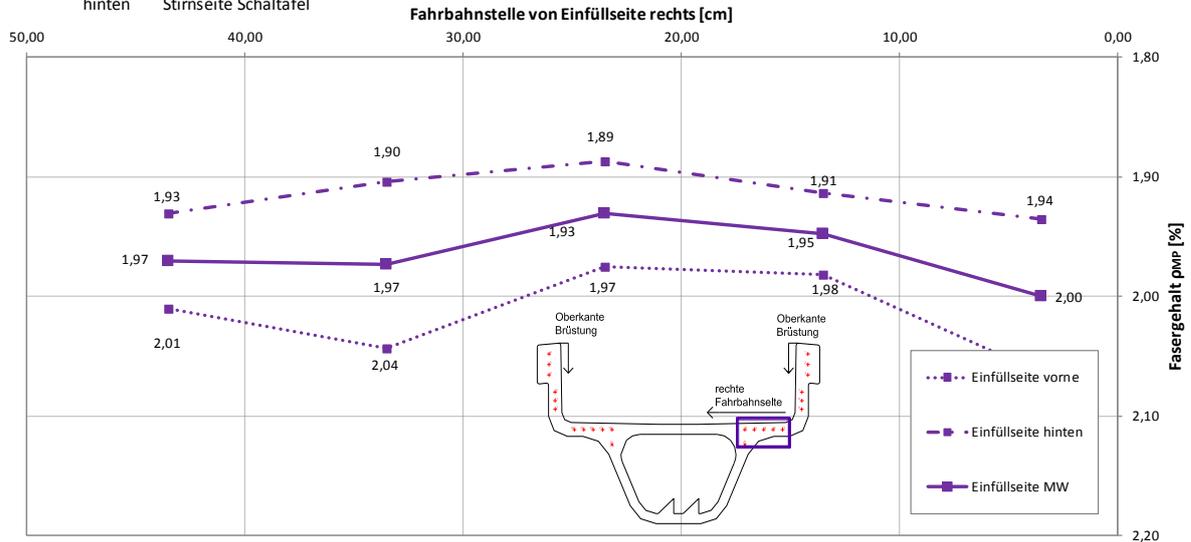
Datum: 23.03.2016

Bereich: Stirnseite Auskragung, Zweigstelle Einfüllseite rechts

Idealer Fasergehalt (ρ_{soll})

2,00 [Vol. - %]

vorne Stirnseite Plexiglas
hinten Stirnseite Schalttafel



Mess- punkt [MP]	Fahrbahn- stelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Seite	Dicke [cm]	ΔL_{MP} vorne					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} hinten				
					0°	45°	90°	135°	MW vorne	vorne	MW	hinten	MW hinten	0°	45°	90°	135°
					[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
13	3,50		Einfüllseite	50	4,49	3,59	2,88	3,58	3,64	2,06	2,00	1,94	3,41	4,14	3,40	2,71	3,38
14	13,50				4,41	3,24	2,63	3,68	3,49	1,98	1,95	1,91	3,37	4,05	3,49	2,63	3,31
15	23,50	86,50			4,22	3,23	2,76	3,70	3,48	1,97	1,93	1,89	3,32	4,08	3,01	2,68	3,52
16	33,5				4,17	3,33	3,07	3,82	3,60	2,04	1,97	1,90	3,35	3,99	3,20	2,67	3,55
17	43,50				3,98	3,49	3,19	3,50	3,54	2,01	1,97	1,93	3,40	3,85	3,25	3,02	3,48
18	43,50	101,50			4,08	3,60	3,54	4,21	3,86	2,19	2,18	2,16	3,81	4,20	3,59	3,53	3,92

Legende:					
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung	90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung	135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,52 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} \quad [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

A.4.16 Stirnseite Zweigstelle linke Seite

**Ermittlung der Faserverteilung durch
FibreScan - Method (Induktivitätsmessung)**

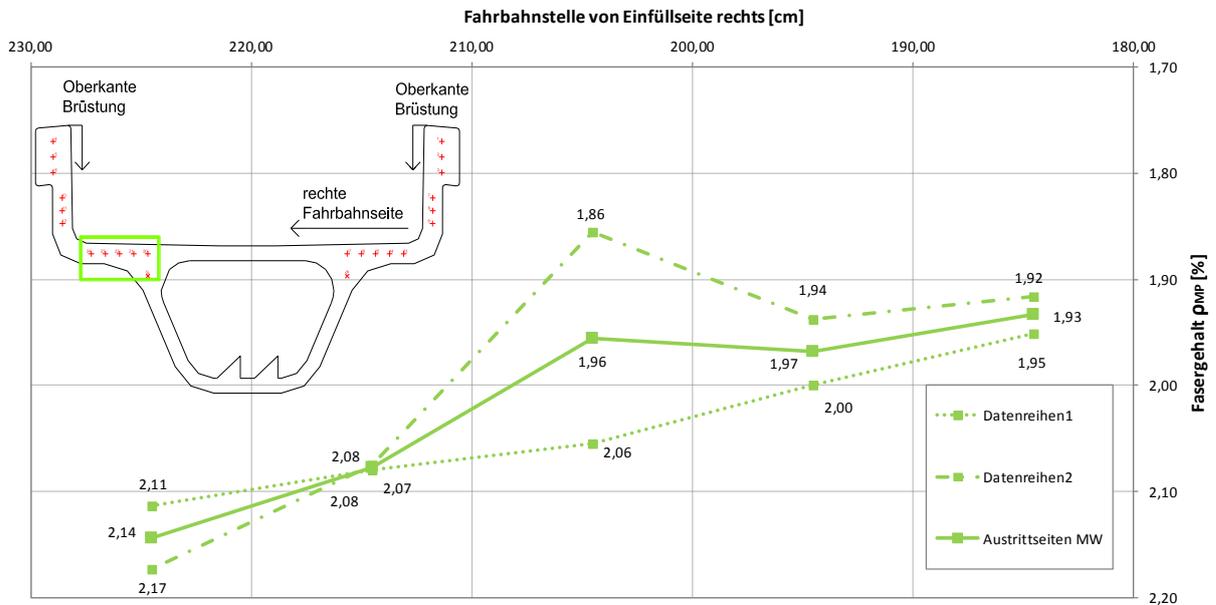
Datum: 23.03.2016

Bereich: Stirnseite Auskrugung, Zweigstelle Austrittsseite links

Idealer Fasergehalt (ρ_{Soll})

2,00 [Vol. - %]

vorne Stirnseite Plexiglas
hinten Stirnseite Schalttafel



Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Dicke [cm]	ΔL_{MP} vorne					Fasergehalt ρ_{MP}			ΔL_{MP} hinten				
				0°	45°	90°	135°	MW vorne	vorne	MW	hinten	MW hinten	0°	45°	90°	135°
				[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
19	174,50	101,50	50	3,98	3,24	2,48	3,03	3,18	1,90	1,92	1,94	3,25	4,02	3,33	2,49	3,15
20	184,50			3,95	3,12	2,65	3,33	3,26	1,95	1,93	1,92	3,21	3,85	3,10	2,52	3,35
21	194,50			3,95	3,52	2,75	3,16	3,35	2,00	1,97	1,94	3,24	3,75	3,02	2,76	3,43
22	204,50	86,50		3,86	3,62	3,02	3,25	3,44	2,06	1,96	1,86	3,10	3,53	3,10	2,77	3,01
23	214,50			3,97	3,75	3,01	3,18	3,48	2,08	2,08	2,07	3,47	3,96	3,41	3,00	3,51
24	224,50			3,76	3,87	3,38	3,13	3,54	2,11	2,14	2,17	3,64	4,01	3,54	3,21	3,78

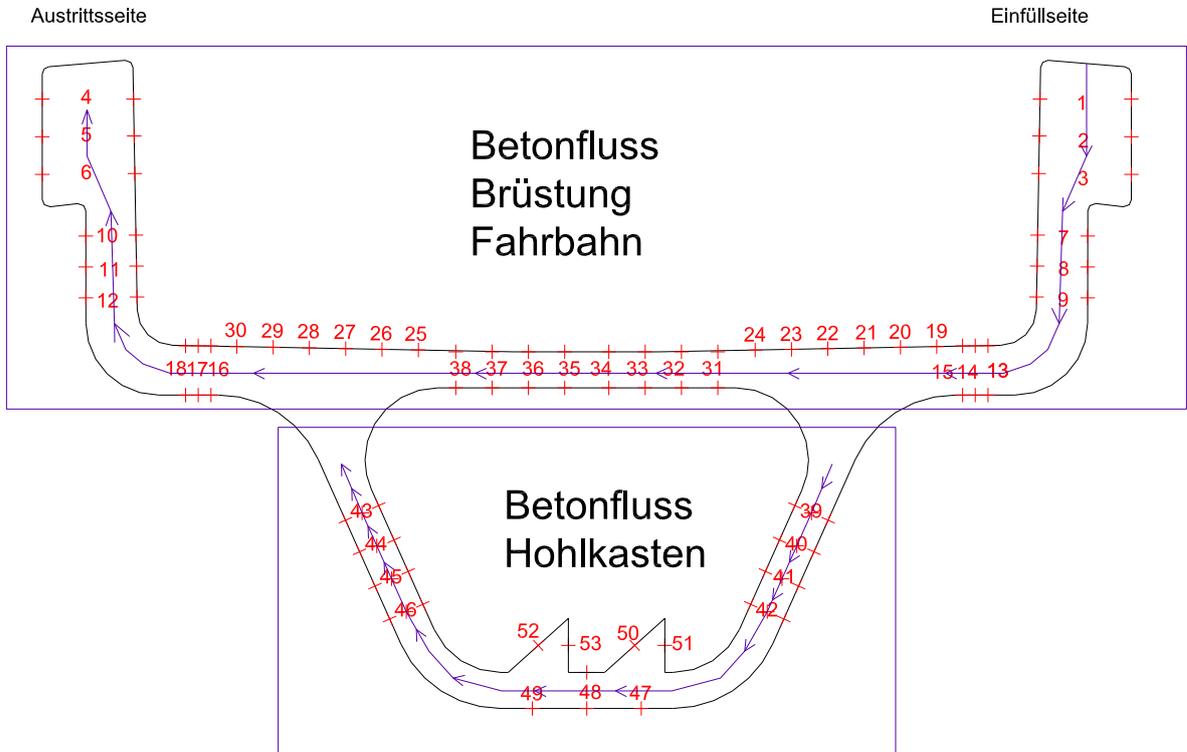
Legende:			
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung
		90°	waagrecht zur Fließrichtung
		135°	135° zur Fließrichtung

Mittelwert aller gemessenen Werte $\Delta L_{MP,alle}$: 3,35 [mH]

$$\rho_{MP} = \Delta L_{MP,MW} \times \frac{\rho_{Soll}}{\Delta L_{MW,alle}} \quad [\%] \quad \text{Gl. (1)}$$

