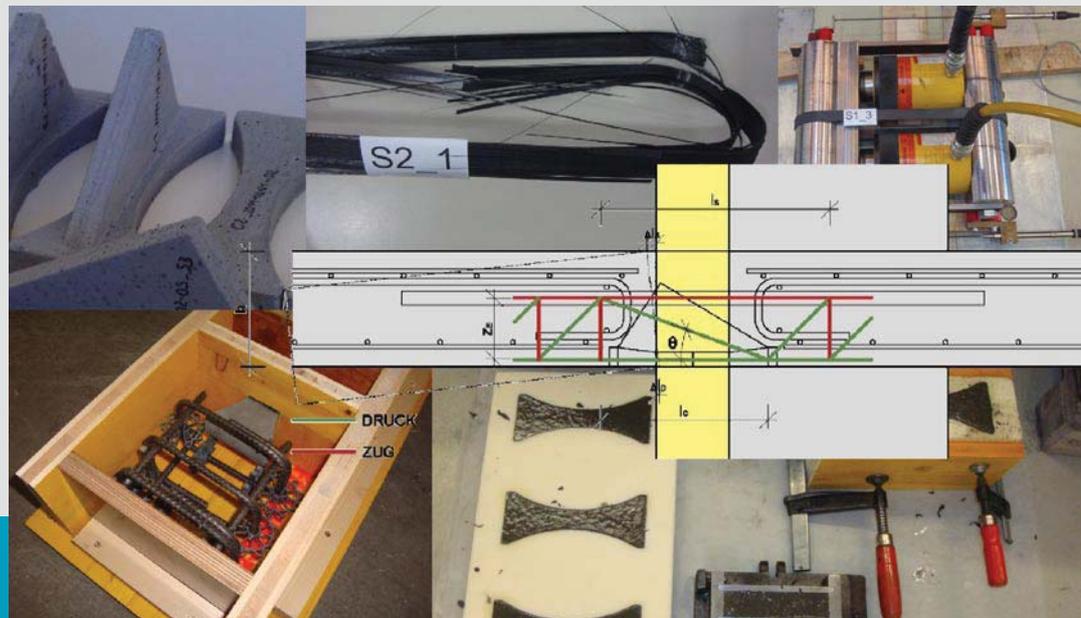


Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen - Versuche



D-3-02/2011

Verfasser: **Walter Sammer**
Betreuer: **Nguyen Viet Tue, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.**
Mitbetreuer: **Günther W. Illich, Univ. Ass. Dipl.-Ing.**

eingereicht am: **Institut für Betonbau**
Technische Universität Graz



WEITERENTWICKLUNG EINES STATISCH TRAGENDEN
WÄRMEDÄMMELEMENTES IM BEREICH VON
AUSKRAGENDEN STAHLBETONBAUTEILEN –
VERSUCHE

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplomingenieurs
der Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften

von
Walter SAMMER

Eingereicht am
Institut für Betonbau
der Technischen Universität Graz

Begutachter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet TUE
Dipl.-Ing. Günther Illich

Graz, im März 2011

SPERRE DER MASTERARBEIT

Die vorliegende Masterarbeit enthält wettbewerbsrelevante Ausführungen und muss gemäß Vereinbarung mit der AVI-Alpenländische-Veredelungs-Industrie GesmbH für einen Zeitraum von zwei Jahren gegen jegliche Veröffentlichung gesperrt werden. Während dieses Zeitraumes ist weder eine Entlehnung noch eine Einsichtnahme gestattet. Ab 22.03.2013 darf die Veröffentlichung erfolgen.

Graz, am 15.03.2011

Walter Sammer

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am 15.03.2011

Walter Sammer

DANKSAGUNG

Die folgenden Zeilen möchte ich dazu nutzen, Personen zu danken, durch deren Mitwirkung – direkt oder indirekt – die Arbeit erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Anfangs möchte ich mich bei allen Projektbeteiligten der Firma AVI, aber vor allem bei Herrn DI Harald Gradwohl, für die gute Zusammenarbeit bedanken. Ein großes Dankeschön gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Betonbauinstitutes und des Labors für konstruktiven Ingenieurbau, Professor Tue für die stets freundliche Unterstützung sowie Herrn DI Günther Illich, der mir bei allen Teilerfolgen aber auch Misserfolgen zur Seite stand.

Widmen möchte ich diese Arbeit meinem Vater Johann, der mich unter anderen Umständen bestimmt bei meinem Werdegang zum Diplomingenieur unterstützt hätte. Ich vermisse die Baustellenbesuche – die ungezwungene Vater/Sohn-Beziehung, die mir sehr viel Kraft und Selbstvertrauen verliehen hat. Du warst und bist mein Vorbild.

Ein herzliches Dankeschön geht an meine Mutter Antonia, die mir mit bedingungsloser, uneingeschränkter Liebe in allen Bereichen meines Lebens beisteht. Die Unterstützung meiner Brüder Erwin und Werner war mir immer gewiss – dafür danke ich Euch.

Dank Deiner Unterstützung und Deines Vertrauens – meine Christine – war ich mir des Studienerfolges immer sicher. Danke.

KURZFASSUNG

Diese Masterarbeit baut auf eine Studie des Betonbauinstitutes der Technischen Universität Graz auf, welche in Zusammenarbeit mit der Firma AVI - Alpenländische-Veredelungs-Industrie GesmbH - erstellt wurde. Ziel dieser vorangegangenen Arbeit war es, die am Markt befindlichen Thermokorbsysteme zu untersuchen und Möglichkeiten für die Weiterentwicklung eines solchen Systems aufzuzeigen. Hierzu sollten Hochleistungswerkstoffe, wie Ultrahochleistungsbeton und kohlenfaserverstärkter Kunststoff zum Einsatz kommen. Dieser neu konzipierte AVI-Hochleistungsthermokorb (in weiterer Folge AVI-HL-Korb genannt) soll nun in der vorliegenden Masterarbeit mittels theoretischer und experimenteller Untersuchungen auf seine Qualität untersucht werden. Im Bedarfsfall wird das Konzept modifiziert, um alle Zielvorgaben der Tragfähigkeit, Bauphysik sowie der Marktauglichkeit zu erfüllen. Hierzu wird im Verlauf der Bearbeitung ein Versuchskonzept erarbeitet, welches von der Material- bis hin zur Bauteilebene aufgebaut ist. Eine detaillierte Betrachtung der durchgeführten Versuche ist in der Arbeit dokumentiert und bewertet. Weiters sind Berechnungsbeispiele für Kragelemente angegeben, mittels derer mögliche Systemaufbauten bzw. Momenten- und Querkraftsabstufungen definiert werden. Als Abschluss wird noch ein Ausblick über den weiteren Verlauf des AVI-HL-Korb - Projektes gegeben.

ABSTRACT

This Masters-thesis is based on a study commissioned by the Institute of Structural Concrete at the Graz University of Technology in collaboration with AVI - Alpenländische-Veredelungs-Industrie GesmbH. The aim of the previous work was to survey the market with respect to existing thermo-element-systems, and to identify opportunities for further development of such a system. This was to be done with high-performance materials, such as ultra high performance concrete and carbon fiber reinforced plastic. The quality of this newly designed AVI-high-performance-element (subsequently called AVI-HL-element) was now to be tested theoretically and experimentally. If necessary, the concept will be modified to satisfy all targets regarding loading, static engineering and marketability. For this purpose, an experimental concept will be developed from the material level up to the building element level. A detailed analysis of these tests is documented and evaluated in this paper. Further examples of possible system structures are given, defined by means of bending moments and shear force increments. Finally, an overview of the future course of the project is given.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 | Allgemeines..... | 1 |
| 1.2 | Vorgehensweise - Generelles Versuchskonzept..... | 1 |
| 1.2.1 | Material-Ebene | 2 |
| 1.2.2 | Komponenten-Ebene | 2 |
| 1.2.2.1 | Zugelement | 2 |
| 1.2.2.2 | Druck/Schub-Element | 3 |
| 1.2.3 | Bauteil-Ebene..... | 3 |
| 2 | VERSUCH 1: CFK-SCHLAUFE | 4 |
| 2.1 | Hintergrund des Versuches..... | 4 |
| 2.2 | Versuchsreihen und Versuchsaufbau | 5 |
| 2.2.1 | Dokumentation der Versuchsreihen..... | 6 |
| 2.2.1.1 | Versuchsreihe S1 | 6 |
| 2.2.1.2 | Versuchsreihe S2..... | 8 |
| 2.2.1.3 | Versuchsreihe S3..... | 9 |
| 2.2.2 | Versuchsaufbau..... | 11 |
| 2.3 | Theoretischer Hintergrund und Berechnungsmodell..... | 12 |
| 2.3.1 | Händische Berechnung | 12 |
| 2.3.2 | Theoretischer Hintergrund von UD-Schlaufen..... | 14 |
| 2.4 | Versuchsergebnisse | 17 |
| 2.4.1 | Versuchsreihe S1 | 17 |
| 2.4.2 | Versuchsreihe S2..... | 18 |
| 2.4.3 | Versuchsreihe S3..... | 20 |
| 2.5 | Schlussfolgerungen..... | 21 |
| 3 | VERSUCH 2: MODIFIZIERTE CFK-SCHLAUFE | 22 |
| 3.1 | Hintergrund des Versuches..... | 22 |
| 3.2 | Versuchsreihe und Versuchsaufbau | 22 |
| 3.2.1 | Dokumentation der Versuchsreihe | 22 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.2 | Versuchsaufbau..... | 24 |
| 3.3 | Versuchsergebnisse | 24 |
| 3.4 | Schlussfolgerungen..... | 25 |
| 4 | ANALYSE MÖGLICHER FASERVERBUNDWERKSTOFFE | 27 |
| 4.1 | Anforderungsprofil | 27 |
| 4.2 | Vergleich unterschiedlicher Materialien..... | 28 |
| 4.2.1 | Glasfaser..... | 28 |
| 4.2.2 | Kohlefaser..... | 30 |
| 4.2.3 | Basaltfaser | 31 |
| 4.2.4 | Aramidfaser | 31 |
| 4.2.5 | Zusammenfassung | 31 |
| 4.3 | Überlegungen zur Prototypenherstellung..... | 33 |
| 5 | VERSUCH 3: DRUCKELEMENT | 36 |
| 5.1 | Hintergrund des Versuches..... | 36 |
| 5.2 | Dokumentation Versuchsreihe und Versuchsaufbau | 36 |
| 5.2.1 | Verwendete Materialien | 36 |
| 5.2.1.1 | UHPC-Mischung..... | 36 |
| 5.2.1.2 | Normalbeton-Mischung | 38 |
| 5.2.2 | Herstellung der Versuchskörper | 39 |
| 5.2.2.1 | Herstellung Druckelemente..... | 39 |
| 5.2.2.2 | Zusammenfügen der Einzelkomponenten | 39 |
| 5.2.3 | Versuchsaufbau..... | 40 |
| 5.3 | Berechnungsmodelle | 41 |
| 5.3.1 | Händische Berechnung | 41 |
| 5.3.2 | Modellierung im FE-Programm Atena | 43 |
| 5.4 | Versuchsergebnisse | 45 |
| 5.4.1 | Prüfergebnisse der einzelnen Betonagen..... | 45 |
| 5.4.1.1 | Würfeldruckfestigkeit Normalbeton | 45 |
| 5.4.1.2 | Druckfestigkeit UHPC | 45 |
| 5.4.2 | Prüfergebnisse Versuch | 46 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.5 | Schlussfolgerungen..... | 48 |
| 6 | BERECHNUNGSBEISPIELE KRAGELEMENT | 49 |
| 6.1 | Modellierung im FE-Programm Atena | 49 |
| 6.1.1 | Systemübersicht..... | 50 |
| 6.1.2 | Berechnungsergebnisse Plattenstreifen | 51 |
| 6.1.2.1 | Beispiel 1: DS_16_100_CFK-80/126000 | 51 |
| 6.1.2.2 | Beispiel 2: DS_16_200_CFK-80/126000 | 54 |
| 6.2 | Berechnungsprogramm in MS Excel | 58 |
| 6.2.1 | Erläuterung Eingangswerte | 59 |
| 6.2.2 | Erläuterung der einzelnen Berechnungsschritte | 60 |
| 6.2.2.1 | Ber1 - Schnittgrößenermittlung Kragplatte | 61 |
| 6.2.2.2 | Ber2 - Reaktive Schnittgrößen Zugzone und NW Schlaufe | 62 |
| 6.2.2.3 | Ber3 - Reaktive Schnittgrößen Druckzone und NW UHPC-El.(1)..... | 63 |
| 6.2.2.4 | Ber4 - Nachweise UHPC-Element (2) + Verformung..... | 65 |
| 6.2.2.5 | Ber5 – Äqu. Wärmedurchlasswiderstand gew. Konfiguration..... | 68 |
| 6.3 | Kontrollberechnungen | 68 |
| 6.3.1 | Vergleich verschiedener Fachwerkmodelle | 69 |
| 6.3.2 | Vergleich mit FE-Berechnung..... | 70 |
| 6.3.2.1 | Druckstrebenneigung aus Hauptspannungsrichtung..... | 70 |
| 6.3.2.2 | Beispiel 1: DS_16_100_CFK-80/126000 | 71 |
| 6.3.2.3 | Beispiel 2: DS_16_200_CFK-80/126000 | 74 |
| 6.4 | Vorschläge für die Tragfähigkeitsabstufung..... | 75 |
| 6.4.1 | Deckenstärke 16cm..... | 75 |
| 6.4.1.1 | Variante 1 | 75 |
| 6.4.1.2 | Variante 2 | 77 |
| 6.4.1.3 | Variante 3 | 78 |
| 6.4.2 | Deckenstärke 18cm..... | 79 |
| 6.4.3 | Deckenstärke 20cm..... | 80 |
| 6.4.4 | Grafische Darstellung Systemaufbau | 81 |
| 6.4.5 | Systemaufbau ohne reine Druckelemente | 82 |
| 6.4.6 | Vergleich der verschiedenen Systemaufbauten | 84 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.5 | Zusammenfassung - Schlussfolgerungen | 84 |
| 7 | AUSBLICK | 86 |
| 7.1 | Zusammenfassung | 86 |
| 7.2 | Weitere Schritte | 87 |
| | QUELLENVERZEICHNIS | 88 |
| | ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 89 |
| | TABELLENVERZEICHNIS | 92 |
| | PLANANHANG | 94 |
| | ALLGEMEINER ANHANG | 95 |

1 EINLEITUNG

1.1 ALLGEMEINES

Die vorliegende Arbeit stellt einen Teil eines geförderten Projektes der Firma AVI - Alpenländische-Veredelungs-Industrie GesmbH - in Kooperation mit der Technischen Universität Graz, im Speziellen mit dem Institut für Betonbau, dar. Im Zuge dieses Projektes soll eine vorhandene Studie zur Weiterentwicklung eines Thermoelementsystems im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen auf ihre Machbarkeit bzw. Praxis-tauglichkeit untersucht werden. Vor allem die geplante Verwendung der hochfesten Materialien UHPFRC und eines möglichen Faserkunststoffverbundes (FKV) sollen näher betrachtet werden. Durch den Einsatz dieser beiden neuen Materialien ergeben sich eine Vielzahl von technischen Problemstellungen, die es im Laufe dieses Projektes zu lösen gilt. Hauptaugenmerk wird in dieser Arbeit auf die statisch einwandfreie Abtragung der auftretenden Biege- und Querkraftbeanspruchungen durch das konzipierte Thermoelement gelegt. Natürlich soll parallel dazu eine möglichst hohe wärmedämmende Wirkung erreicht werden.

1.2 VORGEHENSWEISE - GENERELLES VERSUCHSKONZEPT¹

Um die in der Basisarbeit – Studie über die Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen – vorgeschlagenen Lösungen zielorientiert zur Praxisreife zu entwickeln, benötigt es eine konsequente Vorgehensweise und verlässliche Methoden. Die angedachten Konzepte werden mittels theoretischer und experimenteller Untersuchungen auf ihre Qualität untersucht und im Bedarfsfall so modifiziert, dass die Zielvorgaben erreicht werden. Numerische Simulationen mithilfe der FE-Methode werden die experimentellen Untersuchungen ergänzen. Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in drei Ebenen:

- A) Material-Ebene
- B) Komponenten-Ebene
- C) Bauteil-Ebene

¹ Angeführte Überlegungen zum generellen Versuchskonzept entstanden im Zuge mehrerer Besprechungen mit der Fa. AVI (DI Gradwohl; DI Ritter; DI Haas, MBA), dem Labor für konstruktiven Ingenieurbau (Dr. Freytag; DI Linder) bzw. dem Institut für Betonbau (Prof. Tue, DI Illich).

1.2.1 MATERIALEBENE

Anfänglich soll die reale Ausnutzbarkeit des konzipierten Faserkunststoffverbund-Schlaufen-Elements mittels einfacher Vorversuche bestimmt werden. Dabei sollen die Herstellerwerte überprüft werden und bei erfolgreicher Testung eine statistische Auswertung erfolgen. Mittels der statistischen Verteilung der Versuchsergebnisse kann in weiterer Folge ein Sicherheitsbeiwert für die spätere Bemessung des Materials ermittelt werden.

Des Weiteren soll auf dieser Ebene eine, aus wirtschaftlicher und technischer Sicht, geeignete UHPC-Rezeptur für die geplanten Druck- bzw. Druck-/Schubelemente gewonnen werden.

1.2.2 KOMPONENTEN-EBENE

Die Ergebnisse der Komponentenversuche stellen die Grundlage für die Erstellung eines Bemessungskonzeptes dar und zeigen zudem einzelne Einflüsse beim Versuch auf Bauteil-Ebene auf.

1.2.2.1 ZUGELEMENT

Anhand von Zugversuchen soll das Verbundverhalten einer in Beton eingebetteten FKV-Schleife untersucht werden. Weiters ist die Lastweiterleitung über die vorgesehene Stahlanschlussbewehrung von Interesse. Variiert werden soll in diesem Versuchsaufbau die Einbettungslänge der Schleife werden.

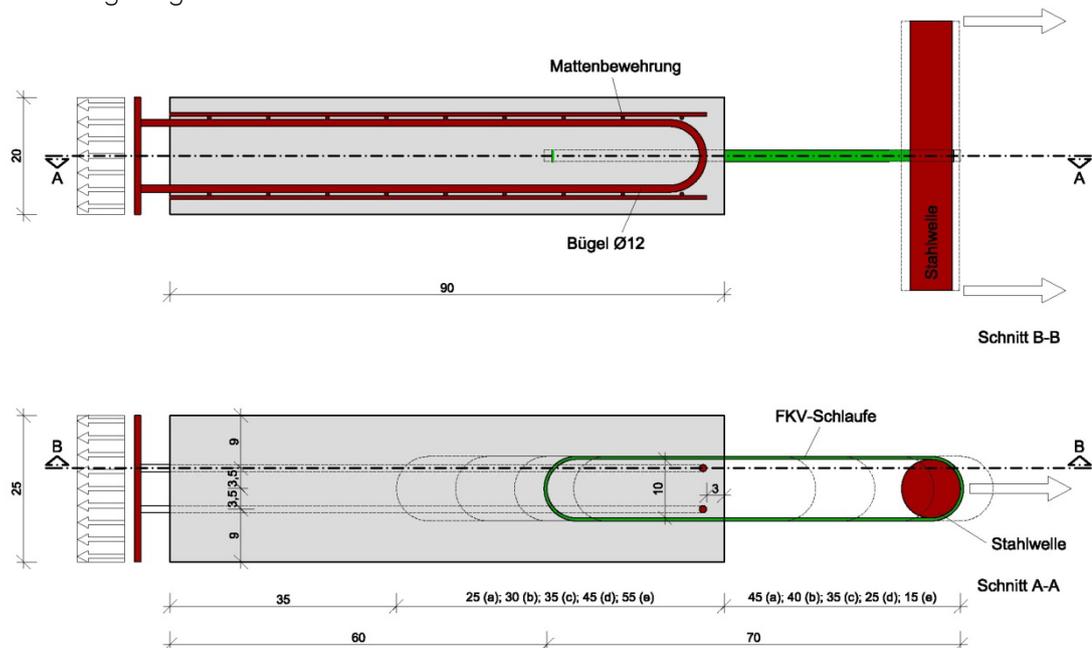


Abb. 1-1: Geplanter Versuchsaufbau: Zugelement

1.2.2.2 DRUCK/SCHUB-ELEMENT

Anhand von Druckversuchen soll die Interaktion Normalbeton-UHPC bzw. die Maximallast des verwendeten Hochleistungsdruckelements getestet werden.

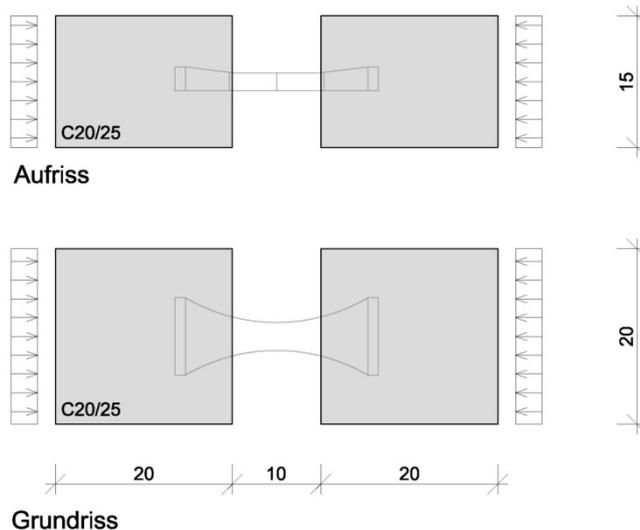


Abb.1-2: Geplanter Versuchsaufbau: Druckelement

1.2.3 BAUTEIL-EBENE

Die Ergebnisse der Komponentenversuche bilden die Grundlage für die theoretische Ableitung des Zusammenwirkens der Einzelkomponenten im Bauteil. Die so gewonnenen Bemessungsansätze werden anhand von mehreren Bauteilversuchen überprüft. Hierbei sollen realitätsnahe Aufbaukombinationen - beispielsweise ein Meter Deckenstreifen - und Belastungen gewählt werden. Das Verhältnis der einwirkenden Querkraft zum einwirkenden Moment soll einer üblichen Belastung entsprechen.