Anhang A.5 Faserorientierung Datenblätter

A.5.1 Messpunkte Betonfluss Fahrbahn und Hohlkasten



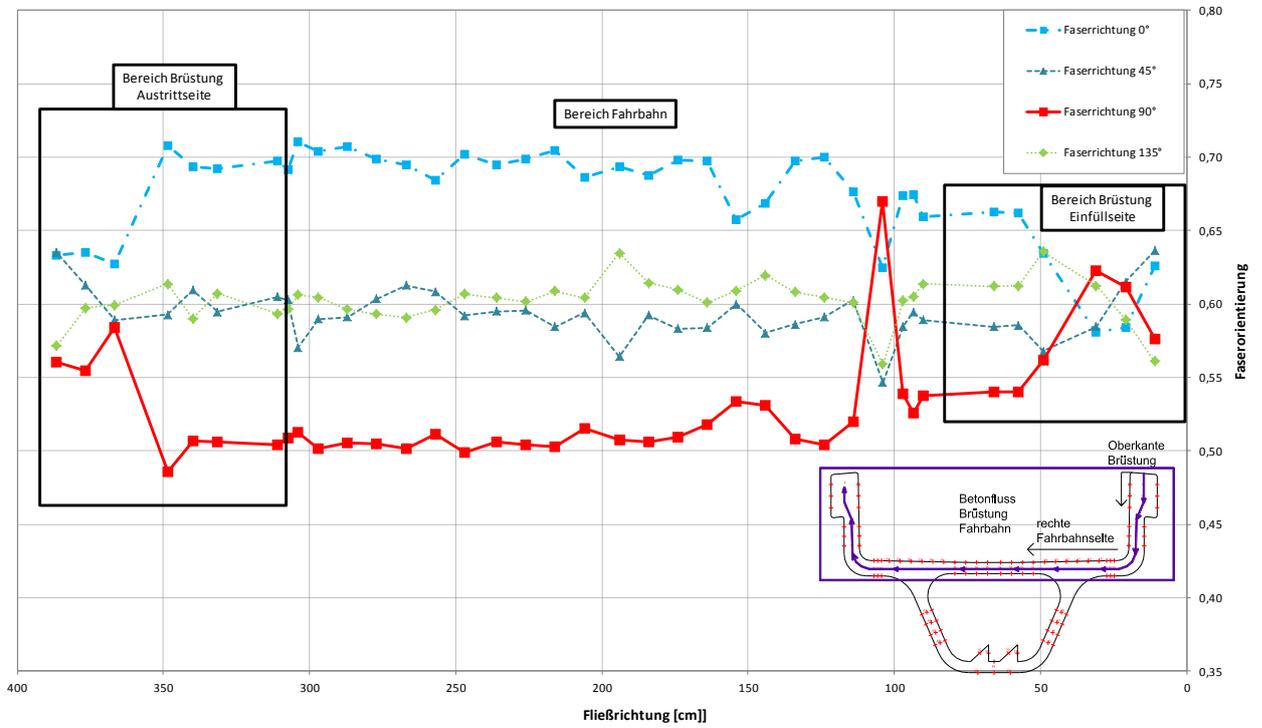
A.5.2 Betonfluss Brüstung Fahrbahn

Ermittlung der Faserorientierung durch FibreScan - Method
(Induktivitätsmessung)

Datum: 23.03.2016

Bereich: Brüstung oberer Betonfluss (Brüstung - Fahrbahn)
Einfüllseite rechts
Austrittsseite links

Faserorientierungsbeiwert η_{iso} 0,6



	Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Flussstränge (Umfang Brüstung Fahrbahn) [cm]	η außen				ΔL_{MP} MW außen [mH]	Mittelwerte η				ΔL_{MP} MW innen [mH]	η innen			
					0°	45°	90°	135°		MW 0°	MW 45°	MW 90°	MW 135°		0°	45°	90°	135°
Brüstung oberer Bereich Einfüllseite	1		10,90	10,90	0,62	0,63	0,58	0,57	3,55	0,63	0,64	0,58	0,56	3,48	0,64	0,64	0,57	0,55
	2	0,00	20,90	20,90	0,57	0,63	0,62	0,59	3,56	0,58	0,62	0,61	0,59	3,40	0,60	0,60	0,60	0,59
	3		30,90	30,90	0,54	0,58	0,66	0,61	3,53	0,58	0,58	0,62	0,61	3,28	0,62	0,59	0,58	0,61
Brüstung unterer Bereich Einfüllseite	7		49,00	49,00	0,63	0,57	0,56	0,65	3,64	0,63	0,57	0,56	0,64	3,26	0,64	0,57	0,57	0,63
	8	0,00	57,50	57,50	0,67	0,58	0,54	0,61	3,41	0,66	0,59	0,54	0,61	3,25	0,66	0,59	0,54	0,61
	9		66,00	66,00	0,66	0,59	0,54	0,61	3,45	0,66	0,58	0,54	0,61	3,16	0,66	0,58	0,54	0,61
Fahrbahn Auskrängung Einfüllseite	13	3,50		90,00	0,66	0,58	0,54	0,63	3,02	0,66	0,59	0,54	0,61	3,71	0,66	0,60	0,54	0,60
	14	7,00	86,50	93,50	0,67	0,59	0,53	0,61	3,04	0,67	0,59	0,53	0,61	3,75	0,67	0,60	0,53	0,60
	15	10,50		97,00	0,67	0,59	0,53	0,61	3,01	0,67	0,58	0,54	0,60	3,65	0,67	0,58	0,55	0,60
Fahrbahn Zweigstelle Einfüllseite	19	17,50		104,00	0,62	0,55	0,67	0,56	3,31	0,62	0,55	0,67	0,56					
	20	27,50		114,00	0,68	0,60	0,52	0,60	3,34	0,68	0,60	0,52	0,60					
	21	37,50	86,50	124,00	0,70	0,59	0,50	0,60	3,51	0,70	0,59	0,50	0,60					
	22	47,5		134,00	0,70	0,59	0,51	0,61	3,55	0,70	0,59	0,51	0,61					
	23	57,50		144,00	0,67	0,58	0,53	0,62	3,05	0,67	0,58	0,53	0,62					
	24	67,50		154,00	0,66	0,60	0,53	0,61	3,25	0,66	0,60	0,53	0,61					
Fahrbahn	31	78,00		164,00	0,71	0,58	0,50	0,62	3,14	0,70	0,58	0,52	0,60	3,77	0,69	0,58	0,54	0,59
	32	88,00		174,00	0,68	0,58	0,52	0,61	3,16	0,70	0,58	0,51	0,61	3,63	0,71	0,58	0,50	0,61
	33	98,00		184,00	0,69	0,60	0,51	0,60	3,08	0,69	0,59	0,51	0,61	3,59	0,69	0,58	0,50	0,63
	34	108,00	86,00	194,00	0,70	0,58	0,51	0,62	3,16	0,69	0,56	0,51	0,63	3,63	0,69	0,55	0,51	0,65
	35	120,00		206,00	0,68	0,60	0,53	0,58	3,16	0,69	0,59	0,52	0,60	3,67	0,69	0,58	0,50	0,62
	36	130,00		216,00	0,70	0,58	0,51	0,61	3,18	0,70	0,58	0,50	0,61	3,75	0,71	0,58	0,50	0,61
	37	140,00		226,00	0,70	0,59	0,51	0,60	3,17	0,70	0,60	0,50	0,60	3,65	0,70	0,60	0,50	0,60
	38	150,00		236,00	0,69	0,59	0,51	0,61	3,26	0,69	0,60	0,51	0,60	3,57	0,69	0,60	0,51	0,60
Fahrbahn Zweigstelle Austrittsseite	25	160,50		247,00	0,70	0,59	0,50	0,61	3,28	0,70	0,59	0,50	0,61					
	26	170,50		257,00	0,68	0,61	0,51	0,60	3,33	0,68	0,61	0,51	0,60					
	27	180,50	86,50	267,00	0,69	0,61	0,50	0,59	3,58	0,69	0,61	0,50	0,59					
	28	190,50		277,00	0,70	0,60	0,50	0,59	3,46	0,70	0,60	0,50	0,59					
	29	200,50		287,00	0,71	0,59	0,51	0,60	3,42	0,71	0,59	0,51	0,60					
	30	210,50		297,00	0,70	0,59	0,50	0,60	3,21	0,70	0,59	0,50	0,60					
Fahrbahn Auskrängung austrittsseite	16	217,50		304,00	0,71	0,61	0,48	0,60	3,16	0,71	0,57	0,51	0,61	3,92	0,71	0,53	0,54	0,61
	17	221,00	86,50	307,50	0,69	0,60	0,51	0,60	3,15	0,69	0,60	0,51	0,60	4,10	0,69	0,61	0,50	0,59
	18	224,50		311,00	0,70	0,61	0,51	0,59	3,03	0,70	0,60	0,50	0,59	4,09	0,70	0,60	0,50	0,60
Brüstung unterer Bereich Austrittsseite	12		66,00	331,50	0,68	0,60	0,51	0,61	3,74	0,69	0,59	0,51	0,61	3,61	0,70	0,59	0,50	0,60
	11	0,00	57,50	340,00	0,68	0,61	0,52	0,60	3,67	0,69	0,61	0,51	0,59	3,60	0,71	0,61	0,50	0,58
	10		49,00	348,50	0,70	0,59	0,49	0,62	4,08	0,71	0,59	0,49	0,61	3,48	0,71	0,60	0,48	0,61
Brüstung oberer Bereich Austrittsseite	6		30,90	366,60	0,59	0,58	0,63	0,61	3,61	0,63	0,59	0,58	0,60	3,72	0,67	0,60	0,54	0,59
	5	0,00	20,90	376,60	0,62	0,62	0,56	0,60	3,92	0,64	0,61	0,55	0,60	3,70	0,65	0,61	0,55	0,60
	4		10,90	386,60	0,63	0,63	0,56	0,58	3,76	0,63	0,64	0,56	0,57	3,55	0,63	0,64	0,56	0,56

Legende:							
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung		90°	waagrecht zur Fließrichtung	
		45°	45° zur Fließrichtung		135°	135° zur Fließrichtung	

$$n_x = \frac{\Delta L_x - \Delta L_{MW,MP}}{\Delta L_{MW,MP}} \times n_{iso} + n_{iso} \quad \text{Gl (5)}$$

A.5.3 Betonfluss Hohlkasten

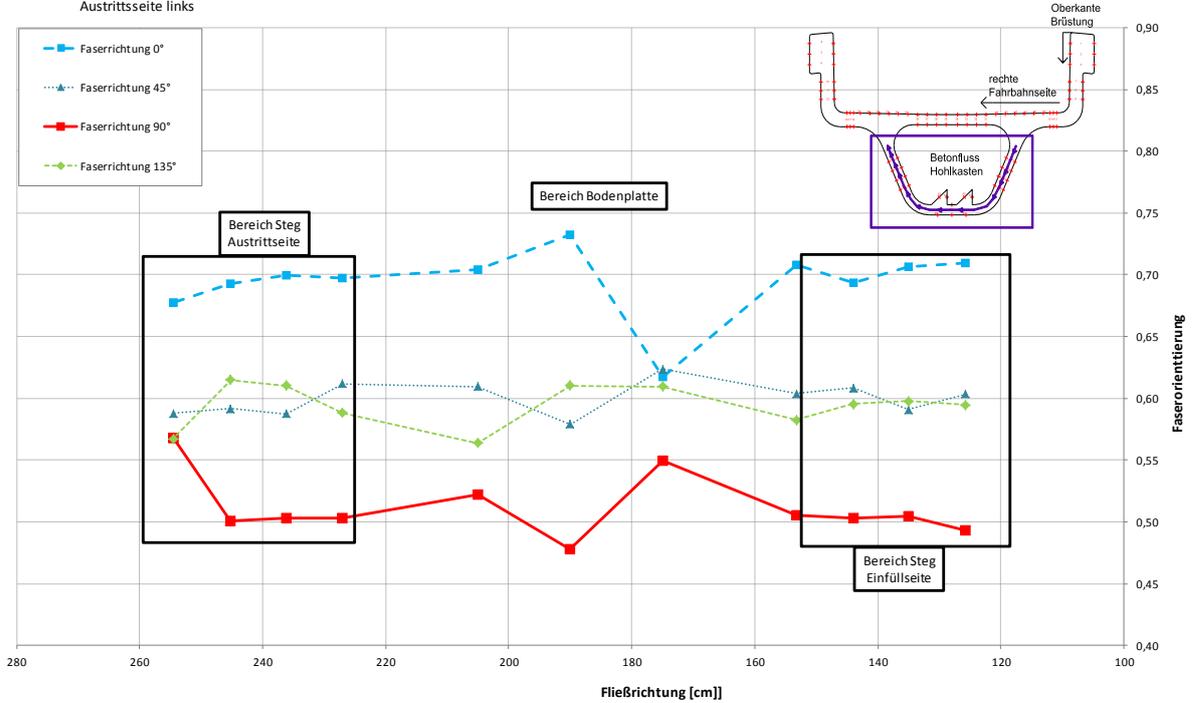
Ermittlung der Faserverteilung durch FibreScan - Method
(Induktivitätsmessung)

Datum: 23.03.2016

Bereich: Hohlkasten Betonfluss
Einfüllseite rechts
Austrittsseite links

Faserorientierungsbeiwert η_{iso}

0,6



	Messpunkt [MP]	Fahrbahnstelle von rechts [cm]	Höhe von Oberkante Brüstung [cm]	Flussstränge (Umfang Brüstung Fahrbahn) [cm]	η außen				ΔL_{MP} MW außen [mH]	Mittelwerte η					ΔL_{MP} MW innen [mH]	η innen			
					0°	45°	90°	135°		MW 0°	MW 45°	MW 90°	MW 135°	0°		45°	90°	135°	
Hohlkasten Steg Einfüllseite	39	52,10	125,70	125,70	0,71	0,60	0,50	0,59	3,11	0,71	0,60	0,49	0,59	3,19	0,71	0,60	0,49	0,60	
	40	54,7	135,00	135,00	0,69	0,60	0,53	0,58	3,45	0,71	0,59	0,50	0,60	3,28	0,72	0,58	0,48	0,61	
	41	60,30	144,00	144,00	0,68	0,61	0,52	0,59	3,77	0,69	0,61	0,50	0,60	3,33	0,71	0,60	0,49	0,60	
	42	64,30	153,20	153,20	0,70	0,61	0,51	0,58	3,72	0,71	0,60	0,51	0,58	3,34	0,72	0,60	0,50	0,58	
Bodenplatte	47	99,00		175,00	0,62	0,62	0,55	0,61	3,91	0,62	0,62	0,55	0,61						
	48	114,00	180,00	190,00	0,70	0,56	0,50	0,64	3,96	0,73	0,58	0,48	0,61	4,29	0,77	0,60	0,46	0,58	
	49	129,00		205,00	0,70	0,61	0,52	0,56	4,06	0,70	0,61	0,52	0,56						
Hohlkasten Steg Austrittsseite	46	163,70	153,20	227,00	0,68	0,61	0,51	0,60	4,10	0,70	0,61	0,50	0,59	3,46	0,71	0,61	0,50	0,58	
	45	167,80	144,00	236,20	0,69	0,59	0,51	0,61	4,10	0,70	0,59	0,50	0,61	3,46	0,71	0,58	0,50	0,61	
	44	171,90	135,00	245,20	0,69	0,60	0,51	0,60	4,00	0,69	0,59	0,50	0,61	3,46	0,70	0,58	0,50	0,63	
	43	175,90	125,70	254,50	0,69	0,60	0,51	0,59	3,97	0,68	0,59	0,57	0,57	3,55	0,66	0,57	0,62	0,54	

Legende:						
MW	Mittelwert	0°	entlang der Fließrichtung		90°	waagrecht zur Fließrichtung
		45°	45° zur Fließrichtung			135°

$$n_x = \frac{\Delta L_x - \Delta L_{MW,MP}}{\Delta L_{MW,MP}} \times n_{iso} + n_{iso} \quad \text{Gl (5)}$$

Anhang A.6 Betonage Versuchsträger M1:2

A.6.1 Beton

Es wurde der Selbe UHPC verwendet wie bei den Befüllversuchen zuvor jedoch mit mehr Stahlfasern 2,00 Vol.-%. Für die vollständige Befüllung der Schalung werden diesmal $0,825\text{m}^3$ Beton benötigt plus eine zusätzliche Menge für die Festbetonprüfung erstellten Würfel und Zylinder und Platten.

A.6.2 Mischung

Für die Herstellung werden dieselben Materialien und Mischer verwendet, wie bei den Befüllversuchen zuvor.

A.6.3 Betonierprotokoll

An dieser Stelle werden nur die auftretende Zwischenfälle und die ermittelten Frischbetoneigenschaften beschrieben. Die Mischzeiten betragen ca. 20 – 25 Minuten. Genauerer Angaben zum Mischzyklus, wann welches Material und wie lange vermischt wurde, werden nicht preisgegeben.

Diesmal kam es bei der Zugabe der Stahlfasern zu keine Igelbildung, da man die Fasern vorsichtig hineinstreute.

Es wurden keine Frischbetonprüfungen durchgeführt

A.6.4 Mischzusammensetzung

Einsatzstoff		Gehalt [kg/m³]	Stoffraum [dm³/m³]	Ansatz: 97.0 Ltr.	
Zielsetzmaß auf trockener Platte	> 220 mm			Baustelle:	
Verdichtung	F52			Labor für konstruktiven	
Verdichtungsdauer	-			Ingenieurbau - LKI	
Gesamtmenge	97.0 Liter			Infieldgasse 24	
Herstelldatum:				8010 Graz	
Lufttemperatur				Bauteil: Schubversuche	
Ausbreitmaß mit Fasern	> 50 cm			2016-04-20 Quickway-Test - Modellversuch	
Luftporengehalt in V%=Luftg.	2.0 %	--	20.0	mit trockenen Ausgangsstoffen	Berücksichtigung des Wassers in Zuschlägen
Lafarge CEM I 52.5 N Contragress	z	720	236.1	69.84 kg	69.84 kg
RW Füller Q1	MS	13.00 %	93.6	41.6	9.08 kg
Quarzmehl Dorsilit 16900		39.61 %	285.2	107.6	27.66 kg
Wasser w/z-Wert (äqu.)	w	0.2525	181.8	162.1	15.73 kg
Zusatzmittel					
BT3 Prement H500	FM	3.50 %	25.20	23.55	2.444 kg
BT3 Premtard VZG 100		0.20 %	1.44	1.35	0.140 kg
BT3 Premaad Foam EX T	LP	0.20 %	1.4	1.35	0.140 kg
Leim (Vol.%)			591.0		
Stahlfaseer					
Bekaert OL 13/0.16 mm	SF	2.00 Vol.-%	157.0	20.0	15.23 kg
Gesteinkörnung			389.0		
I. Geba Quartzpowder 100 - 200 µm		25.0 %	258	97.3	25.00 kg
II. Dorsilit Nr. 8 (0.3 - 0.8) mm		75.0 %	773	291.8	75.00 kg
II. Basaltdelsplitt 2-4 mm		0.0 %	0	0.0	0.00 kg
IV.		0.0 %	0	0.0	0.00 kg
Summe Zuschlag		100 %			
Beton			2479	1000.0	Setzfließmaß (mm)
w/z-Wert		0.25		Vw/Vp =	0.472
w/b-Wert (w/(z+SFA))		0.22			
Rohdichten		ρ_d			ρ_d
1	Geba Quartzpowder 100 - 200 µm	2.650	Wassergehalt= 0.00%	Lafarge CEM I 52.5 N Contragress	3.050
2	Quarzsand 0.3-0.8 mm	2.650	Wassergehalt= 0.00%	RW Füller Q1	2.250
3	Basaltdelsplitt	3.050	Wassergehalt= 0.00%	Quarzmehl Dorsilit 16900	2.650
4	Stahlfaser	7.850	Wassergehalt= 0.00%	BT3 Prment H500	1.070
Anmerkung:					
Träger	825 l				
LKI	78 l				
4 DAfStb-Balken	63 l				
Summe	966 l				
	10 Mischen à 97 l				

Institut für Betonbau
Lessingstraße 25/1
8010 Graz
Tel.: +43 (0)316 873 - 6191



A.6.5 Mischprozess

Der theoretische Mischablauf läuft folgend ab.

- Vor Mischbeginn: Zugabe der Feinstoffe
- Beim Mischen: Zugabe von Wasser, Verzögerer und Fließmittel (ohne Zuschalten des Wirblers), Mischzeit 1 min
- Zuschalten des Wirblers, Mischzeit 3 min.
- Zugabe der Grobstoffe (ohne Zuschalten des Wirblers), Mischzeit 3 min.
- Zugabe der Stahlfasern (einsieben)
- Zugabe des Entschäumers, (ohne Zuschalten des Wirblers) Mischzeit 1 min.

Änderungen des Mischprozesses sind dem Betonierprotokoll zu entnehmen.