2 VERSUCH 1: CFK-SCHLAUFE

2.1 HINTERGRUND DES VERSUCHES

Der erste Versuch im Zuge dieser Masterarbeit soll die in [1] vorgeschlagenen CFK-Schlaufen auf Materialebene ergründen. Hierzu sollen neun Zugversuche durchgeführt werden, wobei jeweils drei Versuchskörper einer Reihe angehören und dieselben Eigenschaften aufweisen. Diese Versuchsreihen werden im weiteren Verlauf mit S1, S2 bzw. S3 bezeichnet.

Zweck der Vorversuche an den CFK-Schlaufen ist die Sicherstellung der Materialeigenschaften, welche in Abbildung 2-1 und Tabelle 2-1 dargestellt sind. Diese stellen die Grundlage für die Berechnungen in [1] dar.

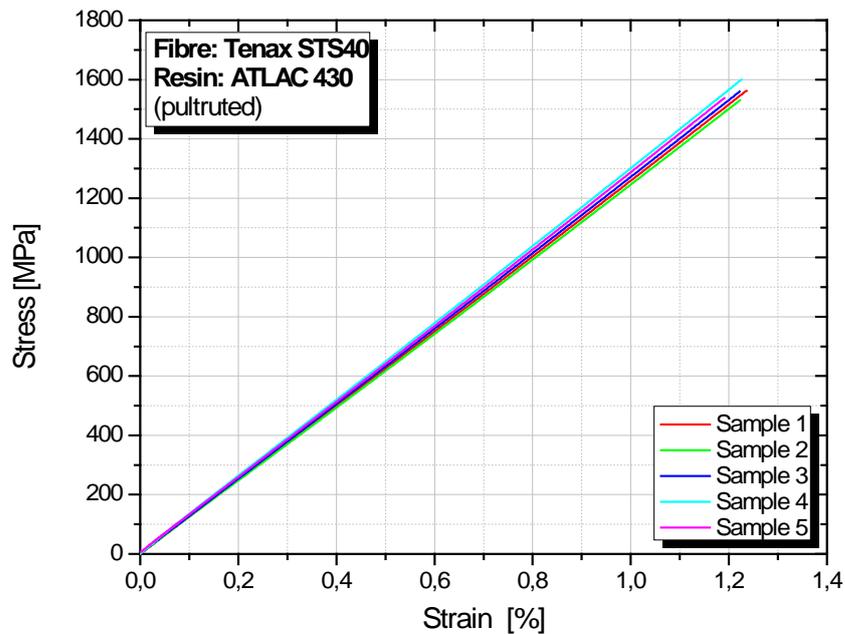


Abb.2-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm: Material C02 [1 bzw. 2]

| Materialbezeichnung | C02 |
|---|--------|
| Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung [N/mm ²] | 1560 |
| Zug-E-Modul [N/mm ²] | 126000 |
| Bruchdehnung [%] | 1,22 |
| Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung [N/mm ²] | 660 |
| Druck-E-Modul parallel zur Faserrichtung [N/mm ²] | 74400 |

Tab.2-1: Festigkeitseigenschaften: Material C02 [1 bzw. 2]

2.2 VERSUCHSREIHEN UND VERSUCHSAUFBAU

Wie zuvor erwähnt sollen drei Versuchsreihen (S1, S2 und S3) mit jeweils drei Versuchskörpern betrachtet werden. Diese drei Reihen unterscheiden sich lediglich in der Wanddicke der Schlaufen (b_{schl}) voneinander.

| Materialreihen | S1 | S2 | S3 |
|---------------------------------|------|------|------|
| b_{schl} [mm] | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| h_{schl} [mm] | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| $A_{schl/2}$ [mm ²] | 40,0 | 50,0 | 60,0 |

Tab.2-2: Sollwerte der Schlaufenreihen S1-S3

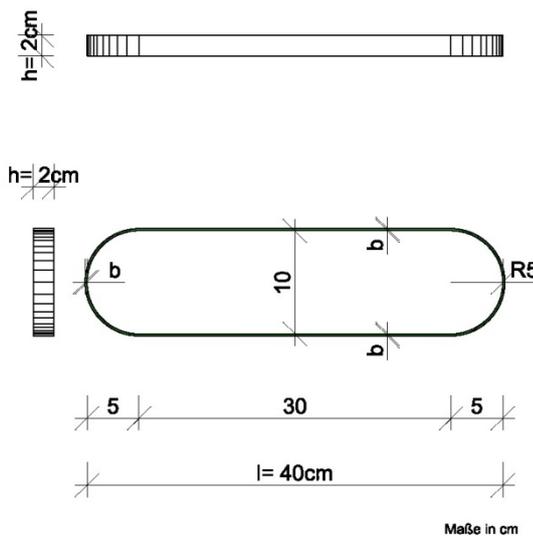
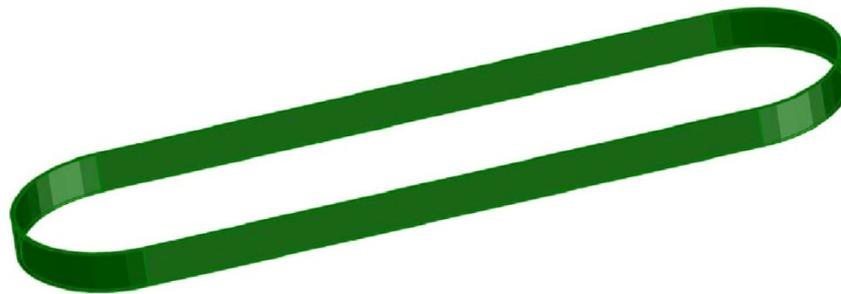


Abb.2-2: Geometrie der Versuchskörper

2.2.1 DOKUMENTATION DER VERSUCHSREIHEN

Im Zuge der Dokumentation der Versuchsreihen bzw. Versuchskörper sollen Unregelmäßigkeiten in der Geometrie, Fehlstellen und dergleichen aufgezeigt werden. Weiters wurden die einzelnen Versuchskörper mit Nummern versehen.

Im folgenden Abschnitt werden die geometrischen Abmessungen sämtlicher Versuchskörper angegeben. Dabei entsprechen die Werte jeweils: b_{schl}/h_{schl} [mm]. Eventuelle Unregelmäßigkeiten in der Schlaufendicke (speziell Falten an der Oberfläche) sind in Abbildung 2-4 bis 2-12 durch rote Kreise gekennzeichnet.

Zur Veranschaulichung ist in den unten angeführten Abbildungen eine solche Falte dargestellt:

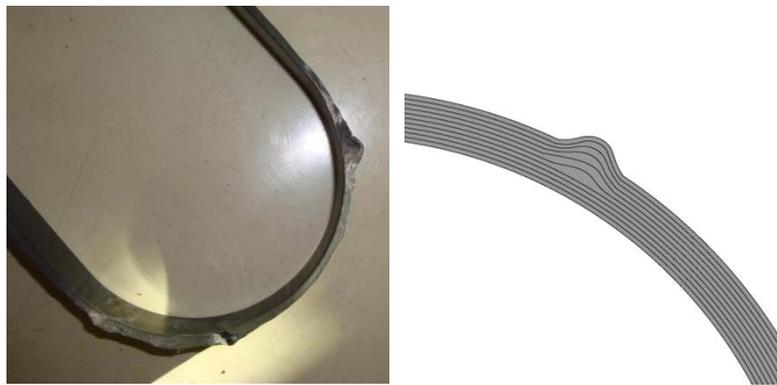


Abb.2-3: Repräsentative Darstellung der Fehlstellen (Falte)

2.2.1.1 VERSUCHSREIHE S1

A) S1_1:

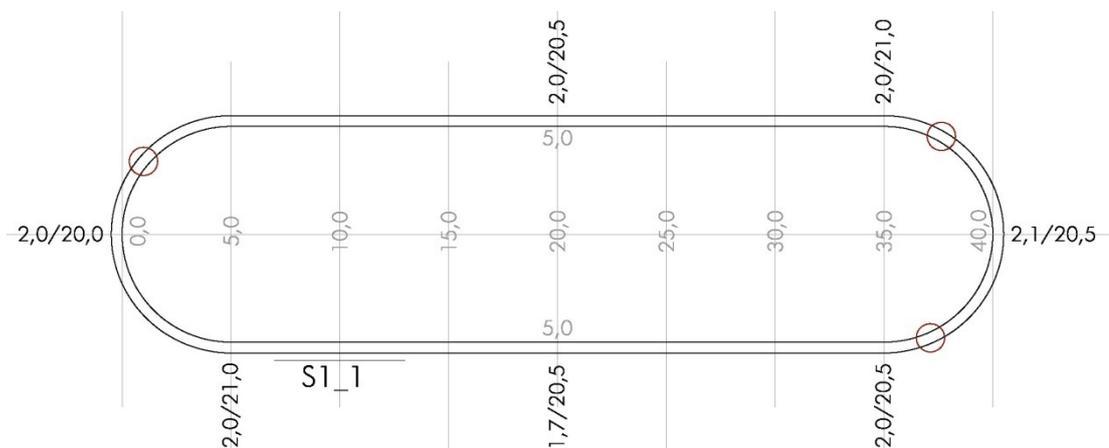


Abb.2-4: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S1_1

Die Schlaufe S1_1 weist bei ca. 20 [cm] eine Querschnittschwächung von 2,0/20,0 [mm] auf 1,7/20,5 [mm] auf. Dies entspricht 87 [%] des Soll-Querschnittes.

B) S1_2:

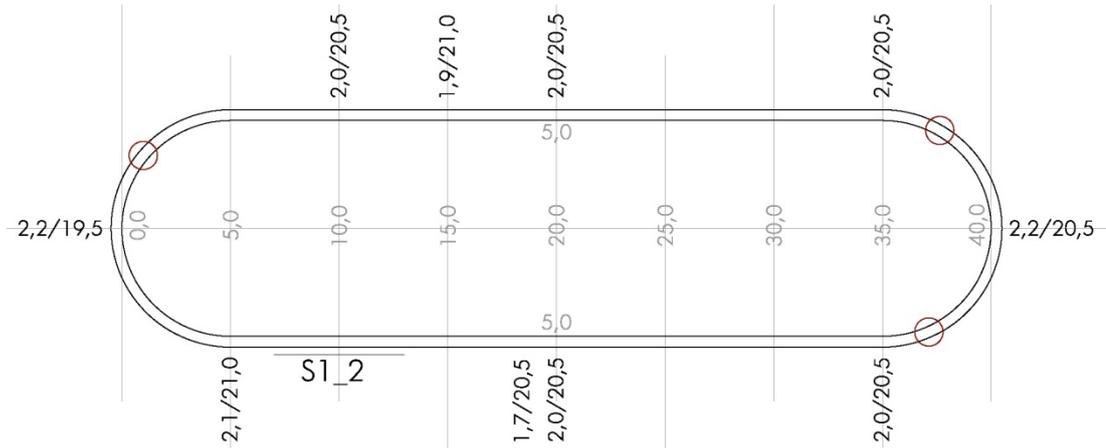


Abb.2-5: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S1_2

Der Versuchskörper S1_2 weist an der schwächsten Stelle ebenfalls nur 87 [%] der Sollfläche auf.

C) S1_3:

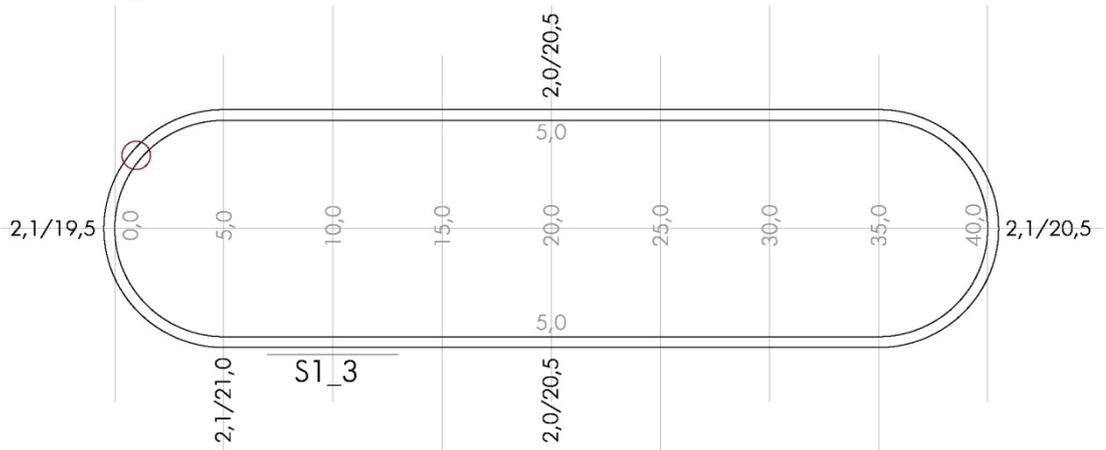


Abb.2-6: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S1_3

Schlaufe S1_3 unterschreitet an keiner Stelle die Soll-Querschnittsfläche von 40 [mm²].

2.2.1.2 VERSUCHSREIHE S2

A) S2_1:

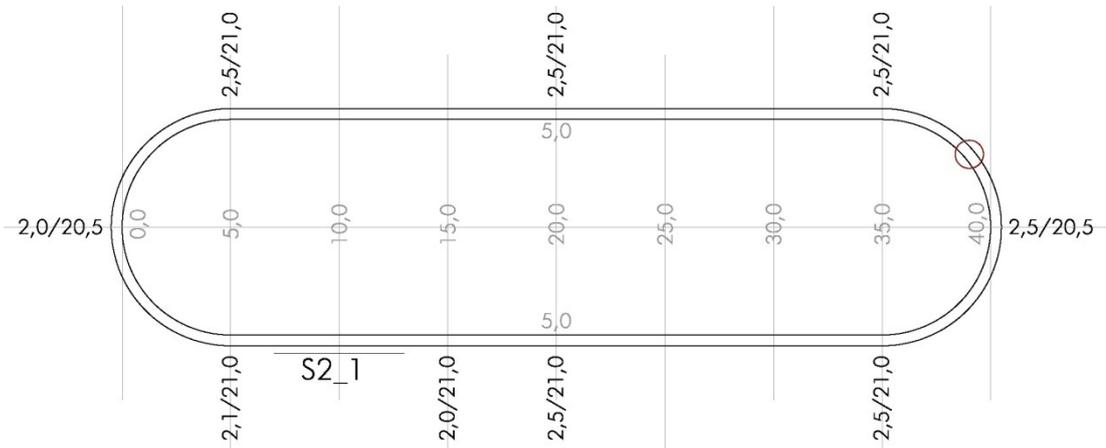


Abb.2-7: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S2_1

Der Versuchskörper S2_1 weist an der schwächsten Stelle einen Querschnitt von 82 [%] der Sollfläche auf.

B) S2_2:

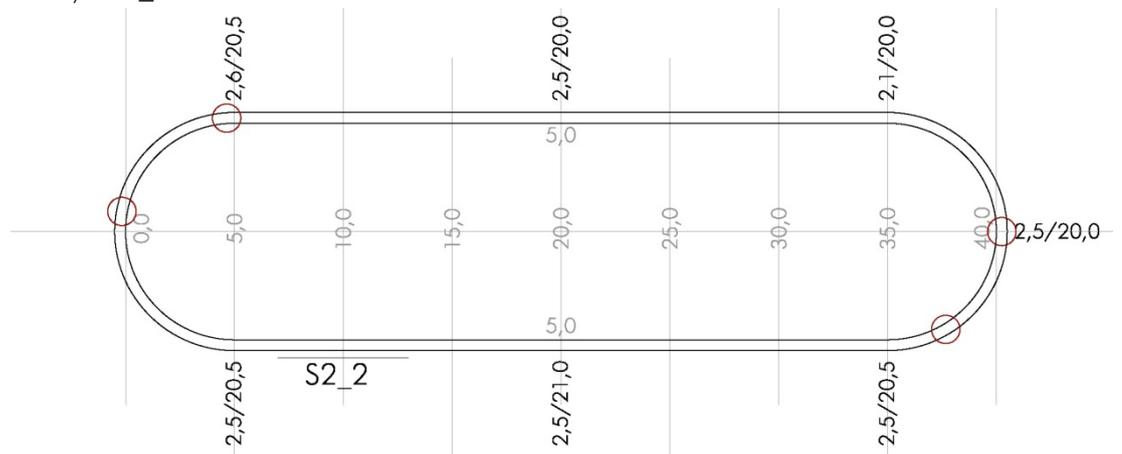


Abb.2-8: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S2_2

Die Schlaufe S2_2 weist an einer Stelle eine Querschnittschwächung auf. An dieser schwächsten Stelle verringert sich der Querschnitt von 2,5/20,0 [mm] auf 2,1/20,0 [mm]. Dies entspricht rund 84 [%] der Soll-Querschnittsfläche.

C) S2_3:

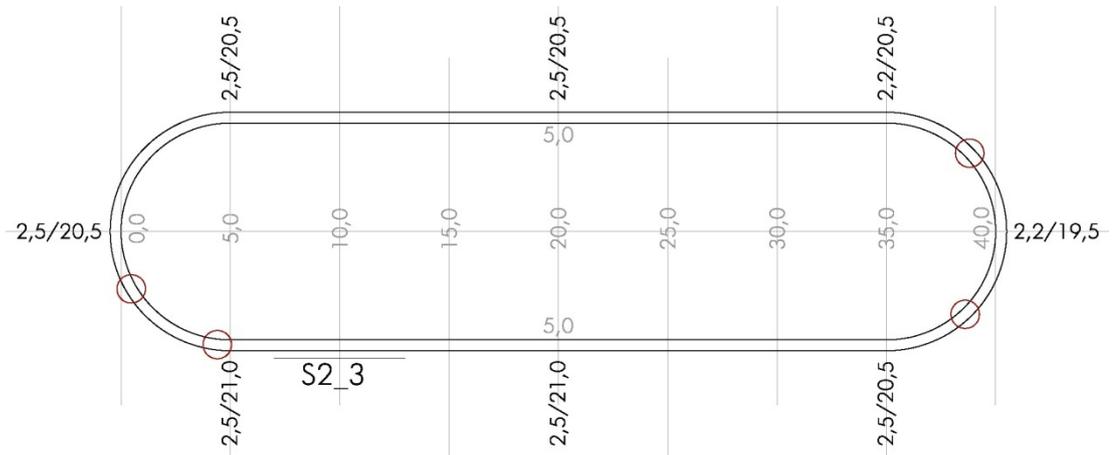


Abb.2-9: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S2_3

Hier beträgt der Ist-Querschnitt rund 77 [%] des Soll-Querschnitts.

2.2.1.3 VERSUCHSREIHE S3

A) S3_1:

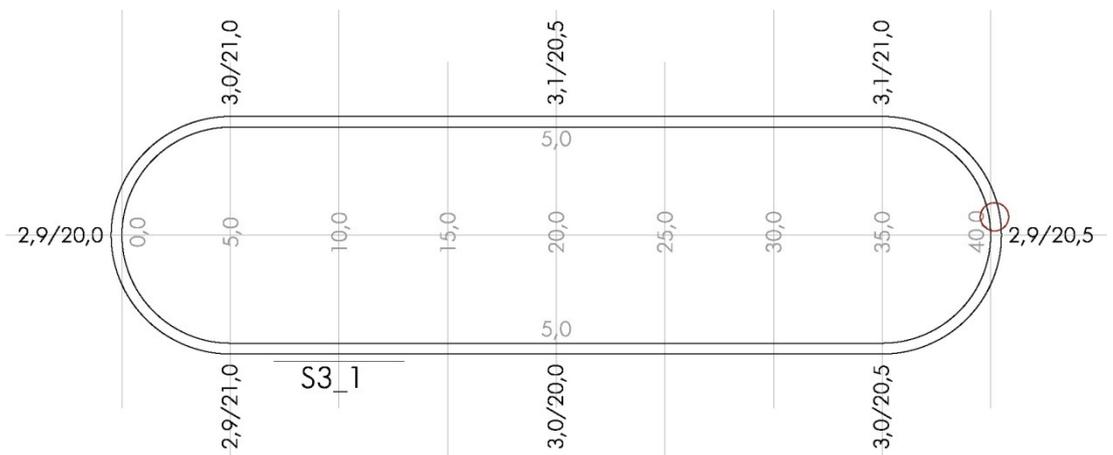


Abb.2-10: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S3_1

Die Schlaufe S3_1 weist an mehreren Stelle Querschnittschwächungen auf. An der schwächsten Stelle verringert sich der Querschnitt von 3,0/20,0 [mm] auf 2,9/20,0 [mm]. Dies entspricht rund 97 [%] des Soll-Querschnittes.

An der äußeren Oberfläche des Versuchskörpers ist nur an einer Stelle eine signifikante Falte vorhanden (siehe Abbildung oben).