A.6.6 Betonierprotokoll: (QUICKWAY Herstellung Versuchsträger)

Datum: 20.04.2016

Protokoll: Gerhard Santner, (Mischer: Eirich)
Valentino Sliskovic, (Mischer: Zyklus)

<u>Beteiligte:</u>	Mischer (Zyklus):	Hannes Koitz
	Befüller (für Zyklus):	Bernhard Freytag, Roswitha Marius
	Mischer (Eirich):	Philipp Hadl
	Befüller (für Eirich):	Daniel Nigitz, Johannes Oppeneder
	Scheibtruhe:	Uwe Fülöp
	Kran & Befülltrog:	Reinhard Holzschuster
	Material Einwiegen:	Christoph Mosinz

Ablauf allgemein:

Mischen mit Eirich & Zyklus; je 5 Mischungen zu 96L

Zwischenlagerung in Befülltrog (Betonierplatz vor Eirich); Transport m. Scheibtruhen

Mischen und Frischbetonprüfung:

M1	ZYKLOS (– 200g Wasser gegenüber Rezeptur)
12:12	Befüllung / Feinstoffe
12:16	Mischbeginn / Wasserzugabe + Fließmittel (Fließmittel leicht verschüttet, wurde nachgebessert)
12:17	Zugabe Verzögerer
12:21	Quarzsand – 3min mischen nachdem alles befüllt ist
12:25	Faserzugabe – Zugabe durch Rieseln – Dauer: 7min
12:32	Entschäumer – 1 min mischen
12:36	Entleerung erfolgte in 2 Fahren mit 3 min Abstand

M2	ZYKLOS (– 300g Wasser gegenüber Rezeptur)
12:40	Befüllung / Feinstoffe
12:42	Mischbeginn / Wasserzugabe + Fließmittel + Verzögerer
12:46	Quarzsand
12:50	Faserzugabe – Dauer: 7 min
12:58	Entschäumer
13:00	Entleerung

M3	ZYKLOS (– 300g Wasser gegenüber Rezeptur)
13:05	Befüllung / Feinstoffe
13:07	Mischbeginn / Wasserzugabe+ Fließmittel + Verzögerer
13:11	Quarzsand + zusätzlich 1kg Quarzmehl
13:15	Faserzugabe
13:22	Entschäumer
13:26	Zusätzlich 1 kg Quarzmehl
13:30	Entleerung

M4	ZYKLOS (– 300g Wasser gegenüber Rezeptur)
13:34	Befüllung / Feinstoffe + 2kg Quarzmehl
13:36	Mischbeginn / Wasserzugabe+ Fließmittel + Verzögerer
13:41	Quarzsand
13:45	Faserzugabe
13:52	Entschäumer
13:53	Entleerung

M5	ZYKLOS (– 300g Wasser gegenüber Rezeptur)
13:58	Befüllung / Feinstoffe + 2 kg Quarzmehl
13:59	Mischbeginn / Wasserzugabe+ Fließmittel + Verzögerer
14:03	Quarzsand
14:07	Faserzugabe
14:13	Entschäumer
14:15	Entleerung

M1	EIRICH (– 200g Wasser gegenüber Rezeptur)
12:15	Befüllung: Feinstoffe
12:17	Mischbeginn: Wasserzugabe + Fließmittel + Verzögerer (450 U/min)
12:21	Zugabe Quarzsand (bei gestoppten Mischer) (150 U/min)
12:25 – 12:32	Zugabe Stahlfasern
12:33	Zugabe Entschäumer (150 U/min)
12:34	Stop
12:37 – 12:40	Entleerung, Probenentnahme für Biegeproben 1 Zylinder.

M2	EIRICH (– 300g Wasser + 1 kg Quarzmehl gegenüber Rezeptur)
12:43	Befüllung: Feinstoffe
12:44	Mischbeginn: Wasserzugabe + Fließmittel + Verzögerer
12:48	Zugabe Quarzsand
12:52 – 13:00	Zugabe Faserzugabe
13:00	Zugabe Entschäumer
13:01	Stop Entleerung (mit Mörtelträgern), Probenentnahme für Biegeprobe

M3	EIRICH (– 300g Wasser + 1 kg Quarzmehl gegenüber Rezeptur)
13:04	Befüllung: Feinstoffe
13:07	Mischbeginn: Wasserzugabe + Fließmittel + Verzögerer
13:12	Zugabe Quarzsand
13:17 – 13:23	Zugabe Faserzugabe
13:23	Zugabe Entschäumer
13:24	Stop
13:26	Entleerung, Probenentnahme für Biegeprobe, 2 Zylinder

M4	EIRICH (– 300g Wasser + 1 kg Quarzmehl gegenüber Rezeptur)
13:30	Befüllung: Feinstoffe + 2kg Quarzmehl zusätzlich
13:32	Mischbeginn: Wasserzugabe + Fließmittel + Verzögerer
13:38	Zugabe Quarzsand
13:42 – 13:46	Zugabe Faserzugabe
13:48	Zugabe Entschäumer
13:49	Stop
13:50	Entleerung, Probenentnahme für Biegeprobe, 1 Zugprobe

M5	EIRICH (– 300g Wasser + 1 kg Quarzmehl gegenüber Rezeptur)
13:55	Befüllung: Feinstoffe + 2kg Quarzmehl zusätzlich
13:56	Mischbeginn: Wasserzugabe + Fließmittel + Verzögerer
14:00	Zugabe Quarzsand
14:05 – 14:12	Zugabe Faserzugabe
14:12	Zugabe Entschäumer
14:14	Stop
14:16	Entleerung, Probenentnahme für 1 Zugprobe

Anmerkungen:

Es bei der Zugabe der Stahlfasern zu keine Igelbildung, da man die Fasern vorsichtig hineinstreute.

Befüllung:

14:24 – Befülltrog wird angehoben

14:25 – Befülltrog eingehängt

14:27 – Befüllung

Frischbetonprüfung:

Es wurden keine Frischbetonprüfungen durchgeführt

Begleitproben:

Gesamt:

4 Biegeproben

2 Zugproben

6 Würfel (10/10/10)

6 Zylinder (\emptyset 10 /20)

+ 4 Biegeproben (15/15/70) für Philipp Hadl

Detail:

1 Biegeprobe, 1 Zylinder, 2 Würfel aus M1 Eirich (12:41)

1 Biegeprobe aus M2 Eirich (13:03)

1 Biegeprobe, 2 Zylinder aus M3 Eirich (13:28)

1 Biegeprobe, 1 Zugprobe aus M4 Eirich (13:53)

1 Zugprobe aus M5 Eirich (14:18)

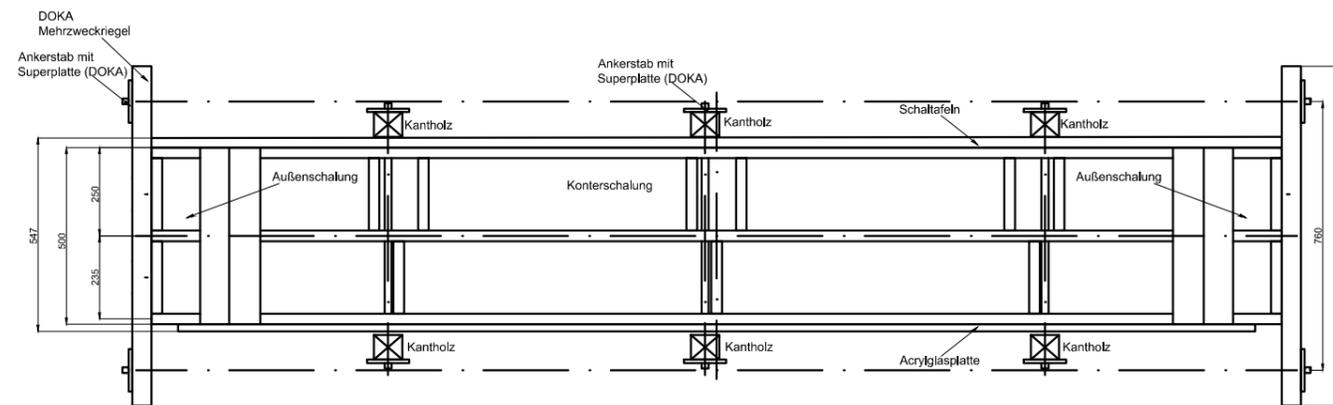
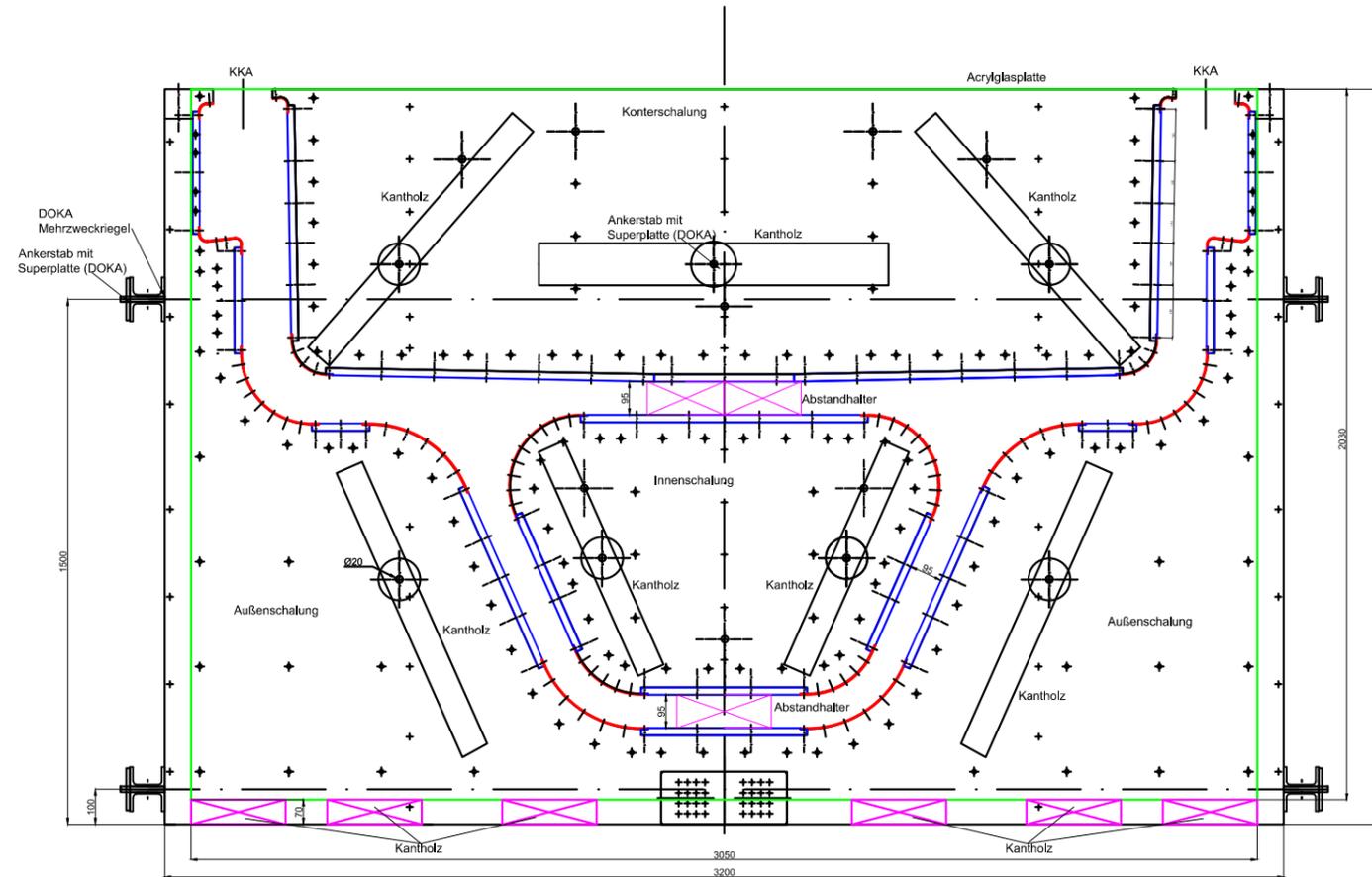
2 Würfel, 1 Zylinder aus M2 Zyklus (13:07)

2 Würfel aus M3 Zyklus (13:31)

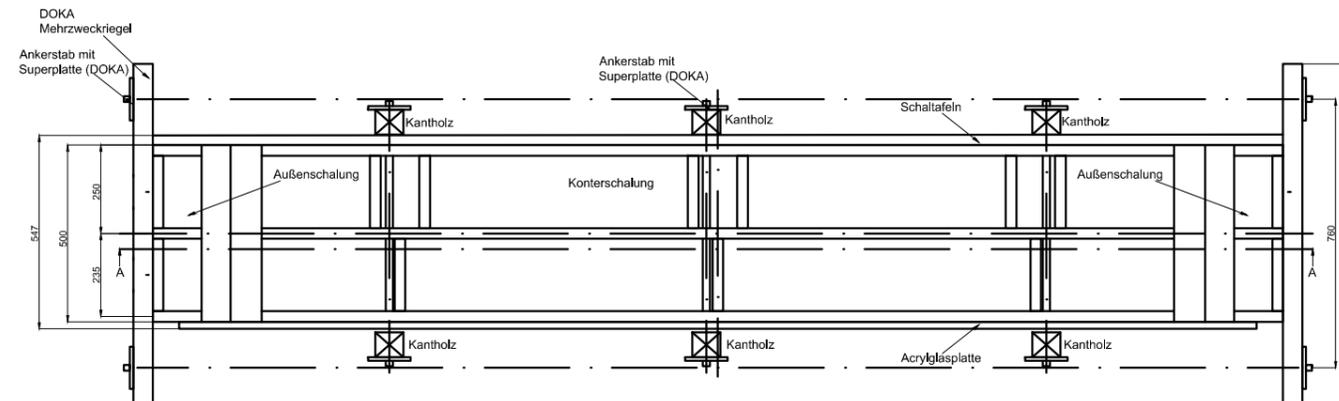
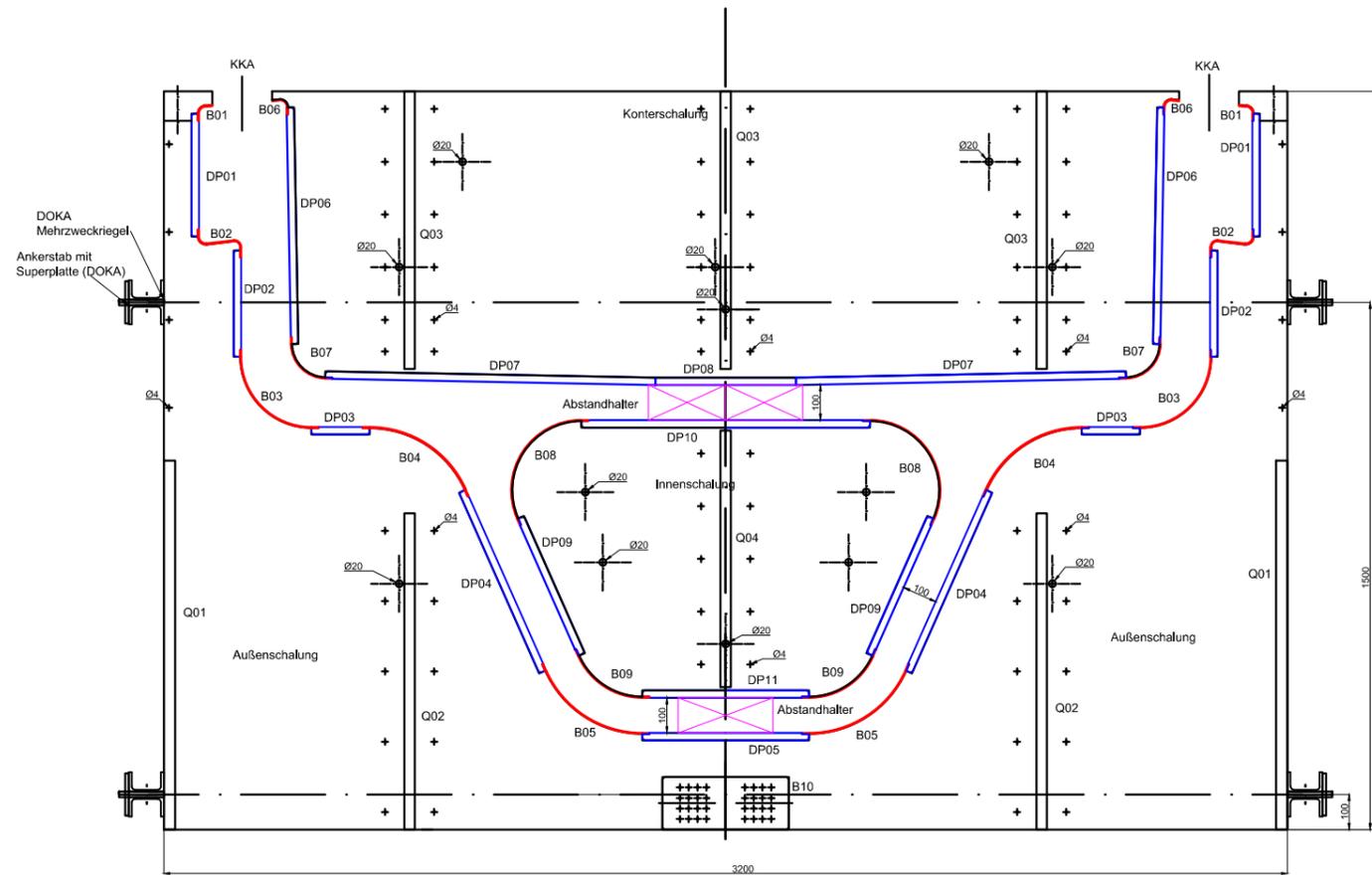
1 Zylinder aus M4 Zyklus (13:59)

1 Zylinder + 4Biegeproben (15/15/70) aus M5 Zyklus (14:20)

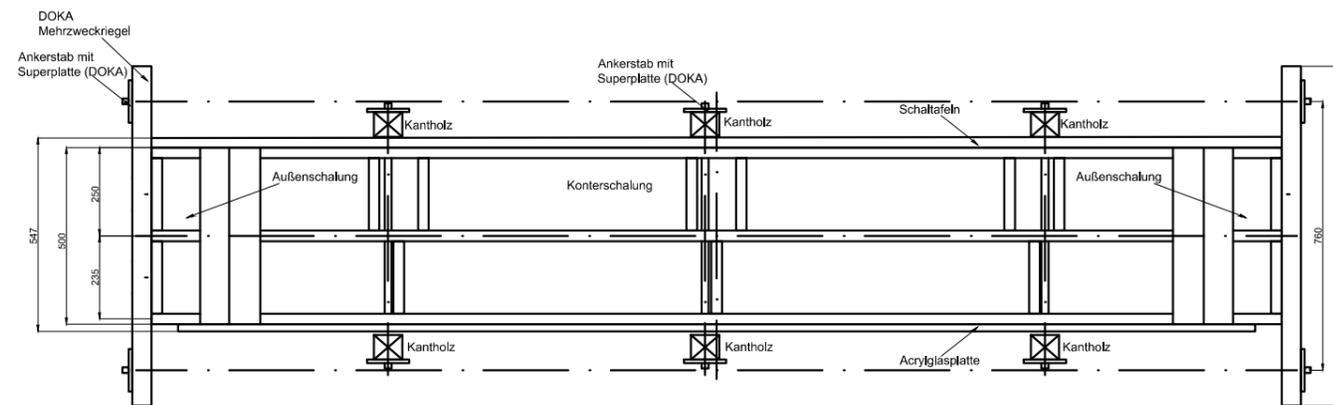
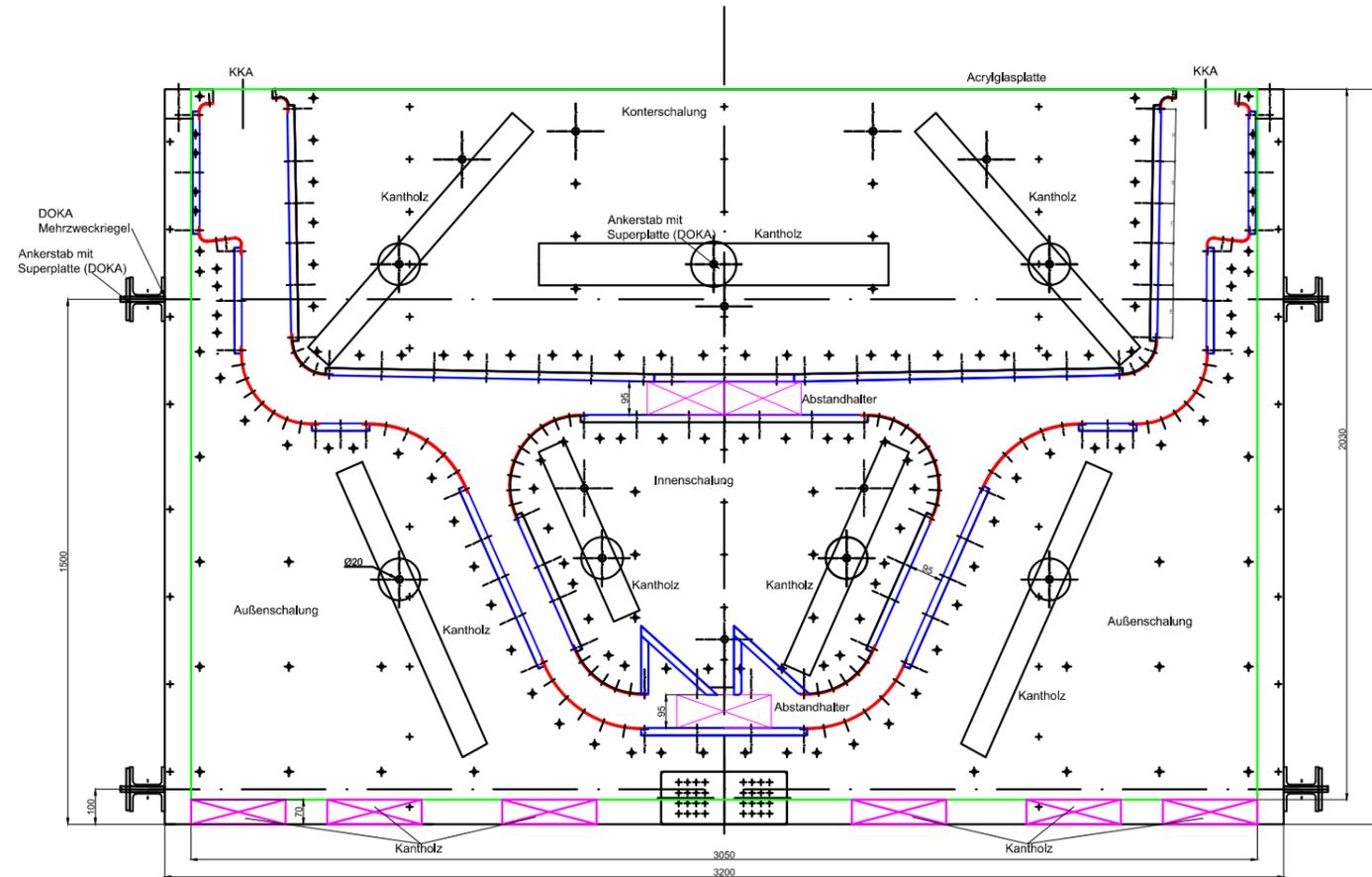
Anhang A.7 Detailpläne