B) S3_2:

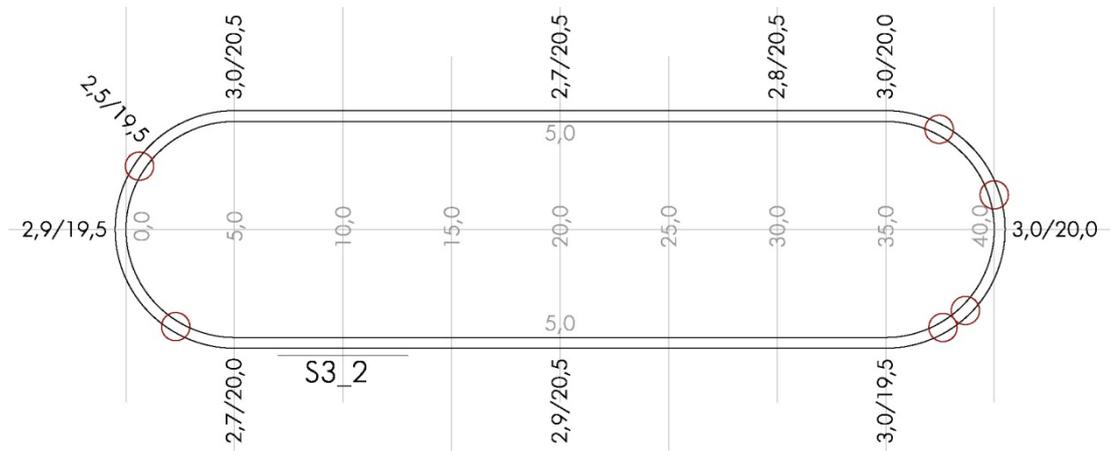


Abb.2-11: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S3_2

Der Versuchskörper mit der Bezeichnung S3_2 weist sowohl sehr markante Faltenbildung an der äußeren Oberfläche sowie große Querschnittsschwankungen auf. Zum Beispiel variiert nicht nur die Dicke, sondern auch die Höhe der Schlaufe einige Male. Der am meisten geschwächte Querschnitt weist lediglich rund 81 [%] der Soll-Fläche auf.

C) S3_3:

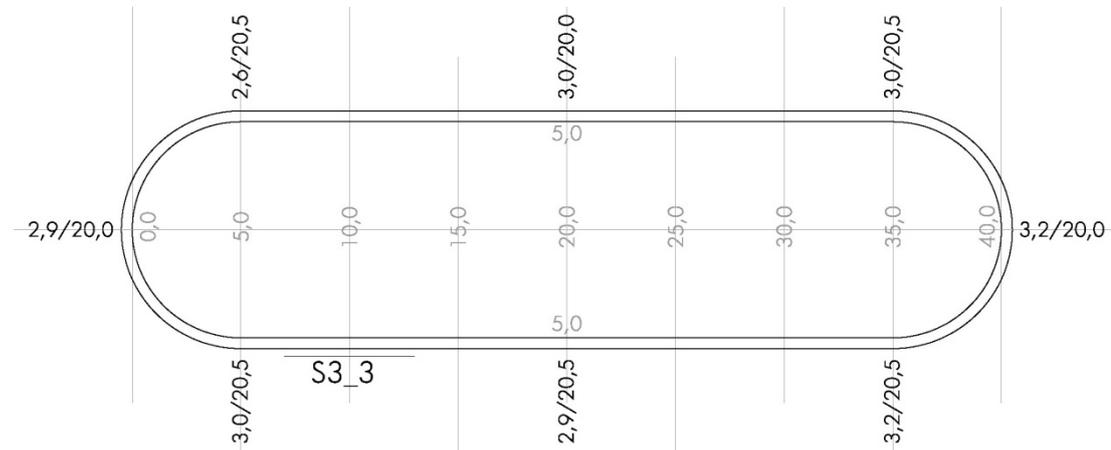


Abb.2-12: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S3_3

Die Schlaufe S3_3 weist im klaren Gegensatz zum vorherigen Versuchskörper keinerlei grobe oberflächliche Falten auf. Jedoch ist der Querschnitt an einigen Stellen verringert. Hier ist der Minimalwert mit 89 [%] zu beziffern.

2.2.2 VERSUCHSAUFBAU

In Abbildung 2-13 ist der Versuchsaufbau für den Zugversuch der CFK-Schlaufenserien ersichtlich. Dazu wurden 2 Stahlwellen gefertigt, die denselben Radius von 5 [cm] als die Versuchskörper aufweisen. Der in der Abbildung links dargestellte Zylinder weist zudem eine Aufnahme für die Hydraulikzylinder auf. An der dazugehörigen rechten Stahlwelle wurden Befestigungsmöglichkeiten in der Form von zwei Feingewindeschrauben vorgesehen. Die für den Versuch verwendeten Hydraulikzylinder tragen die Bezeichnung: ENERPAC RCH302 und leisten im Maximalfall jeweils eine Pressenkraft von 300 [kN].

Des Weiteren wurden an beiden Seiten der unten dargestellten Stahlwellen Wegaufnehmer angebracht. Gemessen wurden somit die Kraft (über den Druck in den Hydraulikzylindern) und der Weg an beiden Seiten der Stahlwellen.

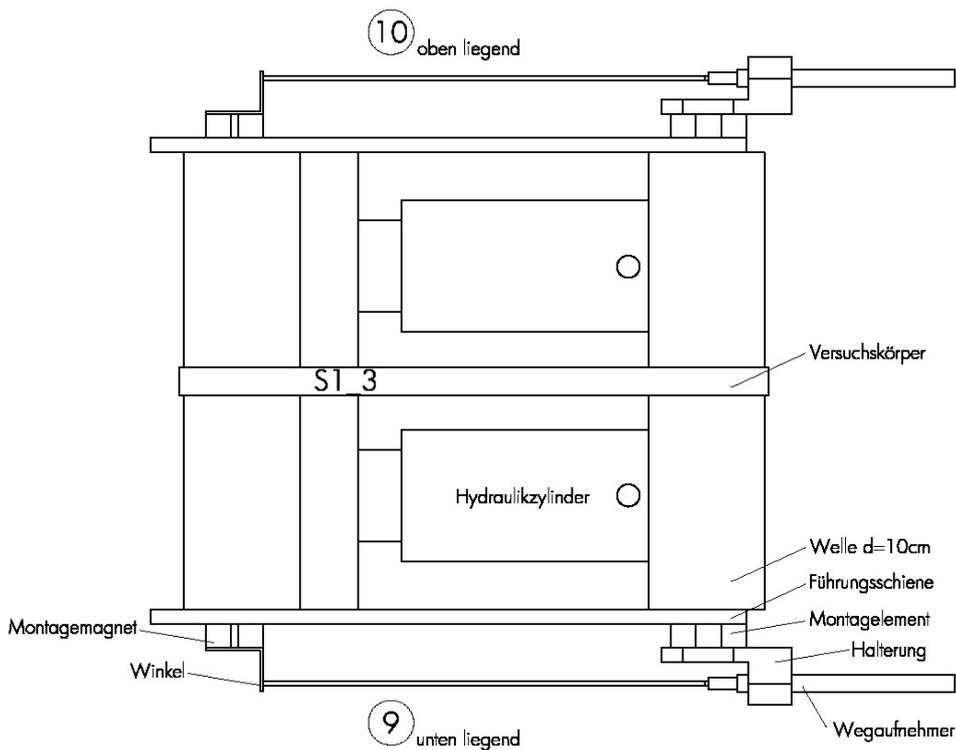


Abb.2-13: Versuchsaufbau Zugversuch CFK-Schlaufe (Grundriss)

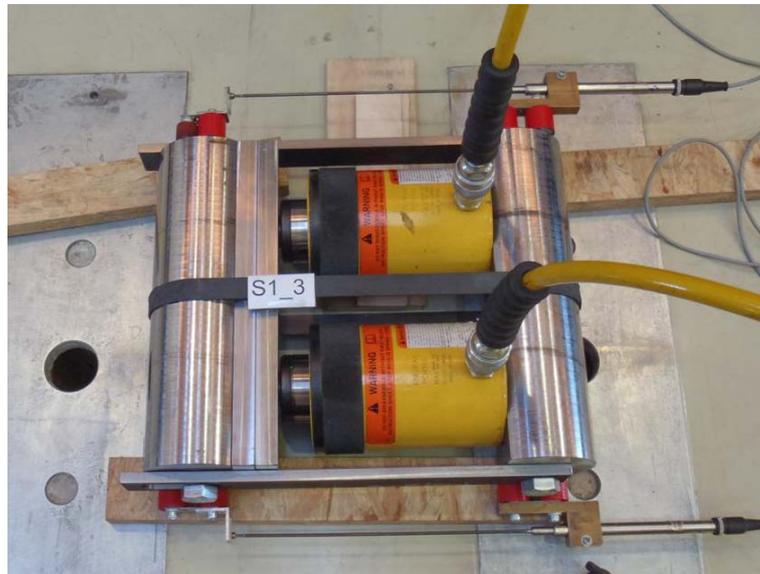


Abb.2-14: Versuchsaufbau Zugversuch CFK-Schlaufe (Foto)

2.3 THEORETISCHER HINTERGRUND UND BERECHNUNGSMODELL

2.3.1 HÄNDISCHE BERECHNUNG

Aufgrund der in 2.1 aufgelisteten Materialkenndaten sollen für die drei vorgesehenen Versuchsreihen die Bruchlasten bzw. die dazugehörigen Querpressungen errechnet werden. Als theoretischer Hintergrund zur Berechnung der Querpressung wird die Kesselformel herangezogen.

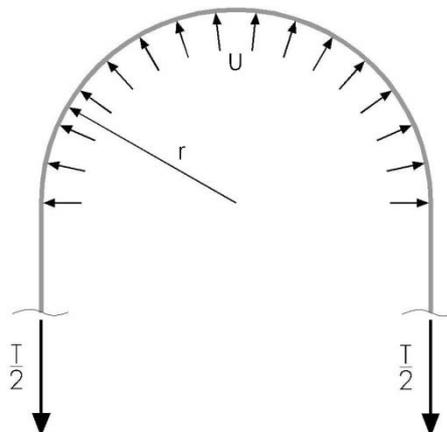


Abb.2-15: Querpressung im Bereich der Kraftumlenkung [1]

$$u = \frac{T}{2 \cdot r} \quad (2-1)$$

$$\sigma_{\text{quer}} = \frac{u}{h_{\text{schl}}} \quad (2-2)$$

Daraus folgt:

$$\sigma_{\text{quer}} = \frac{T}{2 \cdot r \cdot h_{\text{schl}}} \quad (2-3)$$

Die Bruchlast einer Schlaufenreihe ergibt sich aus:

$$T_{\text{max,CFK}} = 2 \cdot b_{\text{schl}} \cdot h_{\text{schl}} \cdot f_{\text{CFK,m}} \quad (2-4)$$

Exemplarisch wird die Berechnung für die Versuchsreihe S1 angeführt:

$$T_{\text{max,CFK,1}} = 2 \cdot b_{\text{schl}} \cdot h_{\text{schl}} \cdot f_{\text{CFK,m}}$$

$$T_{\text{max,CFK,1}} = 2 \cdot 2,0 \cdot 20,0 \cdot 1560$$

$$T_{\text{max,CFK,1}} = 124,8 \text{ [kN]}$$

$$\sigma_{\text{quer,1}} = \frac{T_{\text{max,CFK,1}}}{2 \cdot r \cdot h_{\text{schl}}}$$

$$\sigma_{\text{quer,1}} = \frac{124,8 \cdot 10^3}{2 \cdot 50,0 \cdot 20,0}$$

$$\sigma_{\text{quer,1}} = 62,4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Tabelle 2-3 zeigt die Berechnungsergebnisse für alle drei Versuchsreihen:

| Materialreihen | S1 | S2 | S3 |
|---|-------|-------|-------|
| $T_{\text{max,CFK}}$ [kN] | 124,8 | 156,0 | 187,2 |
| σ_{quer} [N/mm ²] | 62,4 | 78,0 | 93,6 |

Tab.2-3: Sollwerte für Bruchlast und Querdruck der Schlaufenreihen S1-S3

2.3.2 THEORETISCHER HINTERGRUND VON UD-SCHLAUFEN

Bei genauer Analyse zeigt sich, dass im Strang eines Schlaufenanschlusses nicht ausschließlich günstige, gleichmäßige σ_{\parallel} -Spannungen herrschen. Aus geometrischen Gründen treten örtlich Spannungsüberhöhungen auf. Das Werkstoffvolumen kann nicht gleichmäßig ausgenutzt werden. [3]

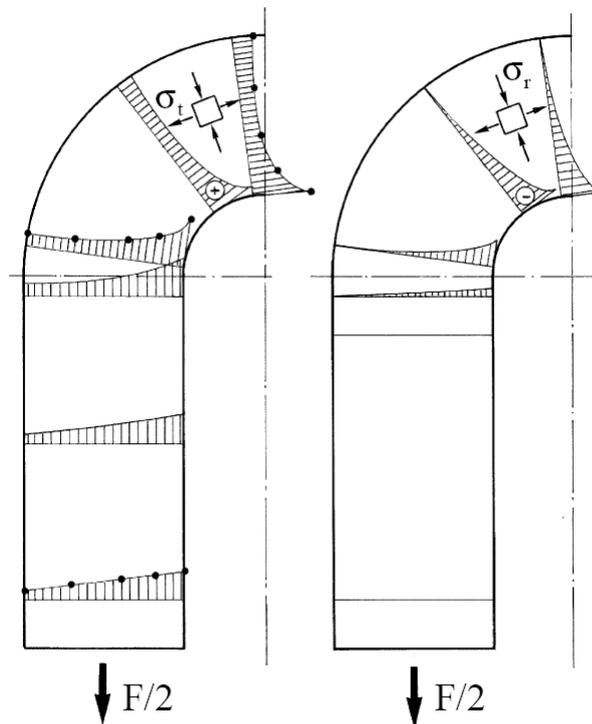


Abb.2-16: Spannungsverläufe in einer zugbelasteten Parallelschleufe [3]

$$\sigma_r(r) = \frac{-p_i \cdot r_i^{1+E_v}}{r_i^{2E_v} - r_a^{2E_v}} \cdot r^{E_v-1} + \frac{-p_i \cdot r_i^{1-E_v}}{r_i^{-2E_v} - r_a^{-2E_v}} \cdot r^{-E_v-1} \quad (2-5)$$

$$\sigma_t(r) = -p_i \cdot E_v \cdot \left(\frac{r_i^{1+E_v}}{r_i^{2E_v} - r_a^{2E_v}} \cdot r^{E_v-1} - \frac{r_i^{1-E_v}}{r_i^{-2E_v} - r_a^{-2E_v}} \cdot r^{-E_v-1} \right) \quad (2-6)$$

Die Formeln für die Radial- und Tangentialspannung wurden aus [3] entnommen.

Wie in Abbildung 2-16 ersichtlich, sind die Radialspannungen am Innenradius der Schleufe am größten und entsprechen ebendort den zuvor errechneten σ_{quer} . Ist der

Radialspannungsverlauf über den Querschnitt bekannt, kann auch der für die Bruchlast ausschlaggebende Tangentialspannungsverlauf laut Formel 2-6 ausgewertet werden. Dies soll im folgenden Abschnitt für die Versuchsreihe S1 exemplarisch dargestellt werden:

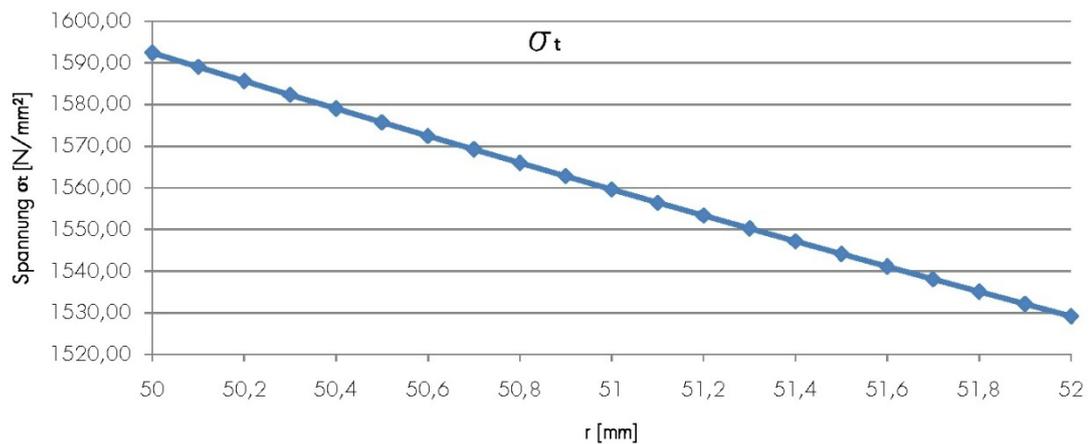


Abb.2-17: Tangentialspannungsverlauf für Versuchsreihe S1

Unter der Annahme, dass die in Abschnitt 2.3.1 berechnete Bruchlast von 124,80 [kN] für die Reihe S1 aufgebracht werden kann, ergibt sich der in 2-17 gezeichnete Tangentialspannungsverlauf über die Schlaufenbreite von 2 [mm]. Hierbei ist festzustellen, dass die Maximalspannung von 1560 [N/mm²] am inneren Rand der Schlaufe überschritten wird. Rechnet man mit der angeführten Maximalspannung zurück auf eine neue Bruchlast, so erhält man eine Maximallast von 122,26 [kN]. Dies bedeutet eine Abweichung von rund 2%.

| bschl | Radienverhältnis | | | F _{max} | F | Abweichung |
|-------|------------------|----------------|--------------------------------|------------------|--------|------------|
| | r _i | r _a | r _a /r _i | | | |
| [mm] | [mm] | [mm] | [-] | [kN] | [kN] | [%] |
| 2,0 | 50,0 | 52,0 | 1,040 | 124,80 | 122,26 | 2,03 |
| 2,5 | 51,0 | 53,5 | 1,049 | 156,00 | 152,02 | 2,55 |
| 3,0 | 52,0 | 55,0 | 1,058 | 187,20 | 181,45 | 3,07 |
| 5,0 | 53,0 | 58,0 | 1,094 | 312,00 | 295,85 | 5,18 |
| 7,0 | 54,0 | 61,0 | 1,130 | 436,80 | 404,89 | 7,31 |
| 10,0 | 55,0 | 65,0 | 1,182 | 624,00 | 558,40 | 10,51 |

Tab.2-4: Vergleich verschiedener Schlaufenbreiten in Bezug auf Bruchlastabweichung

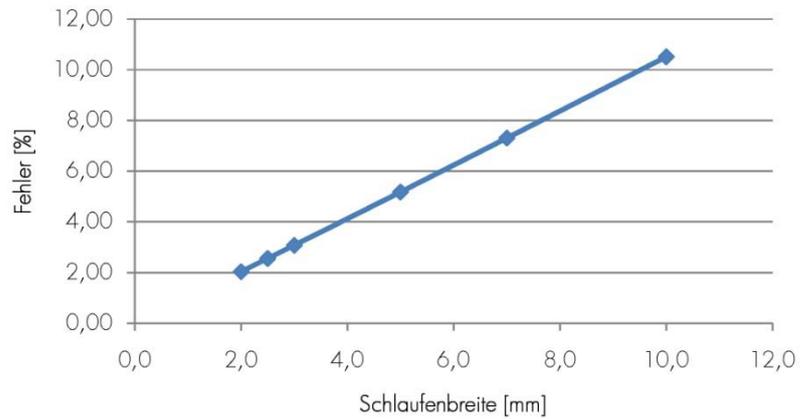


Abb.2-18: Vergleich verschiedener Schlaufenbreiten in Bezug auf Bruchlastabweichung

In Tabelle 2-4 bzw. Abbildung 2-18 sind verschiedene Schlaufenbreiten und die in Bezug auf das gewählte CFK-Material C02 zu erwartende Abweichungen von der Maximallast angeführt.

Einfluss auf die Spannungsüberhöhung im Kreisbereich der Schlaufe üben demnach ein großes Radienverhältnis r_a/r_i sowie der Orthotropiegrad $E_{||}/E_{\perp}$ des Materials aus. Zusätzlich tritt im Übergangsbereich des Halbkreises auf den parallelen Schlaufenteil unter Lastdehnung ein Biegemoment auf und überlagert sich mit der Zugbeanspruchung. Dies ist ebenfalls ein Effekt, der bei großem Radienverhältnis verstärkt wird.