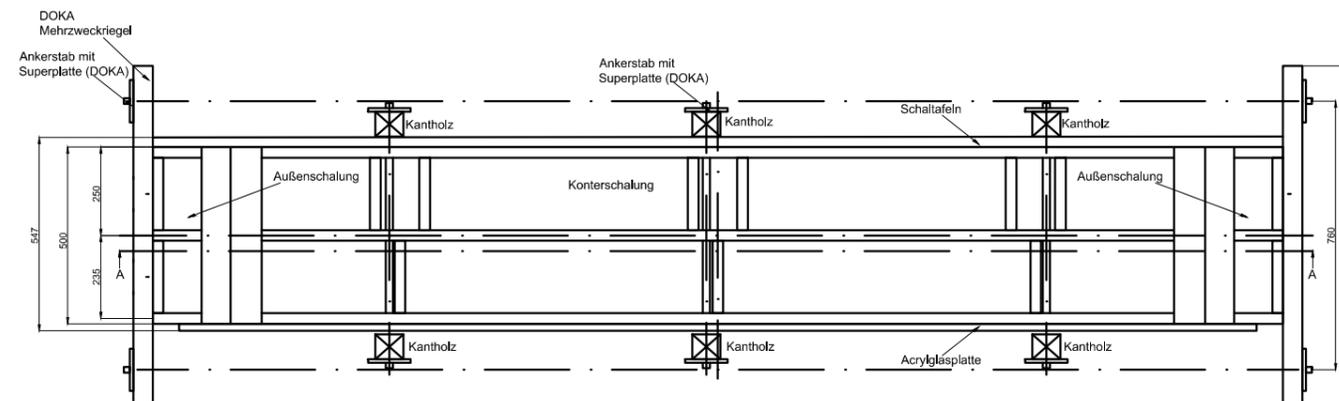
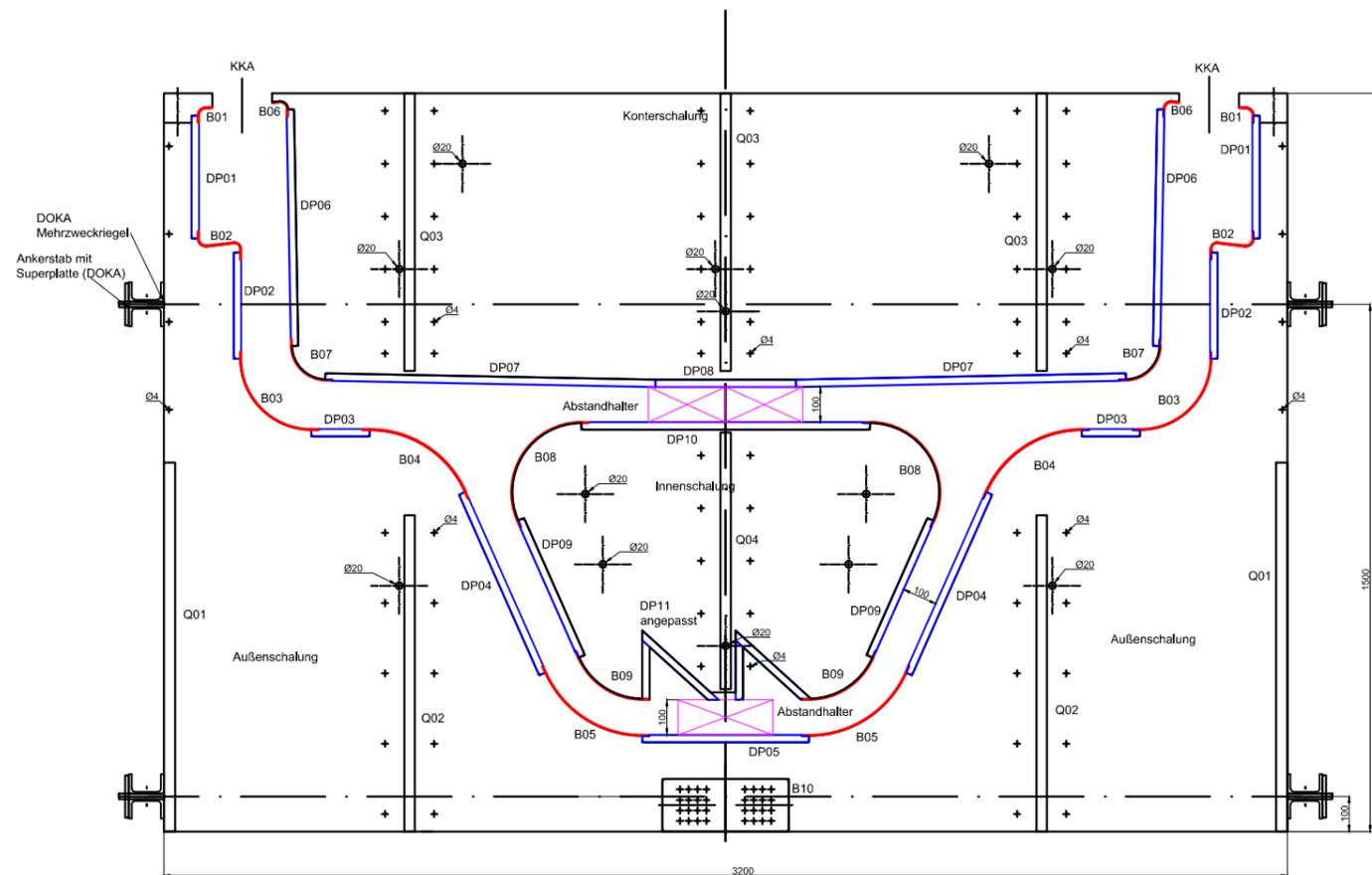
Auftraggeber: LKI Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Inffeldgasse 24 Christoph Mosinz		 Graz University of Technology 8010 Graz	Allgemeintoleranz:	Oberfläche:	Projekt: QUICKWAY
Plan-Nr.: GM1	Version: 01		Proj.-Nr.: 01	Werkstoff:	Rohmaße:
Verfasser: Mosinz	Datum: 06.10.2015	Prüfer:	Anzahl: 1	Blattgröße: 420 x 297 A3	Maßstab: 1:20
Datum: 06.10.2015		Datum: 06.10.2015	Datei: quickway_befüllversuch_1.dwg		



Auftraggeber: LKI Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Inffeldgasse 24 Christoph Mosinz		 Graz University of Technology 8010 Graz	Allgemeintoleranz:	Oberfläche:	Projekt: QUICKWAY
Plan-Nr.: GM3	Version: 01		Proj.-Nr.: 01	Werkstoff:	Rohmaße:
Verfasser: Mosinz	Prüfer:	Datum: 06.10.2015	Anzahl: 1	Blattgröße: 420 x 297 A3	Maßstab: 1:20
Datum: 06.10.2015		Datum: 06.10.2015	Datei: quickway_befüllversuch_1.dwg		

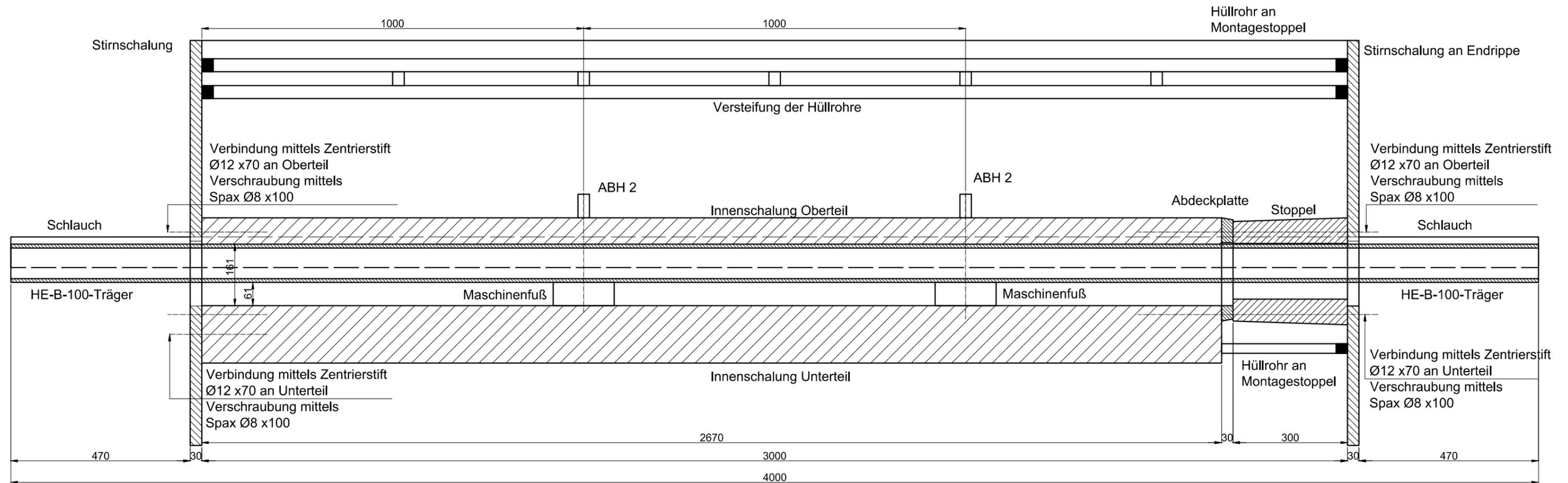


Auftraggeber: LKI Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Inffeldgasse 24 Christoph Mosinz		 Graz University of Technology 8010 Graz		Allgemeintoleranz:	Oberfläche:	Projekt: QUICKWAY	
Plan-Nr.: GM1		Version: 02	Proj.-Nr.: 01	Verfasser: Mosinz	Werkstoff:	Rohmaße:	Planinhalt: Befüllversuch 2 Gesamtmontage der Schalung, Fronansicht durch Acrylglasplatte mit Verschraubung, Maße in mm
Datum: 26.02.2016		Datum: 26.02.2016		Prüfer:	Anzahl: 1	Blattgröße: 420 x 297 A3	Maßstab: 1:20
Datei: quickway_befüllversuch_2.dwg							