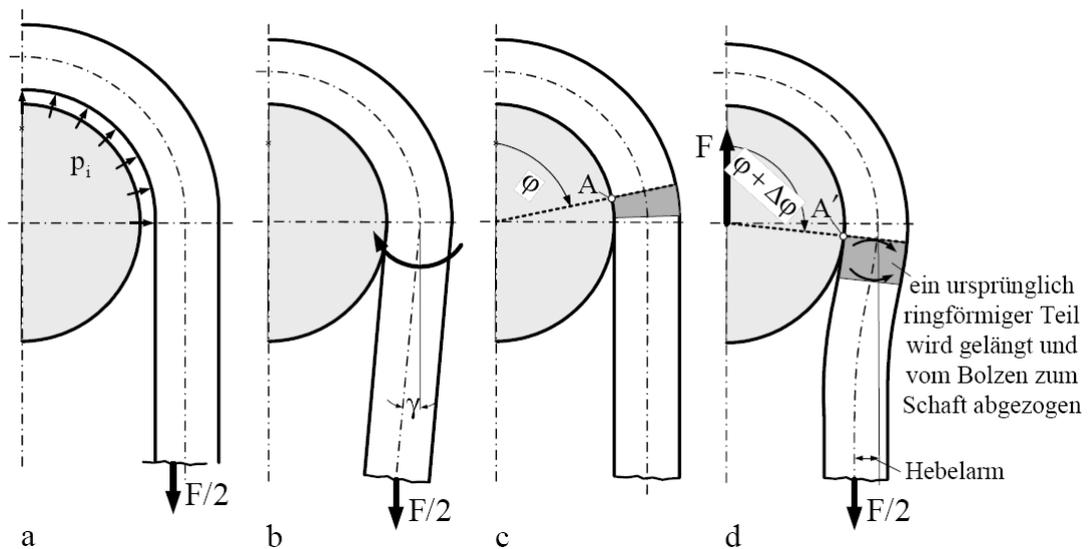


Abb.2-19: Effekt eines auftretenden Biegemoments unter Lastdehnung

2.4 VERSUCHSERGEBNISSE

2.4.1 VERSUCHSREIHE S1

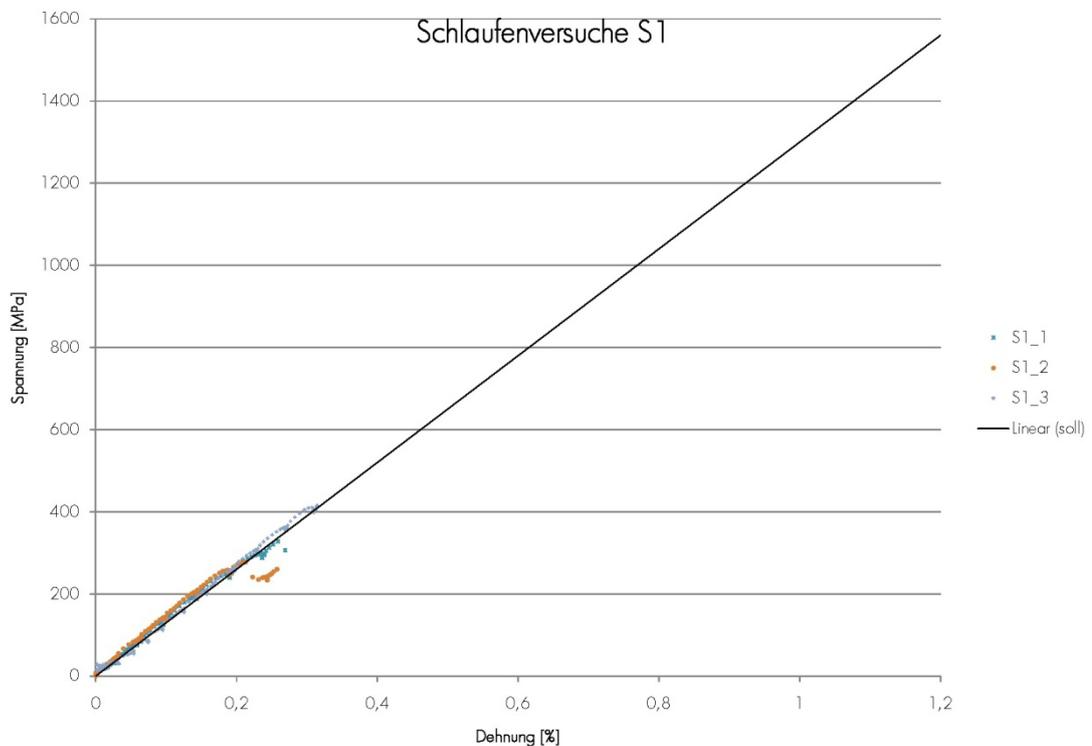


Abb.2-20: Ergebnisse Versuchsreihe S1 (grafisch)

| Prüfkörper | S1_1 | S1_2 | S1_3 |
|--|--------|--------|--------|
| $T_{max,erwartet}$ [kN] | 122,26 | 122,26 | 122,26 |
| $T_{max,gemessen}$ [kN] | 26,24 | 22,21 | 33,21 |
| erreichte Kraft [%] | 21,5 | 18,2 | 27,2 |
| $\sigma_{max,gemessen}$ [N/mm ²] | 306,58 | 260,31 | 415,12 |

Tab.2-5: Ergebnisse Versuchsreihe S1 (tabellarisch)

Der Bruch der Schlaufen der Reihe S1 erfolgte in allen Fällen unter einem viel zu niedrigen Lastniveau. Da augenscheinlich der Bruch jeweils an einer, zuvor schon beschriebenen, oberflächlichen Störstelle auftrat, konnte auf die Berücksichtigung bzw. Neuberechnung mit den realen Querschnittswerten verzichtet werden. Wie in Abbildung 2-3 ersichtlich, ist an diesen Fehlstellen keine parallele Faserlage gegeben. Daher wird der innere Schlaufenbereich (parallele Faserlage) überbelastet, während die äußeren Fasern noch

nicht unter Zugspannungen stehen. Dies führt in weiterer Folge zu einem verfrühten Versagen der CFK-Schlaufe.

Die unten angeführte Abbildung zeigt exemplarisch das Versagen an einer herstellungsbedingten Fehlstelle.



Abb.2-21: Bruch an einer Falte (exemplarisch)

2.4.2 VERSUCHSREIHE S2

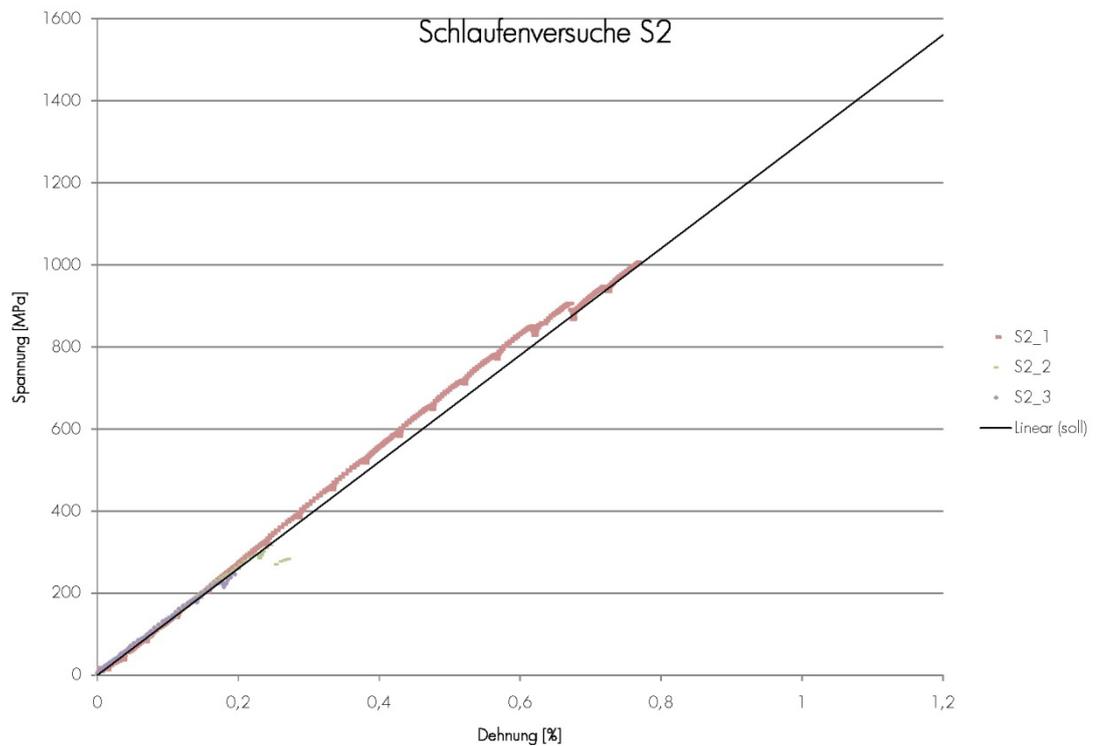


Abb.2-22: Ergebnisse Versuchsreihe S2 (grafisch)

| Prüfkörper | S2_1 | S2_2 | S2_3 |
|--|---------|--------|--------|
| $T_{max,erwartet}$ [kN] | 152,02 | 152,02 | 152,02 |
| $T_{max,gemessen}$ [kN] | 100,55 | 31,70 | 24,62 |
| erreichte Kraft [%] | 66,1 | 20,9 | 16,2 |
| | | | |
| $\sigma_{max,gemessen}$ [N/mm ²] | 1005,51 | 283,13 | 246,18 |

Tab.2-6: Ergebnisse Versuchsreihe S2 (tabellarisch)

Das Versagen trat abermals an beschriebenen Fehlstellen des Querschnittes auf - Versuchskörper S2_1 ausgenommen. Hier trat das gewünschte Versagen ein, welches durch das kontinuierliche Ausfallen der einzelnen Fasern charakterisiert wird (siehe Abbildung unten). Das endgültige Versagen trat jedoch entlang einer Falte ein.

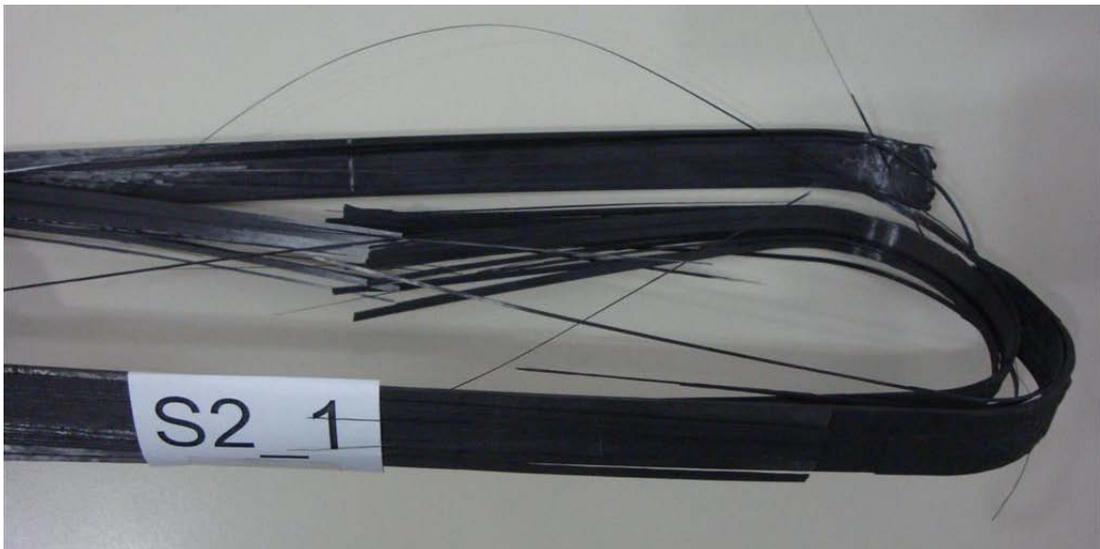


Abb.2-23: Versagensbild Versuchskörper S2_1

Vergleicht man in Abbildung 2-22 die Steigung der einzelnen Versuchsergebnisse (welche den E-Modul des Materials wiedergeben), mit der gegebenen Soll-Arbeitslinie des CFK-C02, so lassen sich folgende Aussagen treffen:

- A) Der erreichte Elastizitätsmodul liegt im Bereich des prognostizierten E-Moduls von 126000 [N/mm²].
- B) Der E-Modul streut kaum, was an den beinahe kongruenten Linien erkennbar ist (dies trifft prinzipiell auch auf die Versuchsreihe S1 zu).

2.4.3 VERSUCHSREIHE S3

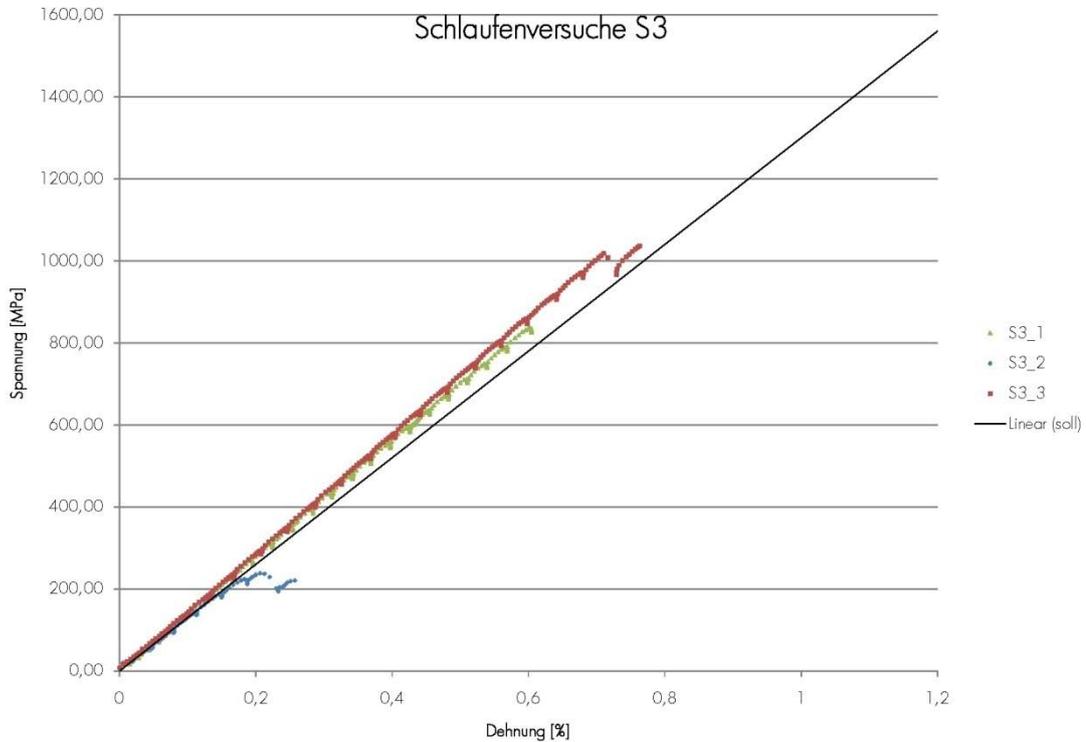


Abb.2-24: Ergebnisse Versuchsreihe S3 (grafisch)

| Prüfkörper | S3_1 | S3_2 | S3_3 |
|--|--------|--------|---------|
| $T_{max,erwartet}$ [kN] | 181,45 | 181,45 | 181,45 |
| $T_{max,gemessen}$ [kN] | 100,33 | 28,64 | 124,40 |
| erreichte Kraft [%] | 55,3 | 15,8 | 68,6 |
| $\sigma_{max,gemessen}$ [N/mm ²] | 825,10 | 220,97 | 1036,66 |

Tab.2-7: Ergebnisse Versuchsreihe S3 (tabellarisch)

Versuchsreihe S3 zeichnet sich dadurch aus, dass zumindest zwei der drei Versuchskörper mehr als 50 [%] der erwarteten Bruchlast erreichen. Schlaufe S3_3 zeigt dasselbe Versagensbild wie S2_1 auf. Dies ist bezeichnend für die beiden Versuchskörper mit der größten Auslastung. Versuchskörper S3_1 überschreitet die Schwelle von 100 [kN] und versagt dann an einer Fehlstelle.

2.5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

- A) Sieben von neun Versuchskörpern - dies entspricht rund 78 [%] - versagen an zuvor aufgezeigten Fehlstellen (herstellungsbedingt), die ohne technische Hilfsmittel mit freiem Auge ersichtlich sind. Hier werden lediglich Ausnutzungsgrade zwischen 16 und 27 [%] erzielt.
- B) Jene zwei Versuchskörper, an welchen das charakteristische Versagensbild der Zerfaserung der einzelnen Kohlefaserstränge auftritt, erreichen mit Abstand die höchste Auslastung der errechneten Werte. Sie erreichen jedoch trotzdem nur rund 2/3 der erforderlichen Last.
- C) Unberücksichtigt in den Berechnungen blieben die teilweise eklatanten Geometrieabweichungen, die bei einem fehlerfreien (faltenfreien) Versuchskörper in jedem Fall zu tragen gekommen wären.

Berücksichtigt man beispielsweise die vorhandene Querschnittschwächung auf 89 [%] an Schlaufe S3_3, kann man von einem Erreichen der berechneten Bruchlast auf 77 [%] sprechen. Andernfalls sind es rund 69 [%].
- D) Ein lineares Materialverhalten ist deutlich erkennbar.
- E) Der erreichte E-Modul des Materials liegt im Bereich des erwarteten Wertes von 126000 [N/mm²].
- F) Der E-Modul streut kaum, was an den beinahe kongruenten Linien erkennbar ist.
- G) Aufgrund der aufgetretenen Fertigungsmängel wird auf die Berechnung von Streuung und Mittelwert der Versuchsreihe verzichtet.

3 VERSUCH 2: MODIFIZIERTE CFK-SCHLAUFE

3.1 HINTERGRUND DES VERSUCHES

Aufgrund der unerwartet schlechten Ergebnisse aus Versuch 1 sollen vier idente, modifizierte CFK-Schlaufen hergestellt und im Zuge des Versuchs 2 getestet werden.

Laut Hersteller soll ein zusätzliches Einlegen von bidirektionalem Gewebe die Bildung der zuvor erwähnten Falten während des Herstellungsprozesses vermindern.

Zweck des Versuches ist abermals die Sicherstellung der erwarteten Materialeigenschaften.

3.2 VERSUCHSREIHE UND VERSUCHSAUFBAU

Wie zuvor erwähnt, besteht die Versuchsreihe S4 aus vier identen Versuchskörpern. Diese vier Schlaufen unterscheiden sich also nicht, wie in Versuch 1, in ihrer Wanddicke.

| Materialreihen | S4 |
|----------------------------|------|
| bschl [mm] | 2,5 |
| hschl [mm] | 20,0 |
| Aschl/2 [mm ²] | 50,0 |

Tab.3-1: Sollwert der Schlaufenreihe S4

3.2.1 DOKUMENTATION DER VERSUCHSREIHE

A) S4_1:

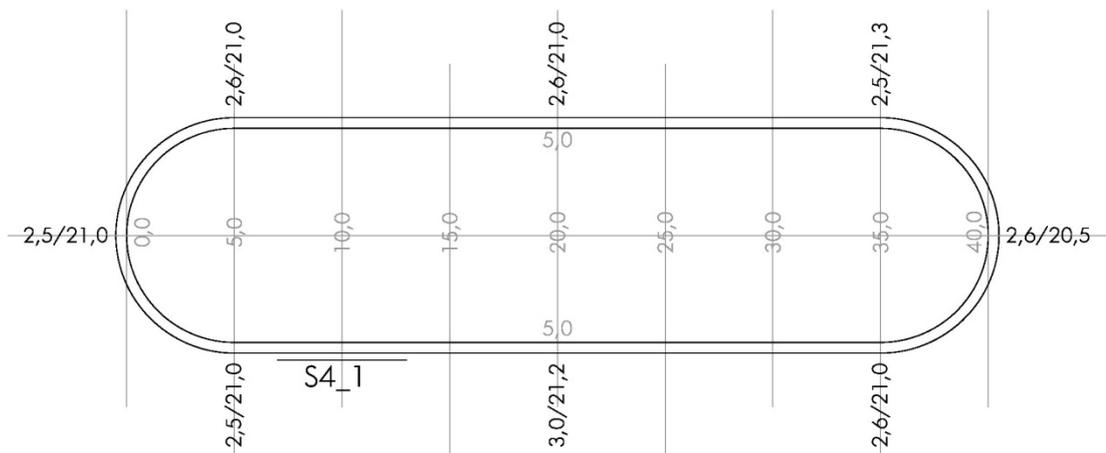


Abb.3-1: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S4_1

Die Schlaufe S1_4 weist an keiner Stelle eine signifikante Querschnittschwächung auf. Ferner sind keine größeren Faltenbildungen sichtbar.

B) S4_2:

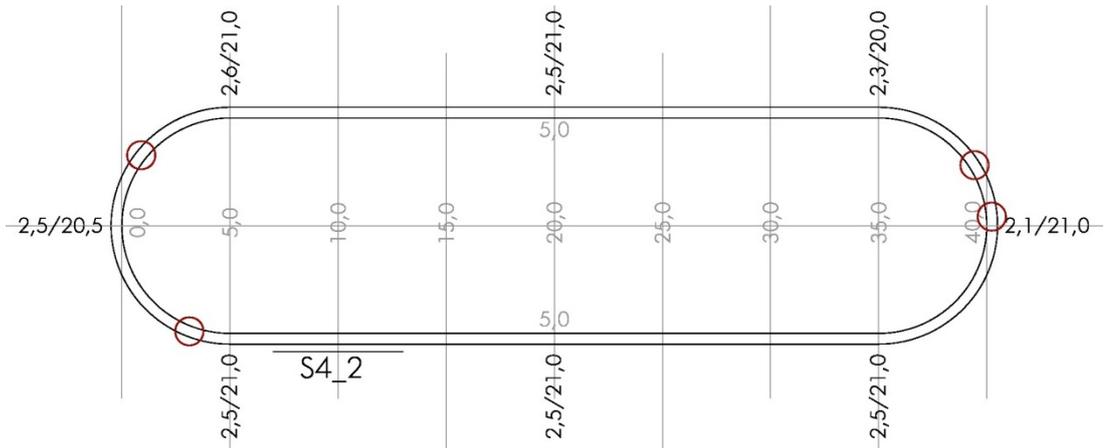


Abb.3-2: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S4_2

Am Versuchskörper S4_2 können an mehreren Stellen beschriebene Fehlstellen (Falten) festgestellt werden. Zusätzlich tritt im Bereich der Krümmung der Schlaufe eine Querschnittschwächung auf.