Auftraggeber: LKI Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Inffeldgasse 24 Christoph Mosinz		 Graz University of Technology 8010 Graz	Allgemeintoleranz:	Oberfläche:	Projekt: QUICKWAY
Plan-Nr.: GM3	Version: 02		Proj.-Nr.: 01	Verfasser: Mosinz	Werkstoff:
Datum: 26.02.2016	Prüfer:	Anzahl: 1	Blattgröße: 420 x 297 A3	Maßstab: 1:20	Planinhalt: Befüllversuch 2 Gesamtmontage der Schalung, Schnitt mit allen Bauteilen, Maße in mm
Datum: 26.02.2016		Datei: quickway_befüllversuch_2.dwg			

Schnitt B-B
Innenschalungssystem Montage

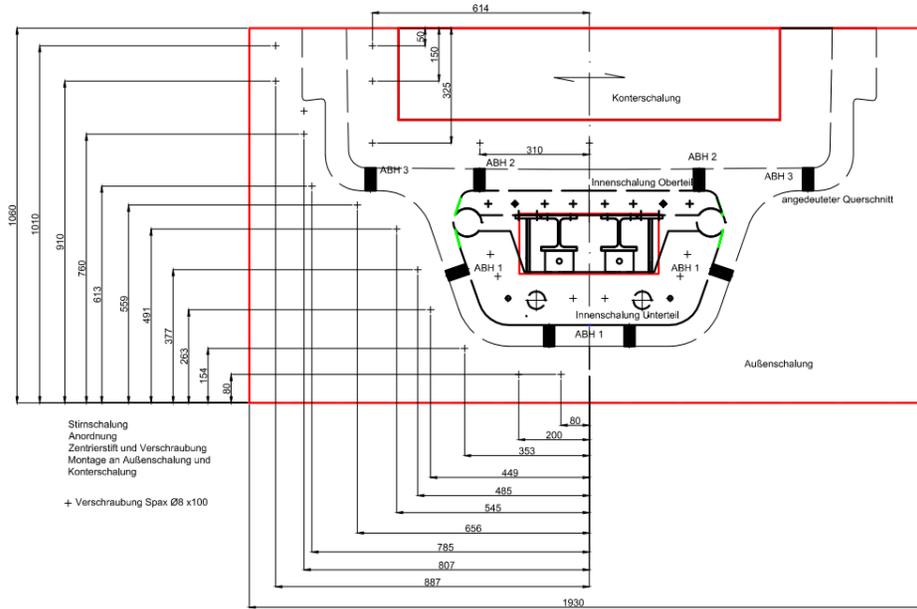


VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

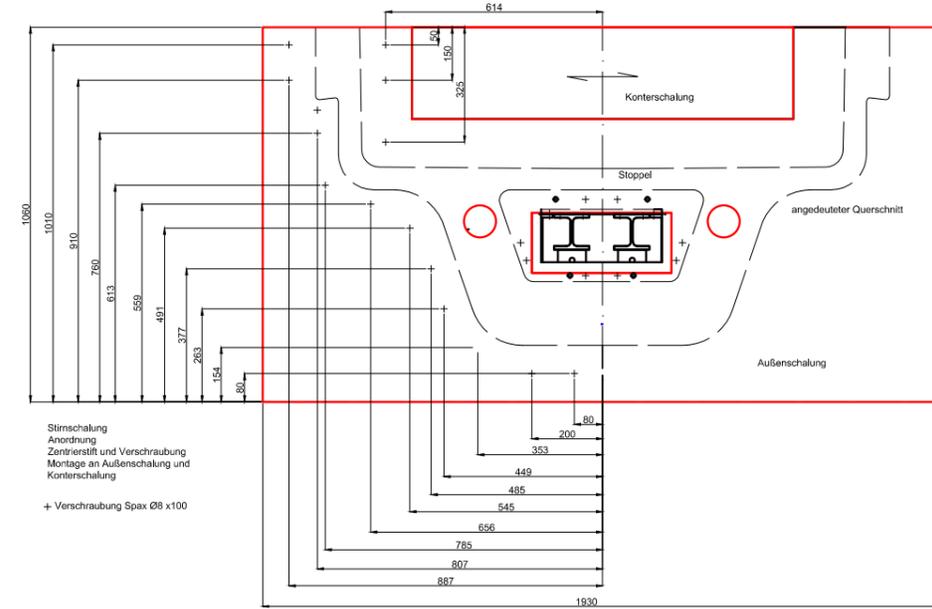
VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

Auftraggeber: LKI		 Graz University of Technology 8010 Graz		Allgemeintoleranz: ÖNORM B 2215	Oberfläche:	Projekt: QUICKWAY	
Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Inffeldgasse 24 Christoph Mosinz				Werkstoff: Brettschichtholz Fichte GL24h	Rohmaße:	Planinhalt: Großversuch Schnitt B-B Innenschalungssystem, Montage	
Plan-Nr.: IM2	Version: 01	Proj.-Nr.: 01	Verfasser: Mosinz	Prüfer:	Anzahl: 1	Blattgröße: 420 x 297 A3	Maßstab: 1:10
			Datum: 09.04.2016	Datum: 09.04.2016	Datei: quickway_großversuch_schalung_bsh.dwg		

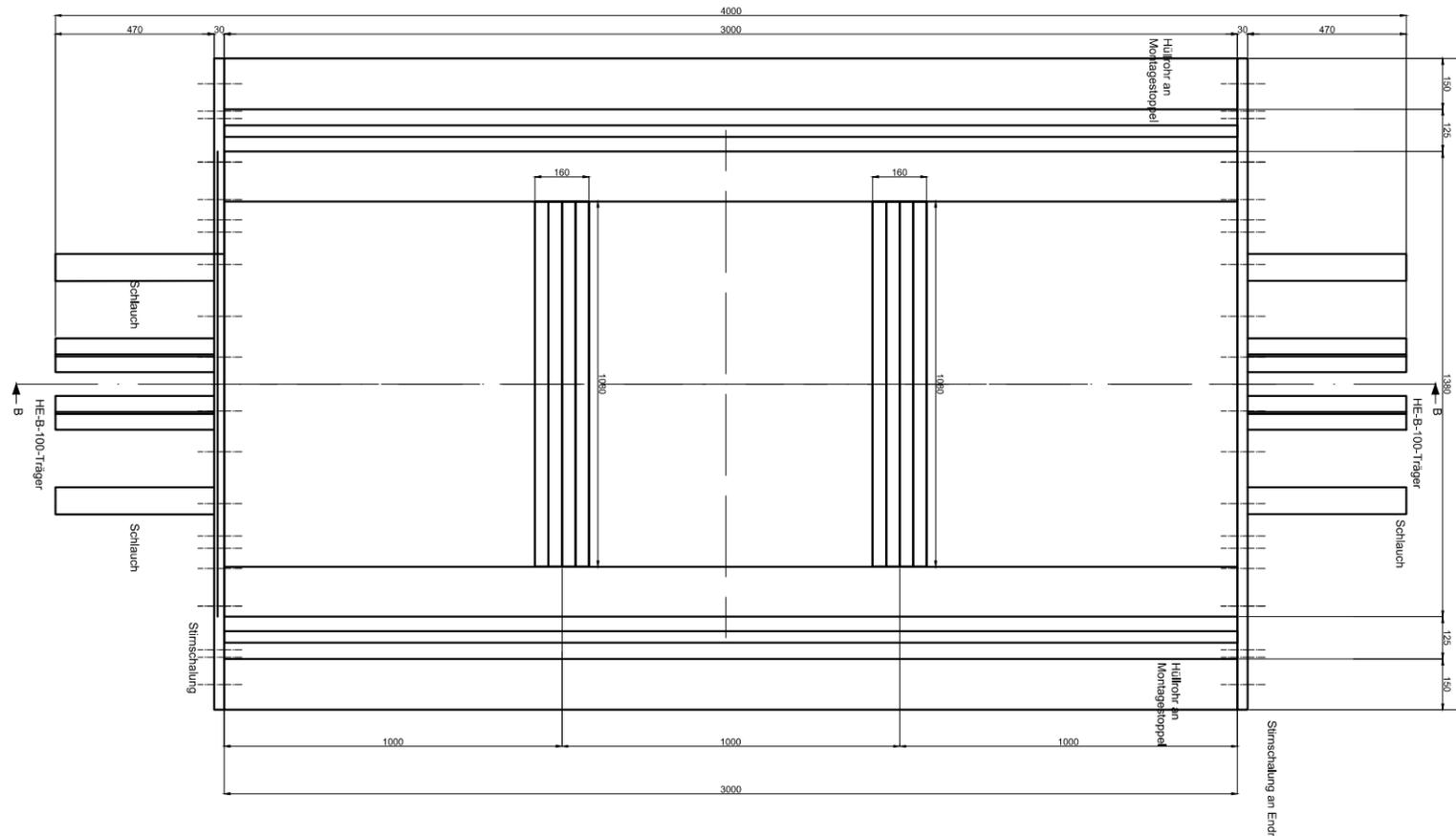
Gestamtmontage
Stirnschalung, Innenschalungssystem, Außenschalung und Konterschaltung



Gestamtmontage
Stirnschalung mit Endrippe, Innenschalungssystem, Außenschalung und Konterschaltung