C) S4_3:

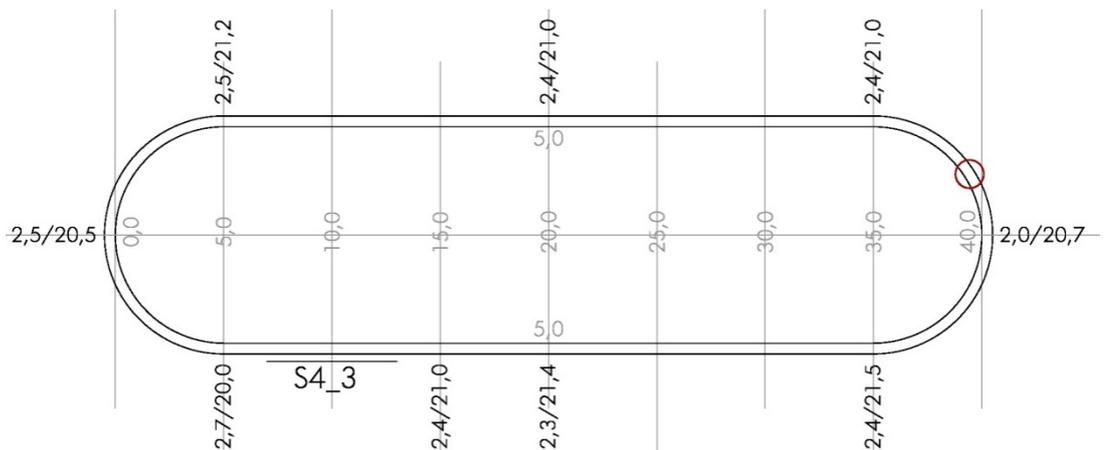


Abb.3-3: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S4_3

Schlaufe S4_3 unterschreitet an einer Stelle (Krümmungsbereich) die Soll-Querschnittsfläche um 8,6 [mm²] und weist ebenfalls Falten auf.

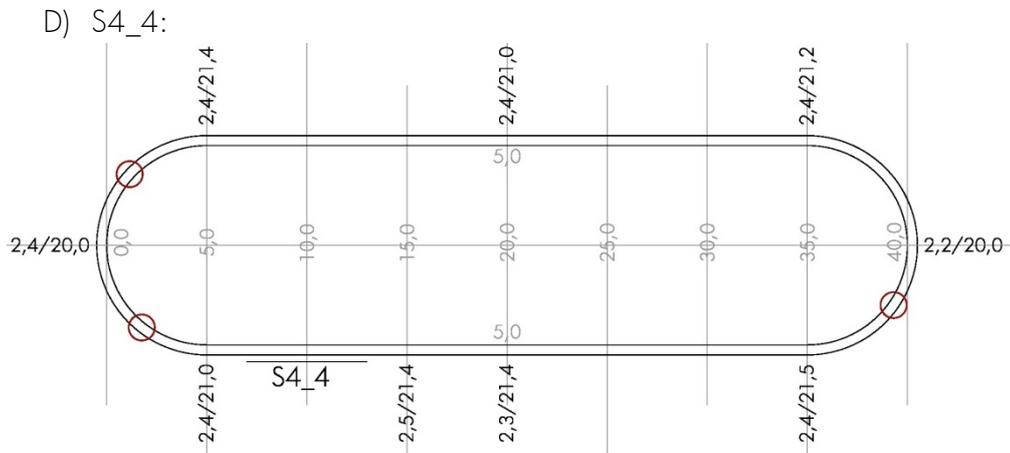


Abb.3-4: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S4_4

An Schlaufe 4 sind ebenfalls Querschnittschwächungen und Fehlstellen erkennbar.

3.2.2 VERSUCHSAUFBAU

Der Versuchsaufbau ändert sich zu dem aus Versuch 1 nicht (siehe Abbildung 2-13).

3.3 VERSUCHSERGEBNISSE

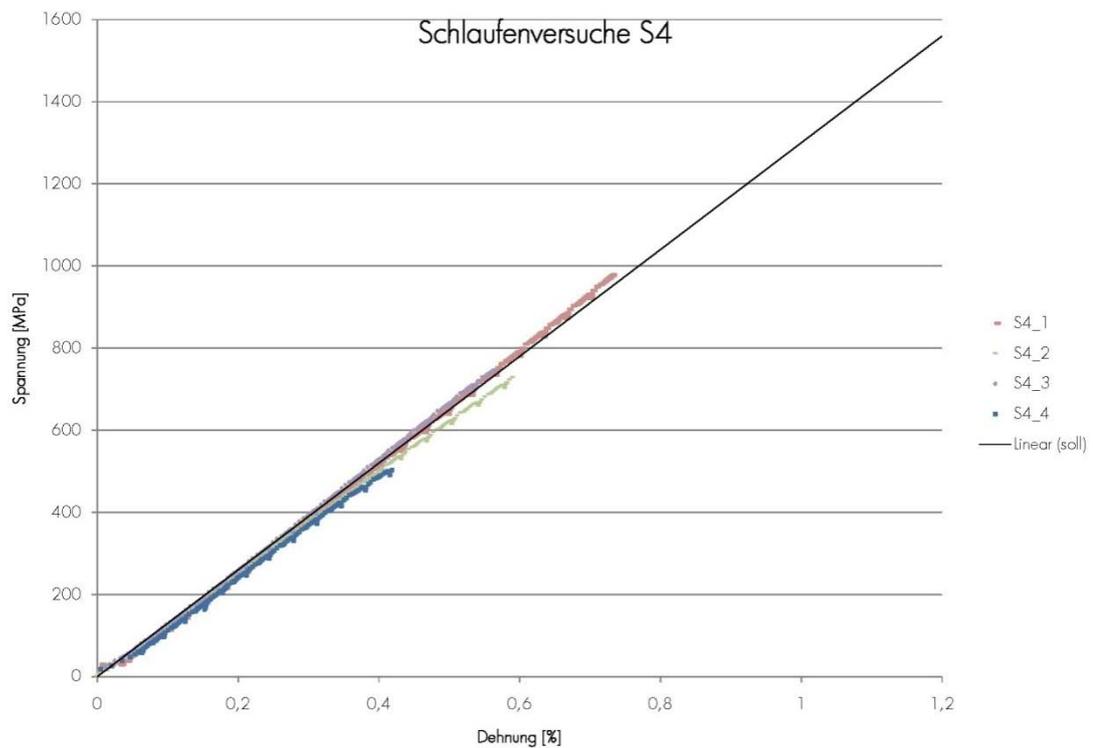


Abb.3-5: Ergebnisse Versuchsreihe S4 (grafisch)

| Prüfkörper | S4_1 | S4_2 | S4_3 | S4_4 |
|--|--------|--------|--------|--------|
| $T_{max,erwartet}$ [kN] | 152,02 | 152,02 | 152,02 | 152,02 |
| $T_{max,gemessen}$ [kN] | 97,77 | 73,02 | 74,58 | 50,31 |
| erreichte Kraft [%] | 64,3 | 48,0 | 49,1 | 33,1 |
| | | | | |
| $\sigma_{max,gemessen}$ [N/mm ²] | 977,71 | 730,18 | 745,84 | 503,08 |

Tab.3-2: Ergebnisse Versuchsreihe S4 (tabellarisch)

Die angeführten Versuchsergebnisse zeigen, dass die Maximallast, wie auch schon in den Versuchsreihen zuvor, bei einer Versagenscharakteristik, wie sie Abbildung 3-6 dargestellt ist, auftritt. In dieser Abbildung ist auch das verarbeitete CFK-Gewebe deutlich ersichtlich.

Bei jenen Schlaufen, an denen vermehrt Falten auftraten, erfolgte auch der „vorzeitige“ Bruch entlang dieser.



Abb.3-6: Versagensbild Versuskörper S4_1

3.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

- A) Drei von vier Versuskörpern - dies entspricht 75 [%] - versagen an zuvor aufgezeigten Fehlstellen (herstellungsbedingt), die ohne technische Hilfsmittel mit freiem Auge ersichtlich sind. Hier werden lediglich Ausnutzungsgrade zwischen 33 und 49 [%] erzielt.

- B) Ein Versuchskörper, an welchen das charakteristische Versagensbild der Zerfaserung der einzelnen Kohlefaserstränge auftritt, erreicht die höchste Auslastung der errechneten Werte.
- C) Das Einlegen der bidirektionalen Gewebelagen hat augenscheinlich wenig Einfluss auf die herstellungsbedingte Faltenbildung an den Krümmungsstellen der Schlaufe.
- D) Lineares Materialverhalten und erwarteter E-Modul.

4 ANALYSE MÖGLICHER FASERVERBUNDWERKSTOFFE

Obwohl die durchwegs schlechten Ergebnisse (siehe Kapitel 2 und 3) der CFK-Schlaufen auf einen Herstellungsmangel zurückzuführen waren, löste dies eine Diskussion aller Projektbeteiligten über die Wahl des Materials aus. Aus diesem Grund wurden im folgenden Abschnitt dieser Arbeit mögliche Faserverbundwerkstoffe miteinander verglichen.

4.1 ANFORDERUNGSPROFIL

Um die generelle Konzipierung und die Wahl des geeignetsten Faser-Verbund-Werkstoffes auf Materialebene zu ergründen, wurde dieser Teil des Projektes der Fa. 4a engineering GmbH anvertraut.

Die 4a engineering GmbH ist ein technologieorientiertes Forschungs- und Entwicklungsunternehmen mit einem Schwerpunkt im Bereich der Kunststoff- und Materialwissenschaften. Die Kernkompetenz liegt im Entwickeln und Optimieren neuer Produkte und Prozesse unter Anwendung der Gesetze der Physik. [8]

Um die gewünschten Eigenschaften der konzipierten Schlaufen zu definieren, wurde das Anforderungsprofil in Tabelle 4-1 erstellt. Das gesamte Anforderungsprofil, welches der Fa. 4a übergeben wurde, kann auch dem Plananhang entnommen werden.

| Anforderungen | |
|---|--|
| Innenabmessung der Schlaufe | L= 800 [mm] R= 50 [mm] B= 100 [mm] H= 20-max.25 [mm] t= variabel |
| E-Modul Faserverbund | rd. 50000 [MPa] |
| Bemessungslast/Schlaufe (Bauteilfestigkeit) | 125 [kN]/Schlaufe |
| Dehnsteifigkeit | Min. 15000 [kN] |
| Schlaufenanzahl für Prüfaufbau: | |
| 1) Vorversuche: | 10 [Stk.] |
| 2) Ausziehversuche: | 15 [Stk.] |
| 3) Großversuch: | 12 [Stk.] |

Tab.4-1: Anforderungsprofil

4.2 VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER MATERIALIEN

Da zum Zeitpunkt der Materialanalyse das Herstellungsverfahren der Faserverbundschlaufen noch nicht fixiert wurde, wird für die weitere Betrachtung von einem Faservolumenanteil von 55 [%] ausgegangen. Dies stellt einen Sicherheitsfaktor für die Analyse und die weitere Verwendung des FKV dar. Nachfolgend aufgelistete Daten sind aus der Ergebnispräsentation der Fa. 4a entnommen.

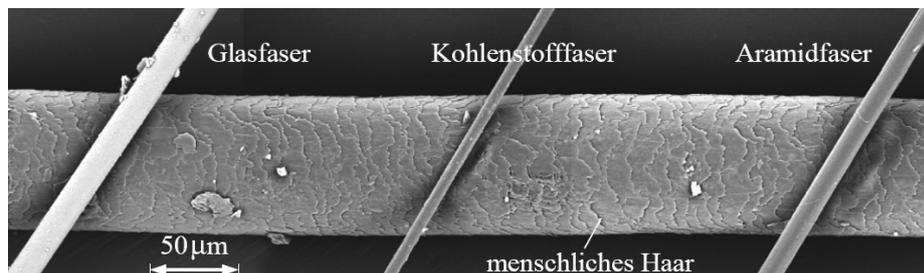


Abb.4-1: Unterschiedliche Faserdurchmesser [3]

Aus der großen Anzahl von Fasertypen wurden zwei Vertreter organischer Fasern – Kohlenstoff und Aramid – und zwei Beispiele für anorganische Fasern – Glas und Basalt – im Folgenden näher betrachtet:

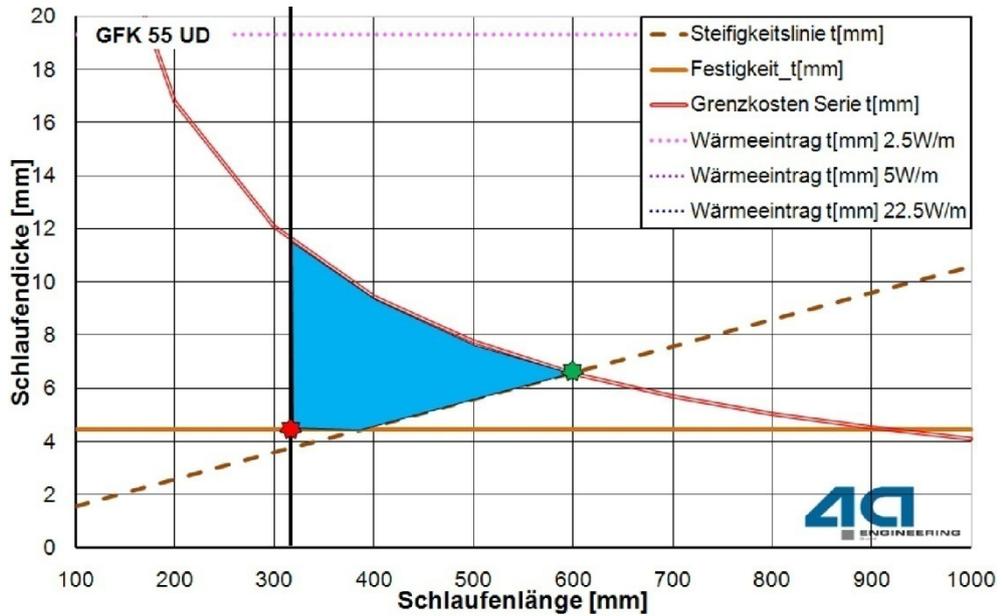
4.2.1 GLASFASER

| Vorteile | Nachteile |
|--|--|
| sehr hohe Längszug- sowie hohe Längs-Druckfestigkeit | durch Abspießen einzelner gebrochener Fasern kündigt sich Versagensbeginn an |
| hohe Bruchdehnung | niedriger E-Modul |
| niedrige Wärmeleitfähigkeit | |
| unbrennbar | |
| niedriger Preis | |
| Kriechneigung gering | |

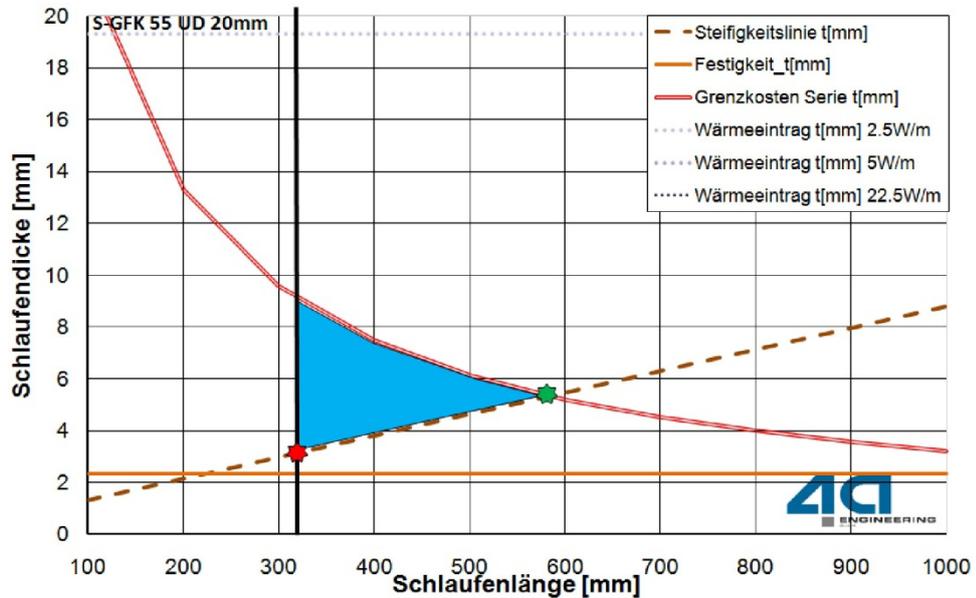
Tab.4-2: Eigenschaften Glasfaser [3]

Wird ein Glasfaserverbund längere Zeit hoher Temperatur ausgesetzt, sinkt die Festigkeit. Spezialgläser wie R- oder S-Glas zeichnen sich gegenüber E-Glas durch wesentlich geringere Temperaturempfindlichkeiten aus (bei lang andauernden hohen Temperaturen notwendig). Für den direkten Einsatz im alkalischen Milieu sind E-Glasfasern nicht geeignet, dies trifft bei Einsatz einer Matrix jedoch nicht zu. [3]

Aus den Betrachtungen der Mindestfestigkeit, der Mindeststeifigkeit, der Grenzkosten und der Wärmeleiteigenschaften konnten von der Fa. 4a Kennfelder erstellt werden, um die Materialauswahl zu erleichtern.



Tab.4-3: Kennfeld E-GFK [10]



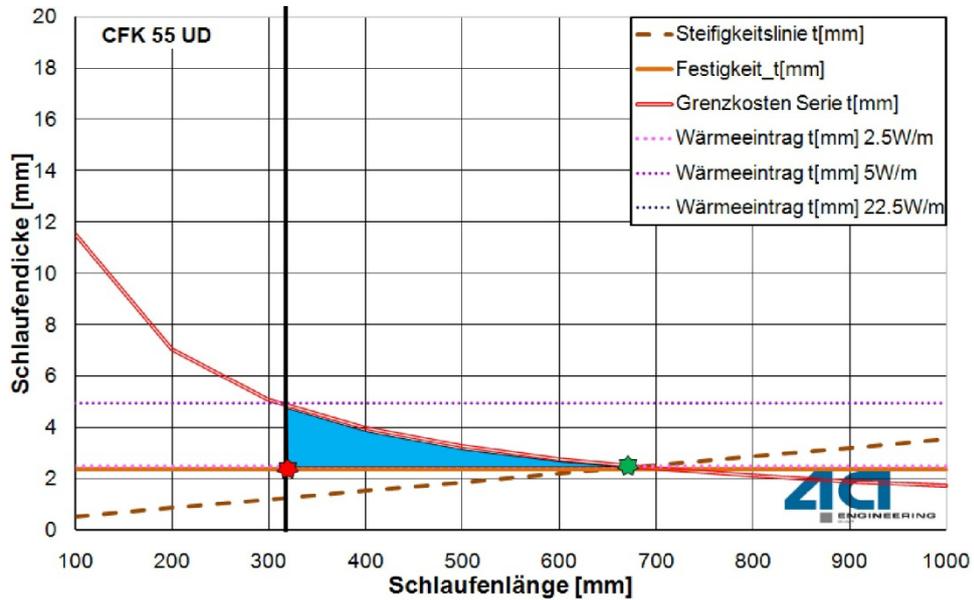
Tab.4-4: Kennfeld S-GFK [10]

Aus den Abbildungen 4-3 und 4-4 geht hervor, dass für die blau hinterlegten Flächen eine große Anzahl möglicher Schlaufendicken zulässig wäre. Jedoch besneidet die Grenzlinie der Kosten (rot) die geforderte Schlaufenlänge von 80 [cm]. Die definierten Grenzkosten mit maximal 6 [€/Stück] sind somit nicht einhaltbar.

4.2.2 KOHLEFASER

| Vorteile | Nachteile |
|--------------------------|--|
| hohe Festigkeit | anisotrop (E_{quer} um eine Größenordnung kleiner als $E_{\text{längs}}$) |
| hoher E-Modul | thermische Ausdehnungseigenschaften |
| hohe Ermüdungsfestigkeit | sehr sprödes Bruchverhalten |
| | niedrige faserparallele Druckfestigkeit |
| | hohe Wärmeleitfähigkeit |
| | hoher Preis |

Tab.4-5: Eigenschaften Kohlefaser [3]



Tab.4-6: Kennfeld S-GFK [10]

Grafik 4-6 zeigt im Vergleich zu den Kennfeldern der Glasfaser sehr schön die flachere Neigung der begrenzenden Steifigkeitslinie, was auf den höheren E-Modul des CFK-Materials zurückzuführen ist.

4.2.3 BASALTFASER

| Vorteile | Nachteile |
|---------------------------------|--|
| hohe Temperatureinsatzgrenze | teurer als E-Glas, billiger als S-Glas |
| hohe chemische Beständigkeit | |
| höhere Zugfestigkeit als E-Glas | |
| höhere Steifigkeit als E-Glas | |

Tab.4-7: Eigenschaften Basaltfaser [3]

4.2.4 ARAMIDFASER

| Vorteile | Nachteile |
|--|---|
| sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit | stark anisotrop |
| höhere Zugfestigkeit als Glasfaser | niedrige faserparallele Druckfestigkeit |
| hoher Widerstand gegen Rissausbreitung | Faser nimmt Wasser auf |
| | keine UV-Beständigkeit |
| | Neigung zum Kriechen |
| | hoher Preis |

Tab.4-8: Eigenschaften Aramidfaser [3]

Die Aramidfaser weist, herausgelöst betrachtet, ein sehr hohes Potenzial im Bereich der Wärmeleitfähigkeit auf (1/25 von GFK). Der hohe Wärmedämmwert kann jedoch in der ganzheitlichen Betrachtung des Thermokorbs nicht in derselben Intensität genutzt werden. Dies kann damit begründet werden, dass sich der äquivalente Wärmedurchlasswiderstand des Gesamtsystems aus mehreren Einzelbauteilen zusammensetzt und die Faserverbundschlaufen hier einen eher geringen Einfluss bewirken.

4.2.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die verwendeten Eingangswerte für die Bewertung der untersuchten Faserverbunde werden in Tabelle 4-9 angeführt.

Die Faserverbunde aus Basalt- und Aramidfaser werden für die weitere Verwendung ausgeschlossen. Die Kohlefaser wird aufgrund der verhältnismäßig schlechten Wärmeleitfähigkeit und der hohen Kosten bzw. des extrem spröden Versagensverhalten nicht weiter berücksichtigt. Aus Kostengründen und des guten Wärmedämmverhaltens wurde für die weitere Bearbeitung des Projektes die Glasfaser gewählt.

| Bezeichnung | S GFK UD55 | E GFK UD55 | Basalt UD55 | CFK UD55 | ARA UD55 | |
|---------------------------------|------------|------------|-------------|----------|----------|--------|
| Faser | S-Glas | E-Glas | Basalt | T300 | Kevlar | [-] |
| E1 | 86810 | 72000 | 89000 | 220500 | 152000 | [MPa] |
| E2 | 86810 | 72000 | 89000 | 14000 | 4100 | [MPa] |
| σ_1 -Zug | 4500 | 2400 | 3700 | 3530 | 2800 | [MPa] |
| λ | 1 | 1 | 1,7 | 17 | 0,04 | [W/mK] |
| | | | | | | |
| Matrix | EP3500 | EP3500 | EP3500 | EP3500 | EP3500 | [-] |
| E | 3500 | 3500 | 3500 | 3500 | 3500 | [MPa] |
| σ -Zug | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | [MPa] |
| λ | 0,216 | 0,216 | 0,216 | 0,216 | 0,216 | [W/mK] |
| | | | | | | |
| Verbund | | | | | | |
| Fasergehalt | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | [%] |
| E1 | 48894 | 40655 | 50557 | 121943 | 70333 | [MPa] |
| E2=E3 | 10330 | 10135 | 10382 | 8760 | 5976 | [MPa] |
| λ | 0,65 | 0,65 | 1,03 | 9,44 | 0,12 | [W/mK] |
| σ_1 -Zug | 2475 | 1320 | 2035 | 1942 | 1540 | [Mpa] |
| Zeitstandfestigkeitsfaktor | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,97 | 0,62 | [-] |
| Zeitstandfestigkeit (10^5 h) | 1832 | 977 | 1506 | 1884 | 955 | [Mpa] |
| Grenzkosten (Serie) | 23 | 18 | 30 | 55 | 45 | [€/kg] |

Tab.4-9: Vergleich möglicher Faserverbunde [10]

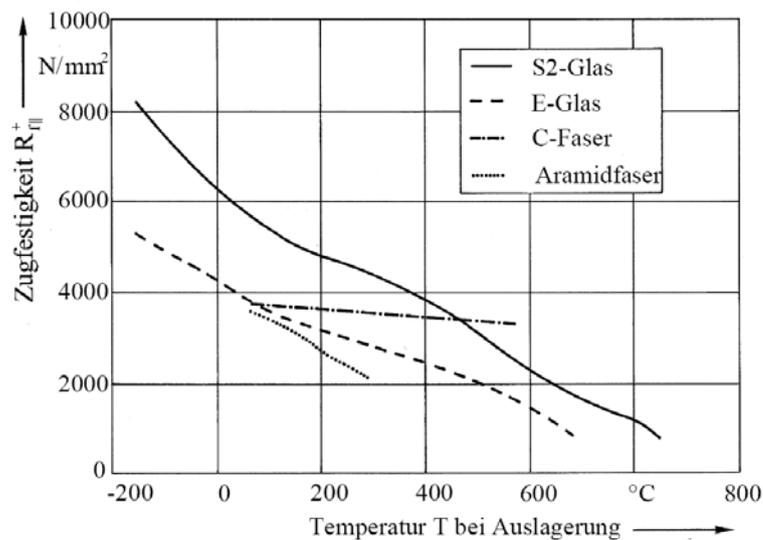


Abb.4-2: Festigkeitseigenschaften bei Temperatureinwirkung [11]

4.3 ÜBERLEGUNGEN ZUR PROTOTYPENHERSTELLUNG

Die Herstellung der neuen Prototypen aus GFK-Material erfolgt, wie schon die Prüfkörper zuvor, aus Prepregs, welche auf ein Formwerkzeug gewickelt werden. Das Werkzeug wird bei der Wicklung auf 50-60 [°C] vorgewärmt. Zusätzlich ist bei höheren Schlaufendicken eine Zwischenkompaktierung des Bauteils angedacht, um die fehlerlose Herstellung zu garantieren.

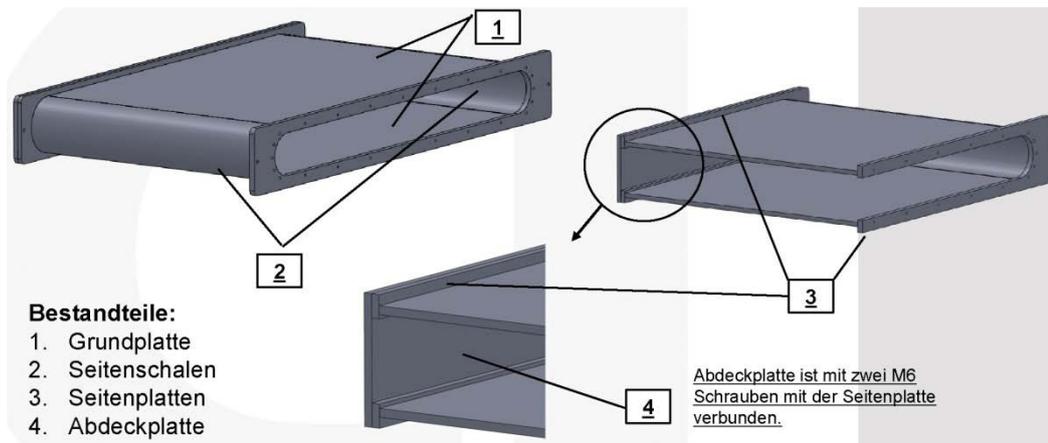


Abb.4-3: Werkzeug zur Prototypherstellung (Skizze) [3]

Um die optimale Schlaufenlänge zu bestimmen, wird diese aufgrund der notwendigen Verankerungslänge der Anschlussbewehrung ermittelt. Die Ermittlung erfolgte für die minimal zugelassene Betongüte von C20/25 bzw. den maximalen Durchmesser der Anschlussbewehrung von 12 [mm].

Bemessungswert der Verankerungslänge:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad (4-1)$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{1,5}{1,5}$$

$$f_{bd} = 2,25 \text{ [MPa]}$$

Erläuterungen:

| | |
|-----------|--|
| f_{bd} | Bemessungswert der Verbundfestigkeit [N/mm ²] |
| η_1 | Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundbedingungen [-] |
| η_2 | Beiwert zur Berücksichtigung des Stabdurchmessers [-] |
| f_{ctd} | Bemessungswert der Betonzugfestigkeit [N/mm ²] |

Basiswert der Verankerungslänge:

$$l_{b,rqd} = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \quad (4-2)$$

$$l_{b,rqd} = \frac{12}{4} \cdot \frac{478}{2,25}$$

$$l_{b,rqd} = 637 \text{ [mm]}$$

Erläuterungen:

| | |
|---------------|---|
| $l_{b,rqd}$ | Basiswert der Verankerungslänge [mm] |
| \varnothing | Stabdurchmesser [mm] |
| σ_{sd} | Bemessungsspannung des Stabes, von der aus die Verankerungslänge gemessen wird [N/mm ²] |
| f_{bd} | Bemessungswert der Verbundfestigkeit [N/mm ²] |

Bemessungswert der Verankerungslänge:

$$l_{bd} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (4-3)$$

$$l_{bd} = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 637$$

$$l_{bd} = 312 \text{ [mm]} > l_{b,min}$$

$$l_{b,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,3 \cdot l_{b,rqd} \\ 10 \cdot \varnothing \\ 100 \end{array} \right\} \quad (4-4)$$

$$l_{b,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,3 \cdot 637 \\ 10 \cdot 12 \\ 100 \end{array} \right\}$$

$$l_{b,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 191 \\ 120 \\ 100 \end{array} \right\}$$

$$l_{b,min} = 191 \text{ [mm]}$$

Erläuterungen:

| | |
|----------|--|
| l_{bd} | Bemessungswert der Verankerungslänge [mm] |
| a_1 | Beiwert zur Berücksichtigung der Biegeform [-] |
| a_2 | Beiwert zur Berücksichtigung der Mindestbetondeckung [-] |

| | |
|-------------|---|
| α_3 | Beiwert zur Berücksichtigung der Querbewehrung [-] |
| α_4 | Beiwert zur Berücksichtigung von angeschweißten Querstäben [-] |
| α_5 | Beiwert zur Berücksichtigung von Druck quer zur Spaltzugrissebene [-] |
| $l_{b,min}$ | Mindestverankerungslänge [mm] |

Minimale FKV-Schlaufenlänge:

$$L_{min} = 2 \cdot (l_{bd} + c_1) + 100 \quad (4-5)$$

$$L_{min} = 2 \cdot (312 + 50) + 100$$

$$L_{min} = 804 \text{ [mm]}$$

Erläuterungen:

c_1 Betondeckung [mm]

Aus den durchgeführten Berechnungen bzw. der Begrenzung auf eine Anschlussbewehrung des Durchmessers von 12 [mm] konnte eine minimale Schlaufenlänge (Innenmaß) von 800 [mm] ermittelt werden. Diese Einbindelänge von 350 [mm] wird in den geplanten Ausziehversuchen noch näher betrachtet werden.

Für den Maximaldurchmesser 10 [mm] ergeben sich folgende Werte:

$$f_{bd} = 2,25 \text{ [MPa]}$$

$$l_{b,rqd} = 531 \text{ [mm]}$$

$$l_{bd} = 260 \text{ [mm]} > l_{b,min}$$

$$L_{min} = 620 \text{ [mm]}$$

5 VERSUCH 3: DRUCKELEMENT

Versuch 3 wurde im Versuchskonzept vorgezogen, um der Klärung des FKV-Materials Zeit einzuräumen (siehe Kapitel 4). Der ursprünglich geplante Ablauf sah hier den Ausziehversuch von Schlaufen aus Normalbeton vor.

5.1 HINTERGRUND DES VERSUCHES

Versuch 3 beinhaltet eine Versuchsreihe mit fünf Versuchskörpern, die aus den Einzelkomponenten UHPC-Druckelement, Stahlbewehrung und Normalbeton aufgebaut sind. Die Probekörper werden im weiteren Verlauf mit D4-D9 bezeichnet. Die Benennung erfolgte in Übereinstimmung mit der Nummerierung der hergestellten Druckelemente.

Zweck des Versuches ist es einerseits, die Belastbarkeit der entwickelten UHPC-Druckelemente bzw. die Lastausbreitung im Normalbeton zu überprüfen.

5.2 DOKUMENTATION VERSUCHSREIHE UND VERSUCHSAUFBAU

5.2.1 VERWENDETE MATERIALIEN

5.2.1.1 UHPC-MISCHUNG

| Nr. | Datum | Bez. | Mischung | Ausbreitmaß [cm] | Prüfkörper |
|-----|------------|------|--|------------------|------------|
| C1_ | 28.01.2011 | _D1 | Feinkorn-Mörtelmischung (Küchler) | nicht ermittelt | |
| C1_ | 28.01.2011 | _S1 | | | |
| C2_ | 01.02.2011 | _D2 | Grobkorn-UHFB (Rezeptur TU Graz) | nicht ermittelt | |
| C2_ | 01.02.2011 | _S2 | | | |
| C3_ | 03.02.2011 | _D3 | Feinkorn-UHFB mit 2,0% (Rezeptur TU Graz) | 24,5 | C3_1 |
| C3_ | 03.02.2011 | _S3 | | | C3_2 |
| | | | | | C3_3 |
| C4_ | 07.02.2011 | _D4 | Feinkorn-UHFB mit 2,0% (Rezeptur TU Graz – Ansatz 2,0l) | 25,0 | C4_1 |
| C4_ | 07.02.2011 | _D5 | | | C4_2 |
| C4_ | 07.02.2011 | _D6 | | | |
| C5_ | 08.02.2011 | _D7 | Feinkorn-UHFB mit 2,0% (Rezeptur TU Graz – Ansatz 2,7l) | 25,0 | C5_1 |
| C5_ | 08.02.2011 | _D8 | | | C5_2 |
| C5_ | 08.02.2011 | _D9 | | | C5_3 |
| C5_ | 08.02.2011 | _S4 | | | |

Tab.5-1: Versuchsbetonagen UHPC

Um ein geeignetes Mischverhältnis zu erhalten, wurden verschiedene Rezepturen betrachtet. Tabelle 5-1 stellt das Herstellungsdatum und die Bezeichnung von Probeobjekten dar, welche vorab dem Zweck dienen, geeignete Bedingungen zu schaffen. Zielsetzung war es, fehlerlose Versuchsobjekte zu generieren.

Betonage C1: Der erste Betonvorgang erfolgte am 28.01.2011. Hierbei wurden ein Druckelement und ein Druck-/Schubelement hergestellt. Die hergestellten Objekte wiesen grobe Fehlstellen im oberen Bereich auf, wie man sie von Normalbeton erwarten würde. Dies ist auf den Einfüllvorgang zurückzuführen, der für die weiteren Betonagen angepasst wurde.

Betonage C2: Der zweite Herstellungsvorgang erfolgte mit Grobkorn-UHPC. Das Ergebnis war ein großer Luftporengehalt an der Oberfläche (siehe Abbildung unten).



Abb.5-1: Ergebnis Betonage C2

Betonage C3: Der verwendete Beton wurde mit der Feinkorn-UHPC-Mischung des Betonbau-Institutes hergestellt (siehe Tabelle 5-2).

Betonage C4: Betonierung C4 stellt die erste fehlerfreie Herstellung von Druckelementen dar. Ausschlaggebend für die gute Qualität der Herstellung waren die geeignete Rezeptur des Betons und das zeitlich richtig abgestimmte Einfüllen in die Schalungen. Hierbei ist darauf zu achten, nicht zu schnell zu füllen, da die filigranen Bauteilabmessungen das notwendige „Entlüften“ behindern.

Betonage C5: Hier wurden ebenfalls verwendbare Versuchskörper hergestellt (Bezeichnung siehe Tabelle 5-1)

| Einsatzstoff | Ansatz 2,7 [l] |
|-------------------------------------|--------------------------|
| | 160 [N/mm ²] |
| CEM I 42,5 R HS | 1,958 [kg] |
| Silicastaub (Silicoll) | 0,352 [kg] |
| Quarzmehl | 1,055 [kg] |
| Wasser | 0,488 [kg] |
| Zusatzmittel: | |
| ViscoCrete 20Gold (30 [%]Wirkstoff) | 0,086 [kg] |
| Stahlfaser (ø0,15×6 [mm]) | 0,211 [kg] |
| Gesteinskörnung: | |
| Quarzsand 0,3 - 0,8 [mm] | 2,262 [kg] |
| Kennwerte: | |
| Zielfestigkeit | 160 [N/mm ²] |
| Fasergehalt | 2,0 Vol.% |
| w/z - Wert | 0,280 [-] |
| w/b - Wert (w/(z+sftm)) | 0,237 [-] |

Tab.5-2: Rezeptur Feinkorn-UHPC (TU Graz)

5.2.1.2 NORMALBETON-MISCHUNG

Als Normalbeton wurde die unten angeführte Standardmischung für C20/25 der TVFA Graz verwendet. Um alle Versuchskörper herzustellen, wurde ca. die vierfache Ansatzmenge benötigt.

| Einsatzstoff | Ansatz 20,3 [l] |
|-------------------------|-----------------|
| | C20/25 |
| CEM II/A-S 42,5N | 6,50 [kg] |
| Wasser | 4,50 [kg] |
| Gesteinskörnung: | |
| 0/4 | 17,60 [kg] |
| 4/8 | 7,70 [kg] |
| 8/16 | 11,40 [kg] |
| Kennwerte: | |
| Größtkorn | 16 [mm] |
| w/z - Wert | 0,69 [-] |

Tab.5-3: Rezeptur C20/25 (TVFA TU Graz)

| Nr. | Datum | Bez. | Mischung | Ausbreitmaß [cm] | Prüfkörper |
|-----|------------|------|---|------------------|------------|
| C6_ | 15.02.2011 | _D4 | Normalbeton C20/25 (Rezeptur TVFA TU Graz) | nicht ermittelt | C6_1 |
| C6_ | 15.02.2011 | _D5 | | | C6_2 |
| C6_ | 15.02.2011 | _D6 | | | C6_3 |
| C6_ | 15.02.2011 | _D7 | | | C6_4 |
| C6_ | 15.02.2011 | _D9 | | | |

Tab.5-4: Versuchsbetonagen Normalbeton

5.2.2 HERSTELLUNG DER VERSUCHSKÖRPER

5.2.2.1 HERSTELLUNG DRUCKELEMENTE

Aufgrund der geometrisch äußerst aufwändigen Form der Druckelemente wurde die Schalung mit einer CNC-Fräse aus extrudiertem Polystyrol (kurz: XPS) gefertigt. Die Grundlage dafür stellte eine angefertigte CAD-Datei dar, welche in eine Stereolithographie exportiert wurde und als input file für die Fräse diente.

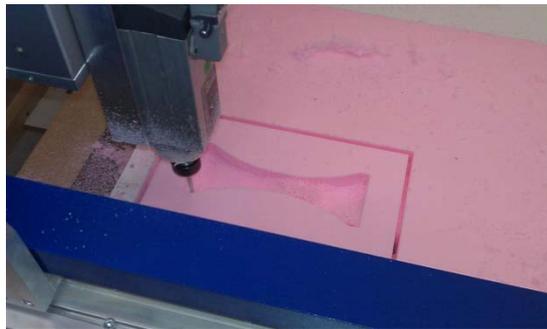


Abb.5-2: Herstellung der Schalung der Druckelemente

5.2.2.2 ZUSAMMENFÜGEN DER EINZELKOMPONENTEN

Die weiter verwendeten UHPC-Druckelemente tragen die Bezeichnungen D4, D5, D6, D7 und D9. Diese Bezeichnungen gelten ebenfalls für den Gesamtversuchskörper.

Um die hergestellten UHPC-Einzelteile zu prüfen, wurden folgende Versuchskörper konzipiert:

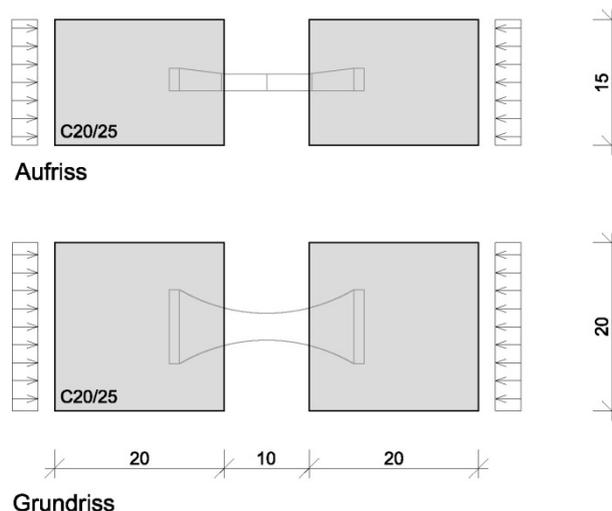


Abb.5-3: Abmessung Versuchskörper V3

Genauere Darstellungen (Schalungs- und Bewehrungspläne) sind dem Plananhang zu entnehmen.



Abb.5-4: Versuchskörper V3 vor Normalbetonfüllung

Besonderes Augenmerk bei der Schalungsherstellung wurde auf die maßgenaue Lage der Druckkörper gerichtet. Dies war erforderlich, um traglastmindernde Ausmittigkeiten, sprich Momentenbeanspruchungen, für den Druckversuch zu minimieren.

5.2.3 VERSUCHSAUFBAU

In Abbildung 5-5 ist der Versuchsaufbau für den Versuch der Druckelemente ersichtlich. Die technische Zeichnung links zeigt die Anordnung der Messaufnehmer am Versuchskörper. Kanal 1 gibt die aufgebrachte Kraft aus, Kanal 2 den Kolbenweg. Die Messungen der Wegaufnehmer an den Seiten der Versuchskörper werden über die Kanäle 3 bis 5 aufgenommen. Um Beschädigungen zu vermeiden, wurden diese Aufnehmer nicht bis zur Bruchlast am Versuchskörper belassen, sondern vorab demontiert.