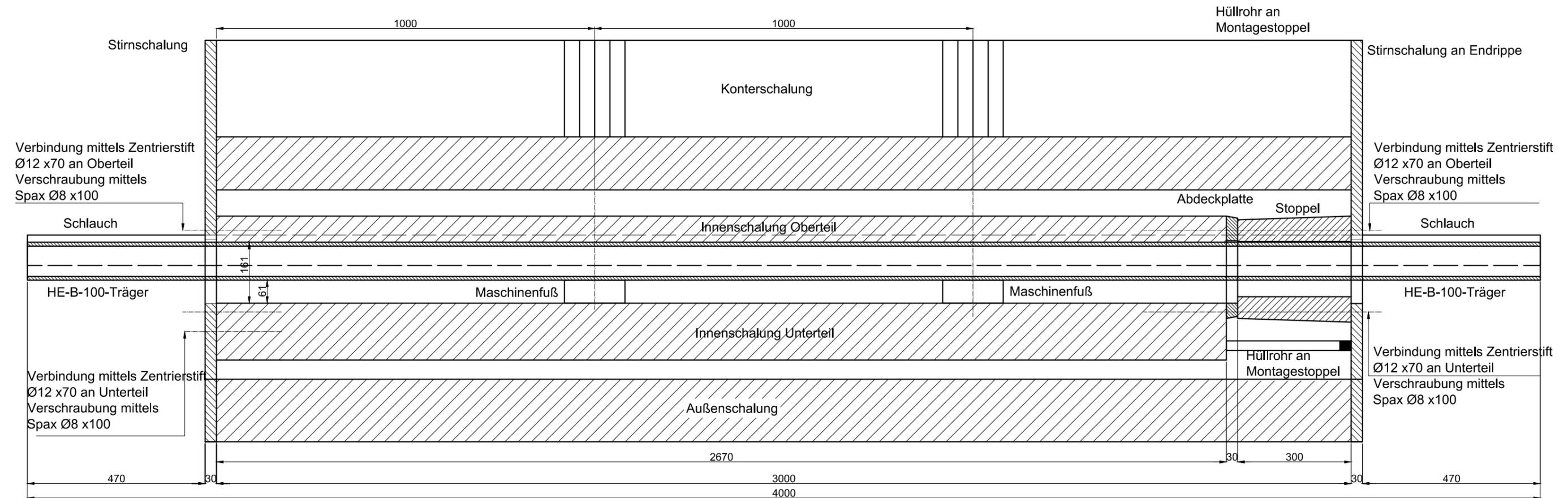


Grundriss gedreht



Auftraggeber: LKI		 Graz University of Technology 8010 Graz	Allgemeintoleranz: ÖNORM B 2215	Oberfläche:	Projekt: QUICKWAY	
Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Inffeldgasse 24 Christoph Mosinz			Werkstoff: Brettschichtholz Fichte GL24h	Rohmaße:	Planinhalt: Großversuch Gesamtmontage	
Plan-Nr.: GM1	Version: 01	Proj.-Nr.: 01	Verfasser: Mosinz	Prüfer:	Anzahl: 1	Blattgröße: 420 x 297 A3
Datum: 09.04.2016			Datum: 09.04.2016	Datei: quickway_großversuch_schalung_bsh.dwg		
Maßstab: 1:20						

Schnitt B-B
Innenschalungssystem Montage

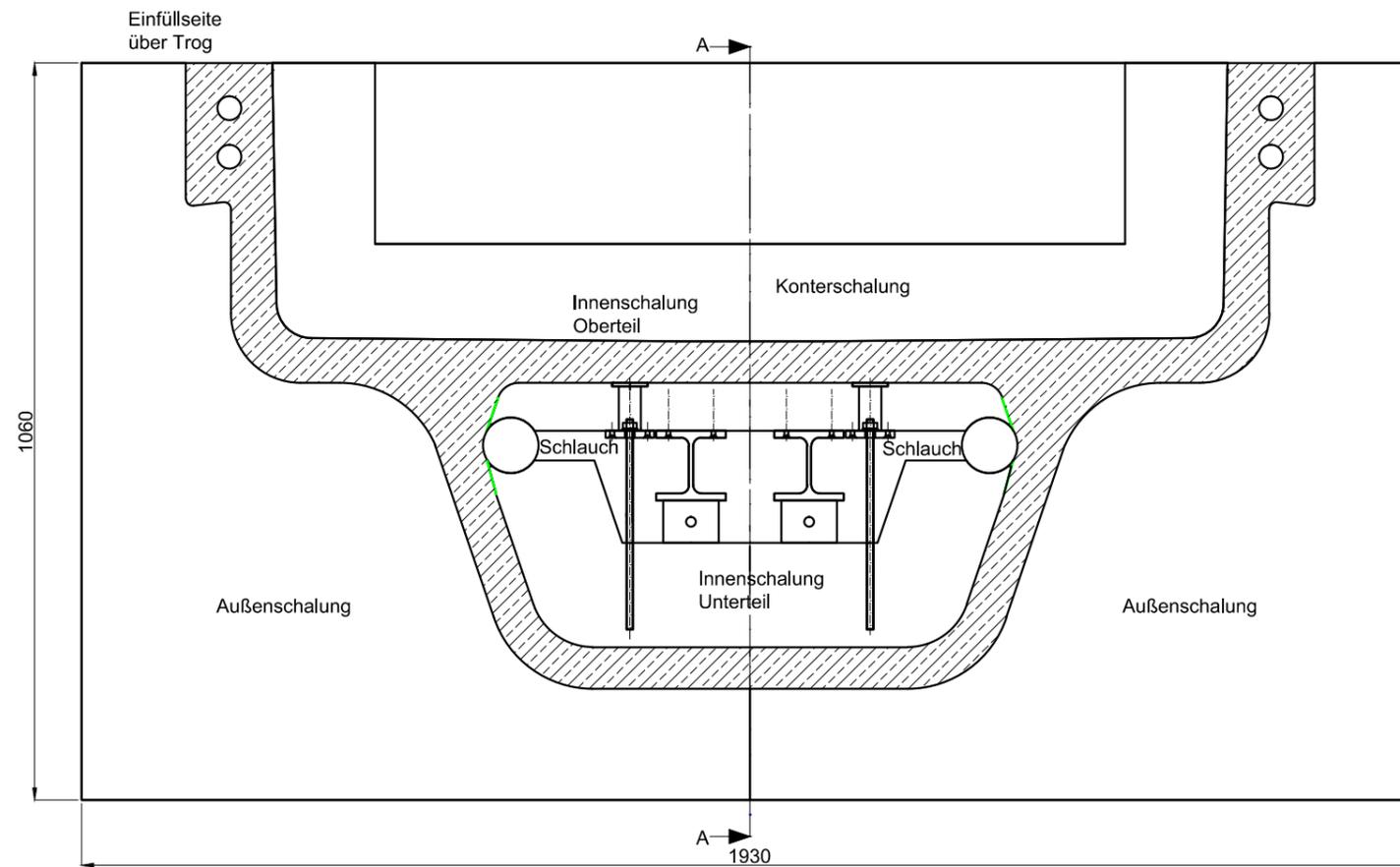


VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

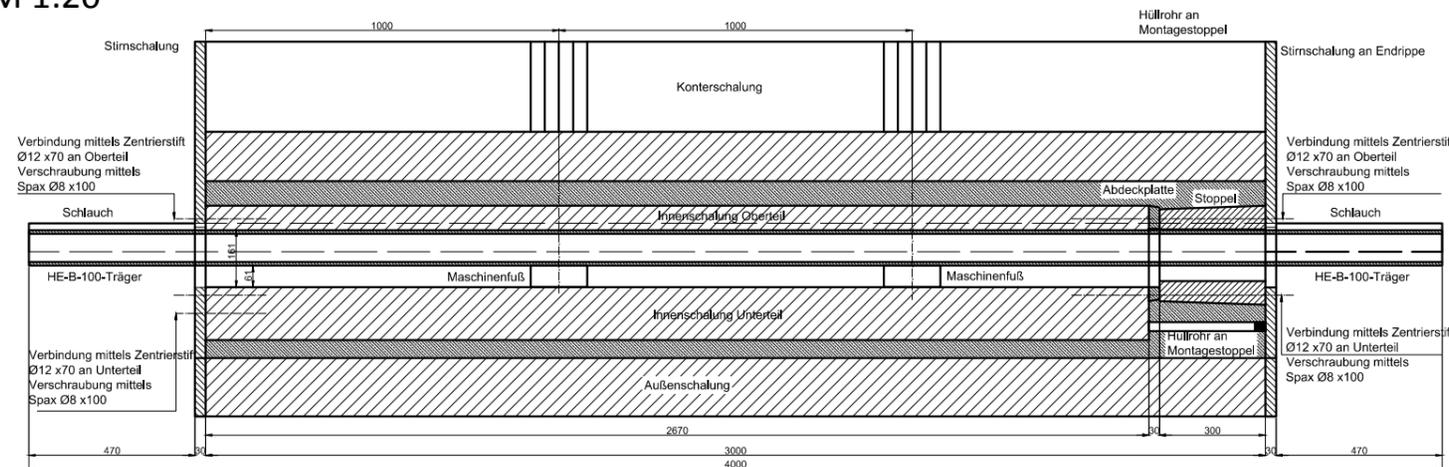
VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

Auftraggeber: LKI		 Graz University of Technology 8010 Graz		Allgemeintoleranz: ÖNORM B 2215		Oberfläche:		Projekt: QUICKWAY	
Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Inffeldgasse 24 Christoph Mosinz				Werkstoff: Brettschichtholz Fichte GL24h		Rohmaße:		Planinhalt: Großversuch Gesamtmontag	
Plan-Nr.:	Version:	Proj.-Nr.:	Verfasser:	Prüfer:	Anzahl: 1	Blattgröße:		Maßstab:	
GM2	01	01	Mosinz			420 x 297 A3		1:10	
Datum: 08.04.2016				Datum: 08.04.2016		Datei: quickway_großversuch_schalung_bsh.dwg			

Betonage



Grundriss gedreht
M 1:20



Auftraggeber: LKI Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Inffeldgasse 24 Christoph Mosinz		 Graz University of Technology 8010 Graz		Allgmeintoleranz: ÖNORM B 2215	Oberfläche:	Projekt: QUICKWAY	
Plan-Nr.: BETO		Version: 01	Proj.-Nr.: 01	Verfasser: Mosinz	Werkstoff: Brettschichtholz Fichte GL24h	Rohmaße:	Planinhalt: Großversuch Betonage
Datum: 09.04.2016		Datum: 09.04.2016		Prüfer:	Anzahl: 1	Blattgröße: 420 x 297 A3	Maßstab: 1:10
Datei: quickway_großversuch_schalung_bsh.dwg							