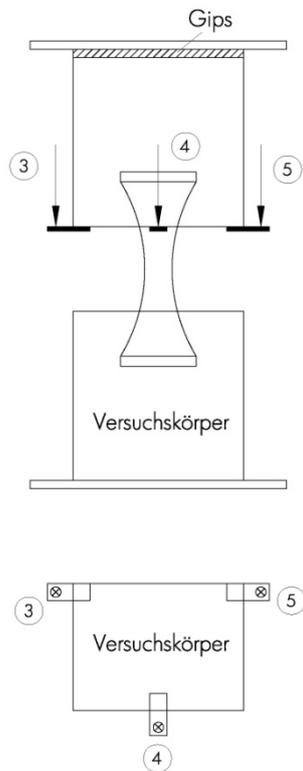


Abb.5-5: Versuchsaufbau V3

5.3 BERECHNUNGSMODELLE

5.3.1 HÄNDISCHE BERECHNUNG

Für die folgenden Berechnungen wurden charakteristische Werte angesetzt, ohne Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen:

Maximallast UHPC-Element:

Aus der minimalen Querschnittsfläche (20/32 [mm]) und der Druckfestigkeit kann die maximal aufnehmbare Kraft ermittelt werden:

$$N_{\max} = f_{c,UHPC} \cdot A \quad (5-1)$$

$$N_{\max} = 143,5 \cdot 20,0 \cdot 32,0 \cdot 10^{-3}$$

$$N_{\max} = 91,8 \text{ [kN]}$$

Lasteinleitung – Bemessung der Stahleinlagen:

Um die nötige Stahlbewehrung zu ermitteln, kann nach [5], für Kräfteinleitungsbereiche bei zentrischer Einleitung, folgende Formel verwendet werden:

$$F_{\max} = \frac{N_{\max}}{4} \cdot \left(1 - \frac{h_1}{h}\right) \quad (5-2)$$

$$F_{\max} = \frac{91,8}{4} \cdot \left(1 - \frac{15}{20}\right)$$

$$F_{\max} = 5,7 \text{ [kN]}$$

$$A_{s,\text{erf}} = \frac{F_{\max}}{f_{yk}} \quad (5-3)$$

$$A_{s,\text{erf}} = \frac{5,7 \cdot 10^3}{550}$$

$$A_{s,\text{erf}} = 0,10 \text{ [cm}^2\text{]} < A_{s,\text{vorh}}$$

Formel (5-2) stellt das mathematische Abbild von Grafik 5-6 dar. Es handelt sich hier um ein mögliches Fachwerkmodell, um den Kräfteinleitungsbereich zu beschreiben.

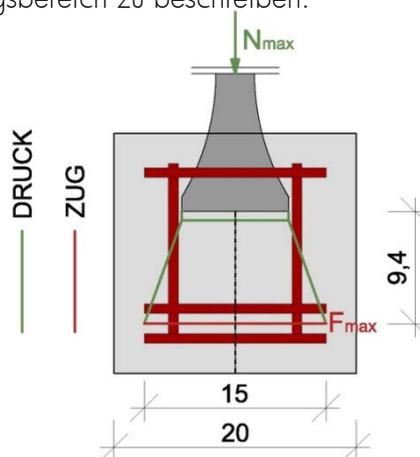


Abb.5-6: Fachwerkmodell Lasteinleitung V3

Lasteinleitung – Bemessung Normalbeton:

$$F_{Rd,u} = A_{c0} \cdot f_{ck} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 \cdot A_{c0} \cdot f_{ck} \quad (5-4)$$

$$F_{Rd,u} = 88 \cdot 27 \cdot 20 \cdot \sqrt{\frac{200 \cdot 81}{88 \cdot 27}} = 124 \text{ [kN]}$$

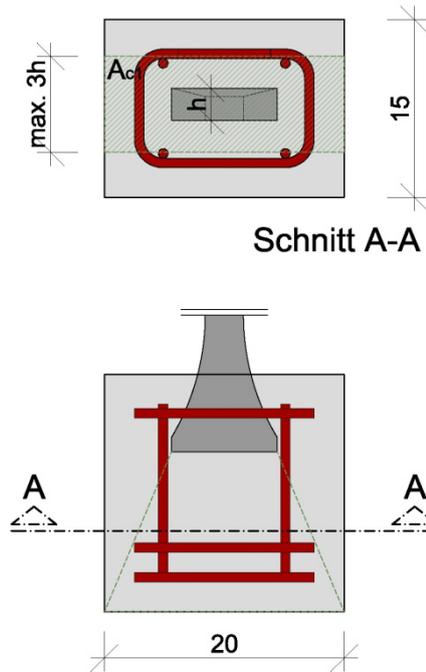


Abb.5-7: Teilflächenpressung Lasteinleitung V3

Als Nachweis, dass das UHPC-Druckelement vor dem Normalbeton versagt, dient unten angeführte Formel.

$$F_{Rd,u} > N_{max} \tag{5-5}$$

5.3.2 MODELLIERUNG IM FE-PROGRAMM ATENA

Um den Versuchsaufbau der Druckelemente im FE-Programm Atena nachzubilden, wird eine Seite des Normalbetons und das UHPC-Element modelliert (siehe Abbildung 5-8). Hierbei wird der Normalbetonwürfel in Belastungsachse gelagert. Das UHPC-Druckelement wird ebenfalls im Bereich, welcher eigentlich in Normalbeton eingebettet ist, gelagert und an der Stirnseite belastet.

Das Materialmodell des Normalbetons entspricht dem Standardmodell des Berechnungsprogramms mit Mittelwerten für C20/25. Für das UHPC-Druckelement wird mittels „3D Nonlinear Cementitious 2 User“ eine eigene Arbeitslinie definiert, welche mit einem f_c von 160 [N/mm²] in die Berechnung einfließt.

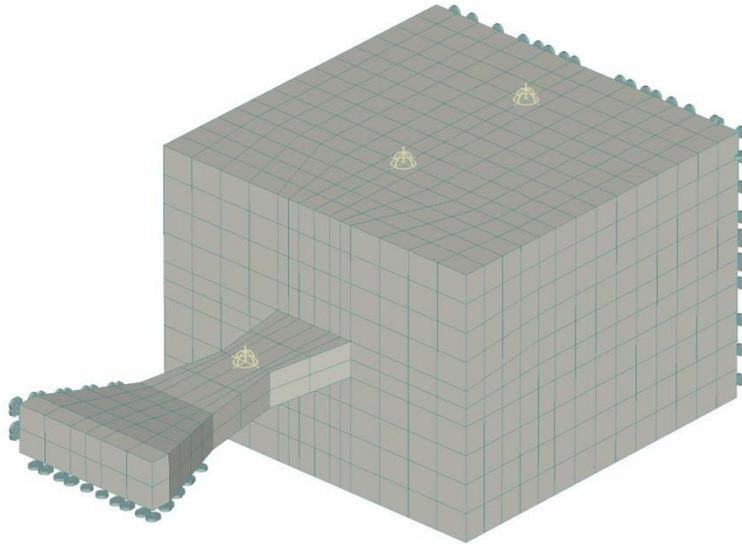


Abb.5-8: Modell im Berechnungsprogramm Atena

Als Ergebnis dieser Berechnung trat ein Druckbruchversagen an der Stelle des Minimalquerschnittes des UHPC-Druckelementes auf. Die Maximallast ergab 81,9 [kN].

Abbildung 5-9 zeigt einen Querschnitt der Mittelachse des modellierten Bereiches mit den auftretenden Hauptspannungsrichtungen.

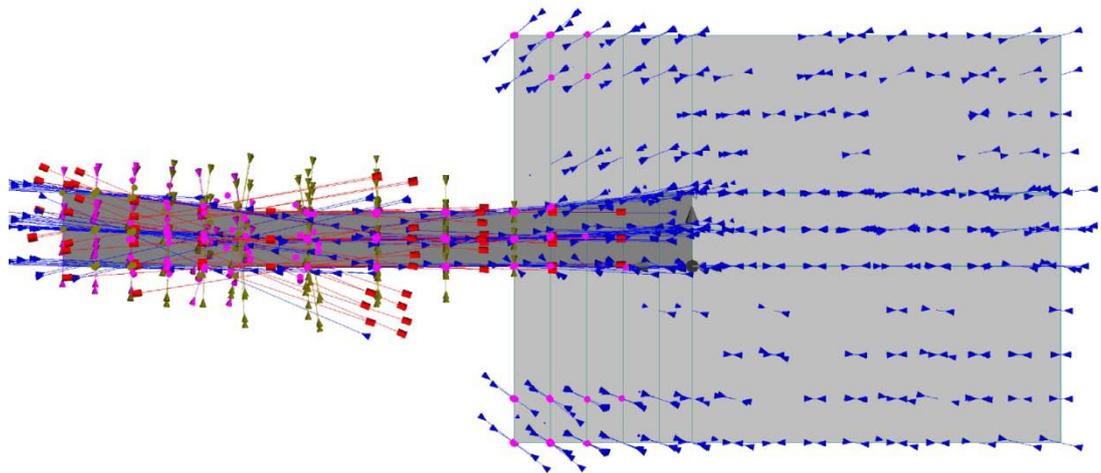


Abb.5-9: Querschnitt Hauptspannungsrichtungen Atena

5.4 VERSUCHSERGEBNISSE

5.4.1 PRÜFERGEBNISSE DER EINZELNEN BETONAGEN

5.4.1.1 WÜRFELDRUCKFESTIGKEIT NORMALBETON

Bei der Herstellung der Versuchskörper am 15.02.2011 wurden zusätzlich vier Beton-Prüfwürfel angefertigt. Der Druckversuch dieser Würfel erfolgte am 10.03.2011, was einem Probenalter von 23 Tagen entspricht. Der erwartete Mittelwert der Druckspannungen von 33 [N/mm²] wurde übertroffen und beträgt 36,7 [N/mm²]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-5 festgehalten.

| Bezeichnung | Masse pro Würfel | A _{mittel} | Bruchlast | Bruchfestigkeit |
|-------------|------------------|---------------------|-----------|----------------------|
| | [kg] | [cm ²] | [kN] | [N/mm ²] |
| C6_1 | 7,467 | 218,9 | 791,1 | 36,14 |
| C6_2 | 7,427 | 216,6 | 825,7 | 38,12 |
| C6_3 | 7,609 | 221,9 | 795,5 | 35,85 |
| C6_4 | 7,576 | 220,7 | 811,7 | 36,78 |

Tab.5-5: Betondruckversuch Normalbetonwürfel C6

5.4.1.2 DRUCKFESTIGKEIT UHPC

Die Herstellung der UHPC-Versuchskörper erfolgte am 07. und 08.02.2011. Somit beträgt das Prüfalter der Proben 32 bzw. 31 Tage. Im Zuge der Herstellung wurden hier Prüfkörper mit den Abmessungen 4/4/16 [cm] hergestellt. Vor Prüfung der Druckfestigkeit erfolgten an den aufgelisteten Proben noch Biegezugversuche.

| Bezeichnung | A | Bruchlast | Bruchfestigkeit |
|---------------------------|--------------------|-----------|----------------------|
| | [mm ²] | [kN] | [N/mm ²] |
| C4_1a | 1574 | 231,9 | 147,33 |
| C4_1b | 1540 | 219,7 | 142,66 |
| C4_2a | 1600 | 218,0 | 136,20 |
| C4_2b | 1600 | 212,0 | 132,50 |
| Mittelwert Prüfkörper C4: | | | 139,67 |
| C5_1a | 1600 | 235,2 | 147,00 |
| C5_1b | 1600 | 237,2 | 148,20 |
| C5_2a | 1600 | 231,2 | 144,50 |
| C5_2b | 1600 | 239,5 | 149,70 |
| Mittelwert Prüfkörper C5: | | | 147,35 |

Tab.5-6: Betondruckversuch UHPC C4 und C5

Die erwünschte Zielfestigkeit von 160 [N/mm²] konnte lt. Auswertung der Druckversuche nicht erreicht werden. Dies kann mehrere Gründe haben – z.B. wurden die Proben keiner Wasserlagerung unterzogen.

5.4.2 PRÜFERGEBNISSE VERSUCH

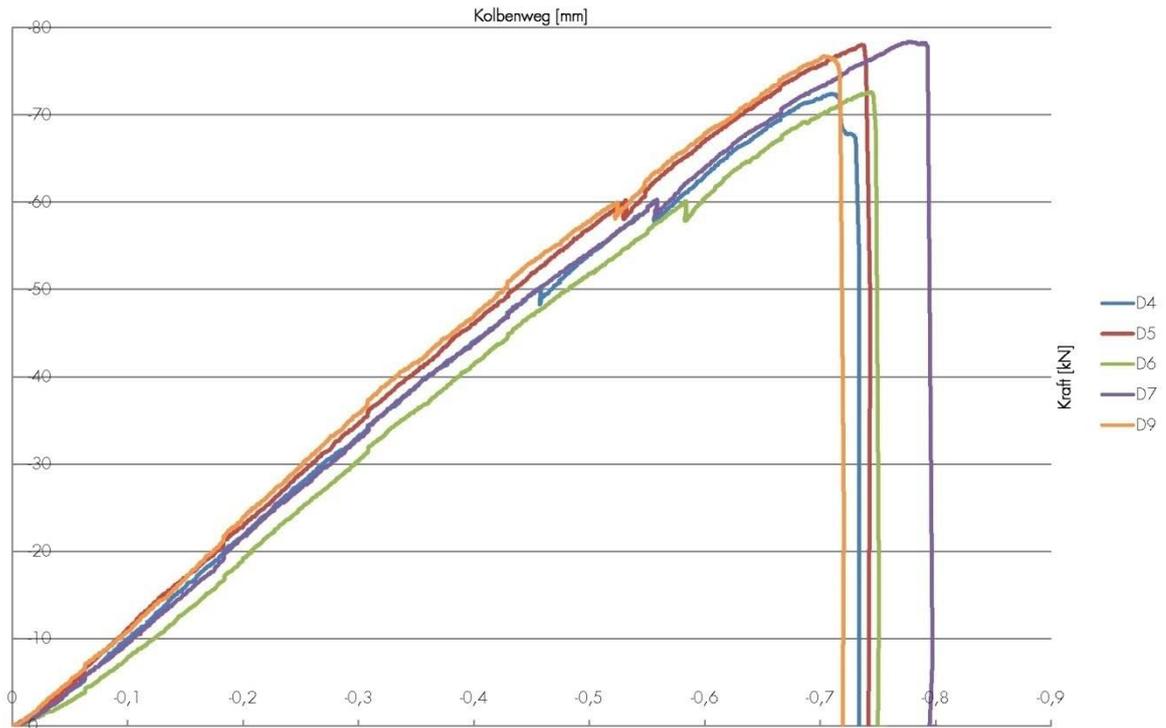


Abb.5-10: Kraft-Weg-Diagramm der Versuchskörper D4-D9

| Bezeichnung | Bruchlast | Kolbenweg | Bruchfestigkeit |
|------------------------|-----------|-----------|----------------------|
| | [kN] | [mm] | [N/mm ²] |
| D4 (Betonage C4) | 72,42 | 0,71 | 113,16 |
| D5 (Betonage C4) | 78,02 | 0,74 | 121,91 |
| D6 (Betonage C4) | 72,60 | 0,74 | 113,44 |
| D7 (Betonage C5) | 78,35 | 0,78 | 122,42 |
| D9 (Betonage C5) | 76,70 | 0,70 | 119,84 |
| Mittelwert Prüfkörper: | 75,62 | 0,73 | 118,15 |

Tab.5-7: Ergebnisse Druckversuch V3

Um von den Versuchsergebnissen auf Bemessungsgrößen schließen zu können, ist eine statistische Auswertung der Messungen nötig. Die Grundlagen für die Berechnungen wurden aus [5] und [6] entnommen.

Mittelwert:

$$m_x \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (5-6)$$

$$m_x = 75,62 \text{ [kN]}$$

Streuung/Varianz:

$$\sigma_x^2 \approx \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \quad (5-7)$$

$$\sigma_x^2 \approx 8,43$$

Standardabweichung:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} \quad (5-8)$$

$$\sigma_x = 2,90 \text{ [kN]}$$

5%-Fraktilwert:

$$F_{0,05} = m_x - 1,645 \cdot \sigma_x \quad (5-9)$$

$$F_{0,05} = 70,84 \text{ [kN]}$$

Aus Tabelle 5-7 und der zuvor dokumentierten statistischen Auswertung der Versuche ist zu ersehen, dass die Ergebnisse nur sehr gering streuen. Bringt man den Mittelwert der getesteten UHPC-Prüfkörper von 143,51 N/mm² in die Berechnung ein, so ergibt sich eine maximale erreichbare Kraft im Mittelquerschnitt des Druckelementes von 91,8 [kN]. Vergleicht man nun den Mittelwert aus dem Versuch mit der maximal erreichbaren Kraft, errechnet sich eine Näherung von 82 [%]. Hier tritt aufgrund der nicht perfekt zentrischen Einleitung der Kraft in das Druckelement eine Minderung auf (siehe Tabelle 5-8). Dies kann auf zusätzliche Momentenbeanspruchungen zu den Druckkräften zurückgeführt werden.

In Abbildung 5-11 ist exemplarisch das Versagensbild eines Prüfkörpers dargestellt. Es ist deutlich das Druckversagen zu erkennen, wobei der Großteil der Abplatzungen auf der „schwachen“ Achse des Querschnittes auftreten. Etwas unerwartet konnten bei keinem der Versuchskörper im Normalbeton Risse festgestellt werden. Auch der Bereich der Lasteinleitung (Übergang UHPC-Normalbeton) blieb augenscheinlich rissfrei.



Abb.5-11: Exemplarische Darstellung Versagensbild Druckelement

| Bezeichnung | Bruchlast | Aufnehmer 3 | Aufnehmer 4 | Aufnehmer 5 |
|------------------|-----------|-------------|----------------------|----------------------|
| | [kN] | [mm] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| D4 (Betonage C4) | 72,42 | 0 | -1,78 | -1,72 |
| D5 (Betonage C4) | 78,02 | 0 | -2,02 | -2,31 |
| D6 (Betonage C4) | 72,60 | 0 | -1,65 | -0,35 |
| D7 (Betonage C5) | 78,35 | 0 | -2,35 | -1,74 |
| D9 (Betonage C5) | 76,70 | 0 | -2,51 | -2,07 |

Tab.5-8: Verdrehung der Lasteinleitungsflächen

5.5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

- A) Das Versagen tritt wie erwartet im Mittelquerschnitt des UHPC-Elementes auf und das Tragverhalten kann bis zum Bruch als quasi linear-elastisch bezeichnet werden.
- B) Die Streuung der maximal erreichten Druckkräfte ist erfreulicherweise sehr gering, jedoch erreichen die vorhandenen UHPC-Prüfkörper nicht die erwünschte Festigkeit. Dies wird in folgenden Versuchen durch eine kontrollierte Herstellung bzw. durch die Verbesserung des Rezeptes unterbunden werden.
- C) Es tritt ein gutes Verbundverhalten von UHPC zu Normalbeton auf. Im Weiteren ist eine umschnürende Wirkung der UHPC-Druckelemente durch den Normalbeton gegeben.
- D) Die maximale Verdrehung der Lasteinleitungsflächen beträgt rund 2,5 [mm], kann aber nicht schlüssig, zumindest nicht getrennt von anderen Merkmalen, mit der Bruchlast in Verbindung gebracht werden.

6 BERECHNUNGSBEISPIELE KRAGELEMENT

6.1 MODELLIERUNG IM FE-PROGRAMM ATENA

Die geometrisch aufwendige Form des Schubelementes (siehe hierzu Kapitel 5) verlangte in den Anschlussbereichen (Auflager und Auskragung) besonderes Augenmerk in der Modellierung. Da das Element sich in mehrere Richtungen verjüngt bzw. aufweitet, war eine „Verziehung“ der einzelnen Elemente unumgänglich. Jedes Objekt wurde als eigenständiges „Macroelement“ aufgebaut und mittels Kontaktflächen mit den Nachbar-elementen verbunden.

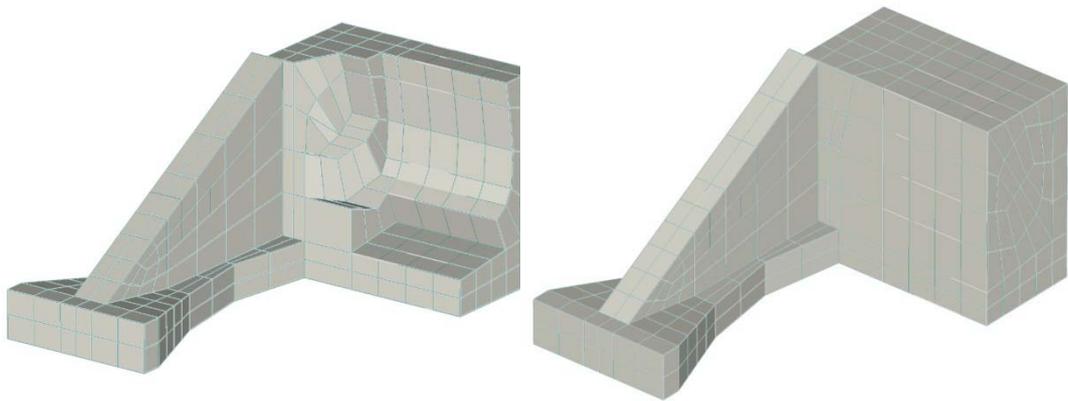


Abb.6-1: Aufbau des Schubelementes

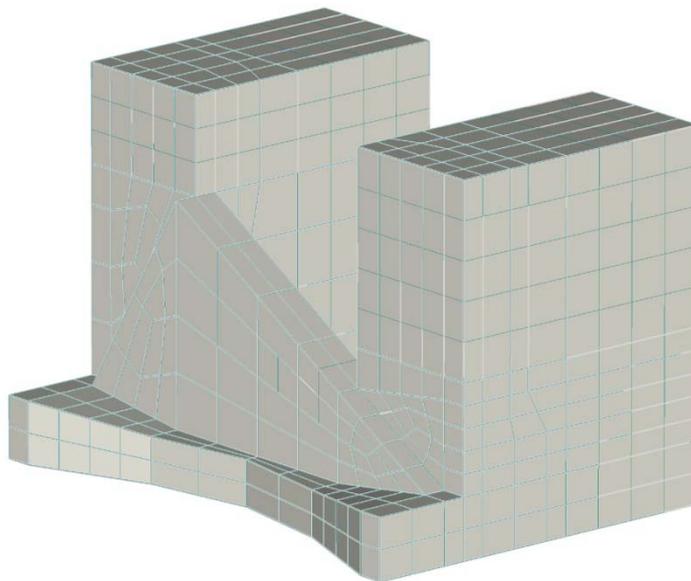


Abb.6-2: Einbettung des Schubelementes in Normalbeton

6.1.1 SYSTEMÜBERSICHT

Die Modellierung des Berechnungsaufbaues erfolgte, wie schon erwähnt, vom Druck-Schubelement ausgehend. Um den Einleitungsbereich/Übergabebereich der Kräfte des HL-Elementes genauer darzustellen, wurde hier das FE-Netz verfeinert aufgebaut. Der restliche Bereich bis zu einem Meter der Auskragungslänge wurde sehr grob abgebildet. Kraglängen von einem Meter aufwärts stellen nur noch Anhänge dar, die der Lastaufnahme dienen und sind für die Berechnung nicht von Bedeutung.

Nach erfolgter Modellierung des UHPC-Einzelteils und des umgebenden Betons erfolgte die Eingabe der FKV-Schleife und der Anschlussbewehrung. Die Beaufschlagung der Last wurde an verschiedene Situationen angepasst und kann der Dokumentation der Ergebnisse entnommen werden. In der Abbildung 6-3 stellt der rechte Teil des Aufbaues das Auflager und der linke Bereich den Kragplattenstreifen dar. Die Modellierung erfolgte repräsentativ für einen 25 [cm] Deckenstreifen, einer FKV-Schleife und einem Schubelement. An den Rändern des Elementstreifens wurden Symmetrielagerbedingungen angebracht.

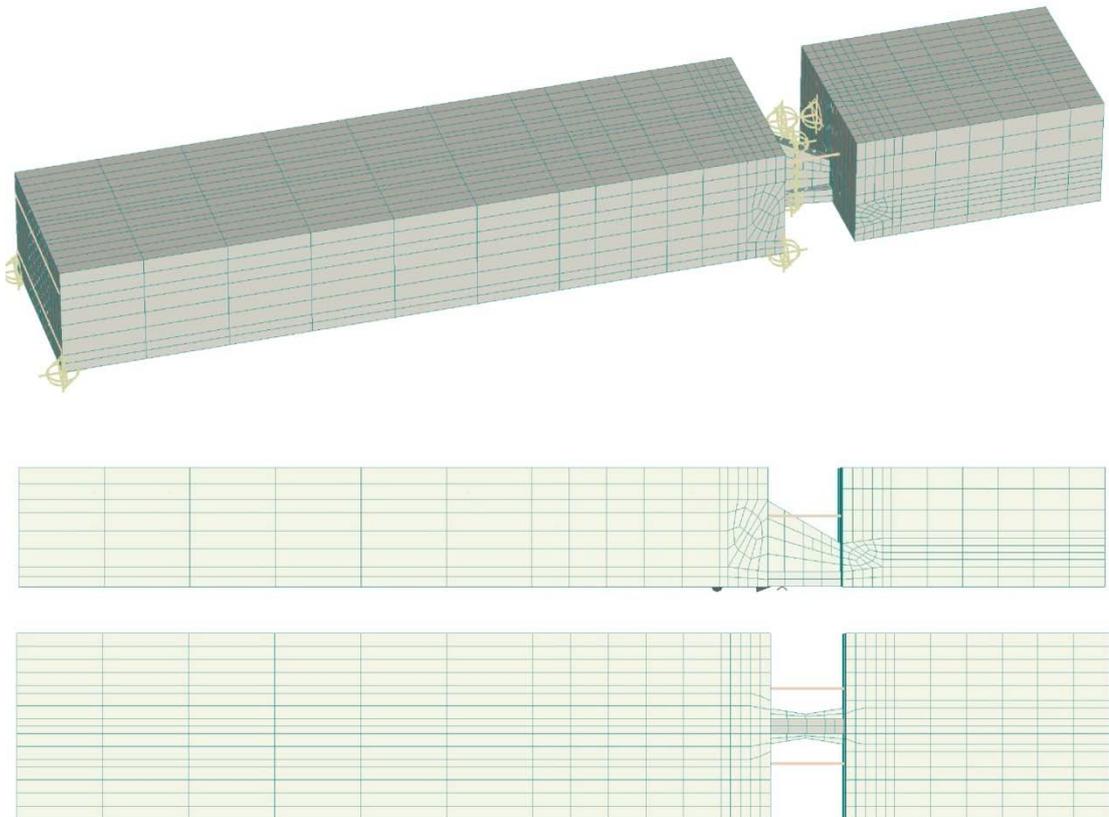


Abb.6-3: Systemübersicht (Eingabedatei)

6.1.2 BERECHNUNGSERGEBNISSE PLATTENSTREIFEN

6.1.2.1 BEISPIEL 1: DS_16_100_CFK-80/126000

Als Berechnungsbeispiel 1 soll ein Deckenstreifen mit der Kraglänge von 1,0 [m], in den eine CFK-Schlaufe im Zugbereich und ein Schubelement im Druckbereich eingebaut sind, dienen. Weitere Angaben zu den Eingangswerten der Berechnung sind der unten angeführten Tabelle zu entnehmen. Als anfänglicher Ausgangswert für das Faser-Kunststoff-Verbund-Material wird das in [1] vorausgesetzte CFK verwendet.

| | | | |
|----------------------|----------|--------|----------------------|
| System: | h | 16 | [cm] |
| | l_k | 100 | [cm] |
| FKV-Eigenschaften: | A | 80 | [mm ²] |
| | E_{cm} | 126000 | [N/mm ²] |
| | f_y | 1560 | [N/mm ²] |
| UHPC-Eigenschaften: | E_{cm} | 50000 | [N/mm ²] |
| | f_c | 170 | [N/mm ²] |
| Normalbeton: | f_c | C25/30 | [N/mm ²] |
| Belastung (step 10): | p_{sd} | 13,43 | [kN/m ²] |

Tab.6-1: Eingangswerte Berechnungsbeispiel 1

Als Materialmodell für die Berechnung des Zugelementes sowie der UHPC-Einbauteile diene vorab ein linear-elastischer Zusammenhang von Dehnung und Spannung. Als Definition des Umgebungsbetons wurden Mittelwerte in Atena gewählt. Die Last wurde in zehn Lastschritten aufgebracht.

Von Interesse für die Ergebnisdarstellung sind die Spannung in der CFK-Schlaufe, die Spannungen und Dehnungen im Schubelement, die Pressung an der Krafteinleitungsstelle der Druck-/Schubelemente und die Verformung am Kragarmende. Um diese Kenngrößen zu erhalten, werden im 3D-Modell des Deckenstreifens Monitore angeordnet, die die gewünschten Größen aufzeichnen.

Bei Sichtung der Ergebnisse in Tabelle 6-2 bzw. der grafischen Darstellung im FE-Programm zeigt sich rasch der geringe Ausnutzungsgrad des eingegebenen HL-Elementes. Dies ist auf die geringe Auskragungslänge zurückzuführen. Weiters tritt nicht einmal im

Zustand des ULS eine Rissbildung auf, was zur Folge hat, dass der Beton im Zustand I verbleibt. Das ermittelte Rissmoment beträgt 2,85 [kNm]. Im Vergleich dazu kann das SLS-Moment mit 0,92 [kNm] beziffert werden.

| Lastschritte | zug. p_{sd} [kN/m ²] | zug. m_{sd} [kNm] | σ_{CFK2-x} [kN/m ²] | $w_{Kragarmende}$ [mm] |
|--------------|---------------------------------------|------------------------|---|---------------------------|
| 1 | 1,34 | 0,18 | 23,52 | -0,37 |
| 2 | 2,69 | 0,37 | 50,50 | -0,80 |
| 3 | 4,03 | 0,55 | 77,72 | -1,27 |
| 4 | 5,37 | 0,73 | 104,90 | -1,77 |
| 5 | 6,71 | 0,92 | 131,90 | -2,28 |
| 6 | 8,06 | 1,10 | 158,90 | -2,80 |
| 7 | 9,40 | 1,28 | 185,90 | -3,32 |
| 8 | 10,74 | 1,47 | 212,90 | -3,86 |
| 9 | 12,08 | 1,65 | 239,90 | -4,40 |
| 10 | 13,43 | 1,84 | 266,90 | -4,95 |

Tab.6-2: Berechnungsergebnisse Beispiel 1

Weitere Ergebnisse aus der Berechnung sind tabellarisch sehr unübersichtlich, daher werden diese nachfolgend als Diagramme ausgegeben.

A) Schubelement:

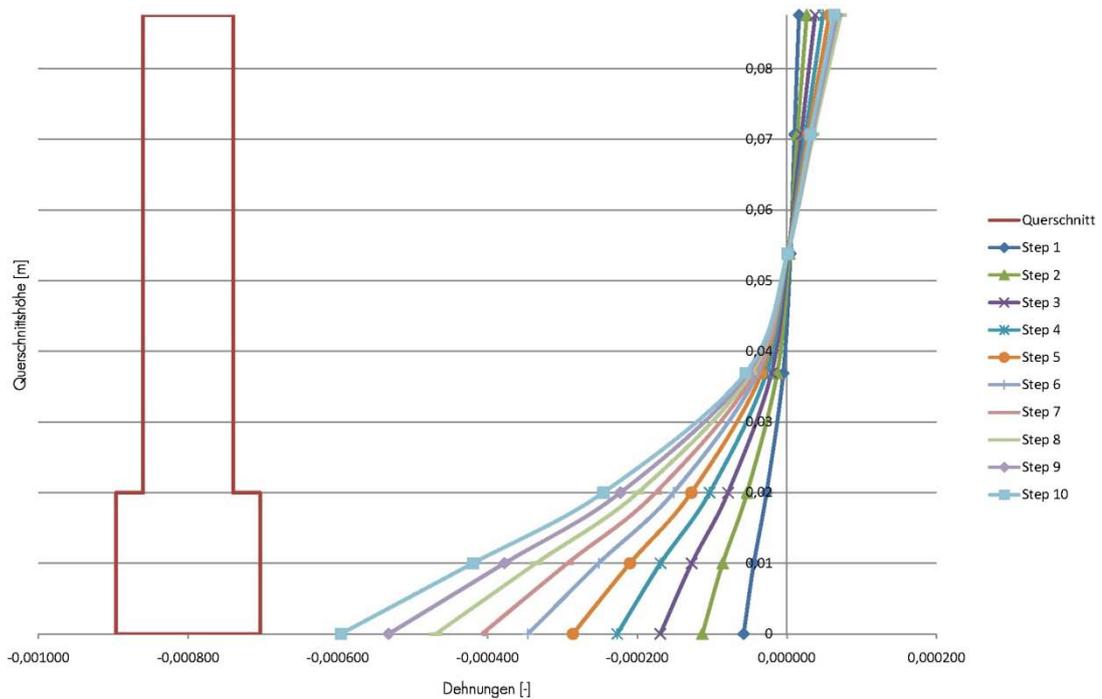


Abb.6-4: Bsp1: Dehnungen im Mittelquerschnitt des Schubelementes

Der Verlauf der Dehnungen spiegelt das charakteristische Abbild der Tragwirkung eines wandartigen Trägers wider. Hierbei stellt jeder dargestellte Verlauf einen Laststep dar.

Durch die Ausgabe der einzelnen Dehnungen am Mittelquerschnitt (siehe Abbildung 6-4) und der Annahme des linear-elastischen Materialverhaltens konnte leicht auf die Spannungen in Abbildung 6-5 geschlossen werden.

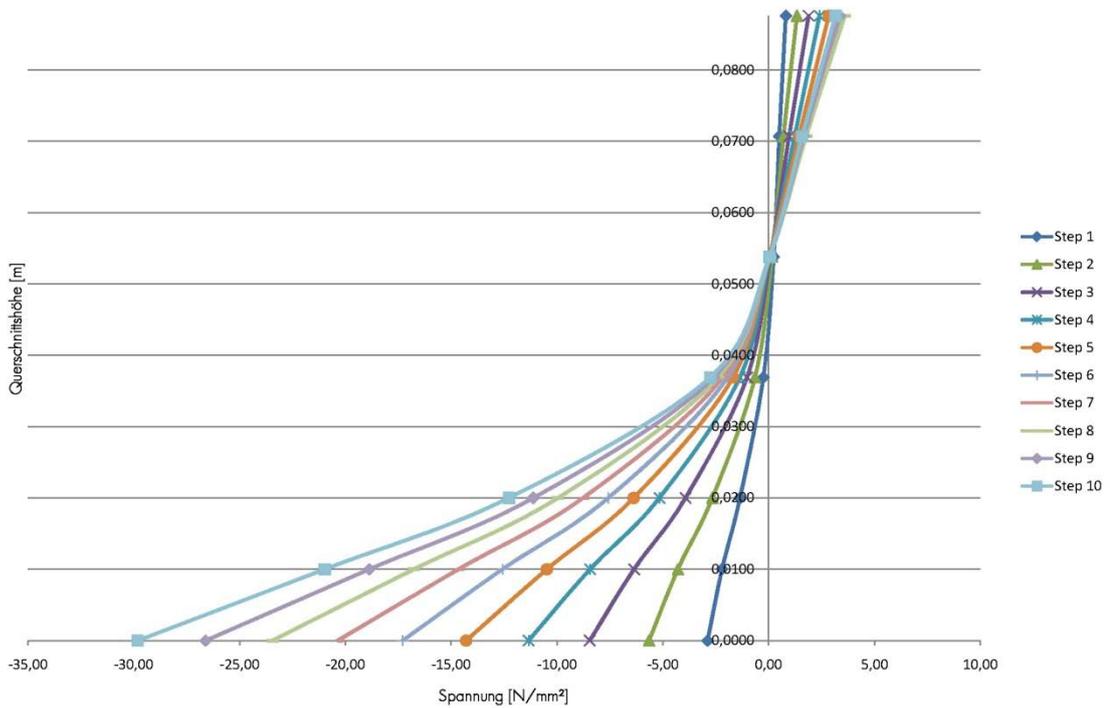


Abb.6-5: Bsp1: Spannungen im Mittelquerschnitt des Schubelementes

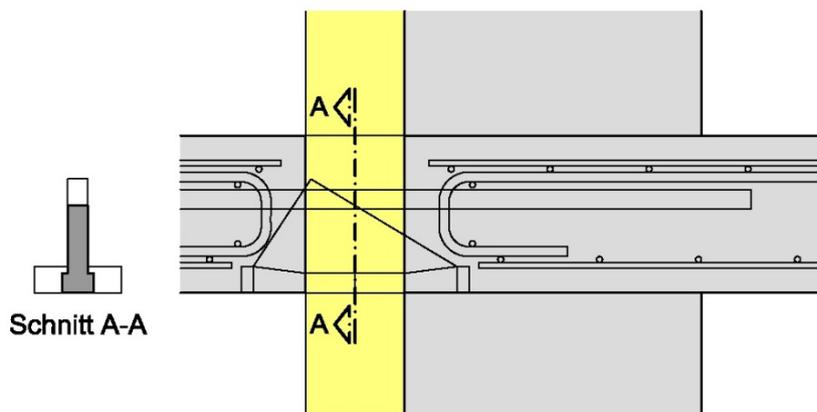


Abb.6-6: Schnittführung zu Diagramm 6-4 und 6-5

Es ist deutlich eine Mehrbelastung des Druckrandbereiches des Querschnittes erkennbar. Jedoch tritt kein signifikanter Sprung an der Schnittstelle Druckelement/Schubscheibe auf, was auf die geringen Breitenunterschiede zurückzuführen ist (siehe Schnitt A-A – Abbildung 6-6). Die ermittelten Spannungen liegen weit unter den aufnehmbaren.

B) Spannungen im Einleitungsbereich des Druckelementes:

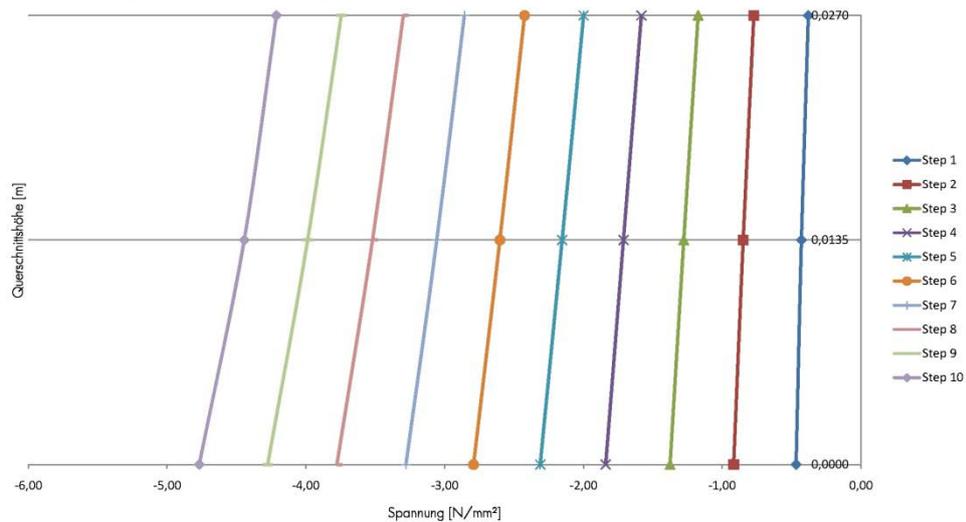


Abb.6-7: Bsp1: Spannungen im Einleitungsbereich des Druckelementes

Abbildung 6-7 gibt die ausgewerteten Ergebnisse aller Laststeps für die Auflagerpressung des UHPC-Elementes über die Querschnittshöhe von 27 [mm] wider. Hierbei ist ebenfalls zu erkennen, dass in den äußeren Bereichen höhere Spannungen auftreten. Die für diesen Fall maximalen Normalbetonspannungen von rund 16,7 [N/mm²] werden nicht erreicht bzw. überschritten.

Dieses Berechnungsbeispiel mit den in Tabelle 6-1 angeführten Eingangswerten wurde zusätzlich für Deckenstärken von 17 – 23 [cm] durchgeführt. Die Ergebnisse ähneln den zuvor beschriebenen, wobei durch die Erhöhung des inneren Hebelsarms unterschiedliche Spannungen auftreten. Als Erkenntnis daraus wurde für folgendes Beispiel eine Kragplatte mit 2 [m] modelliert, um eine hohe Ausnutzung bzw. Überbeanspruchung des HL-Elementes hervorzurufen.

6.1.2.2 BEISPIEL 2: DS_16_200_CFK-80/126000

In Beispiel 2 ist die Ausnutzung der Einzelbauteile (Schlaufe, Druck-/Schubelement, Übergangsflächen) signifikant höher als in zuvor beschriebenem Beispiel. Die

Eingangsparameter sind, mit Ausnahme der Kraglänge von 2,0 [m], dieselben wie in Beispiel 1.

A) Schubelement:

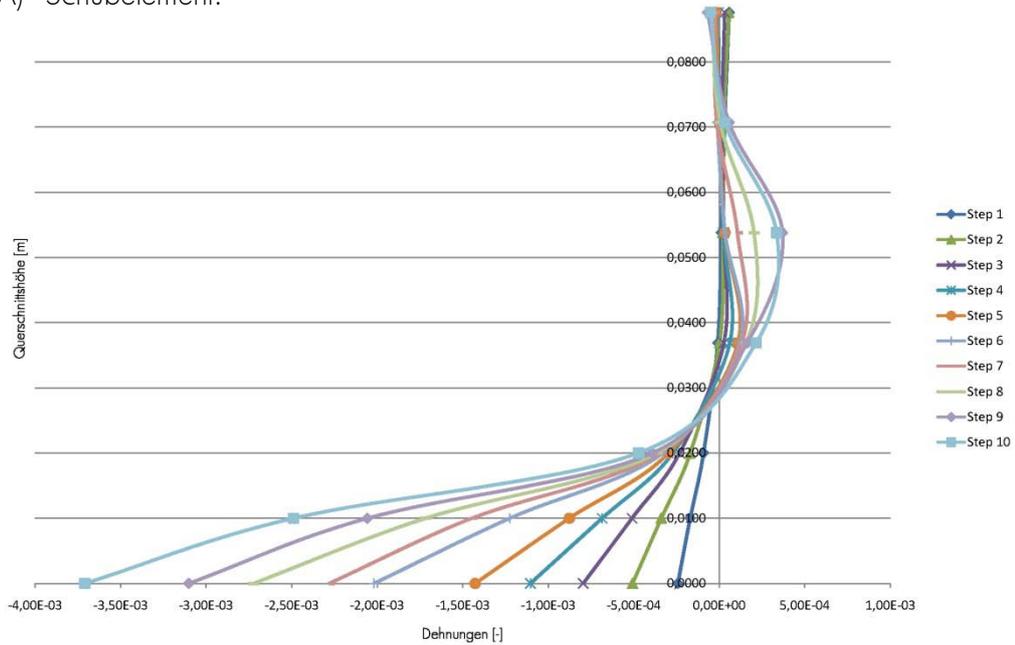


Abb.6-8: Bsp2: Dehnungen im Mittelquerschnitt des Schubelementes

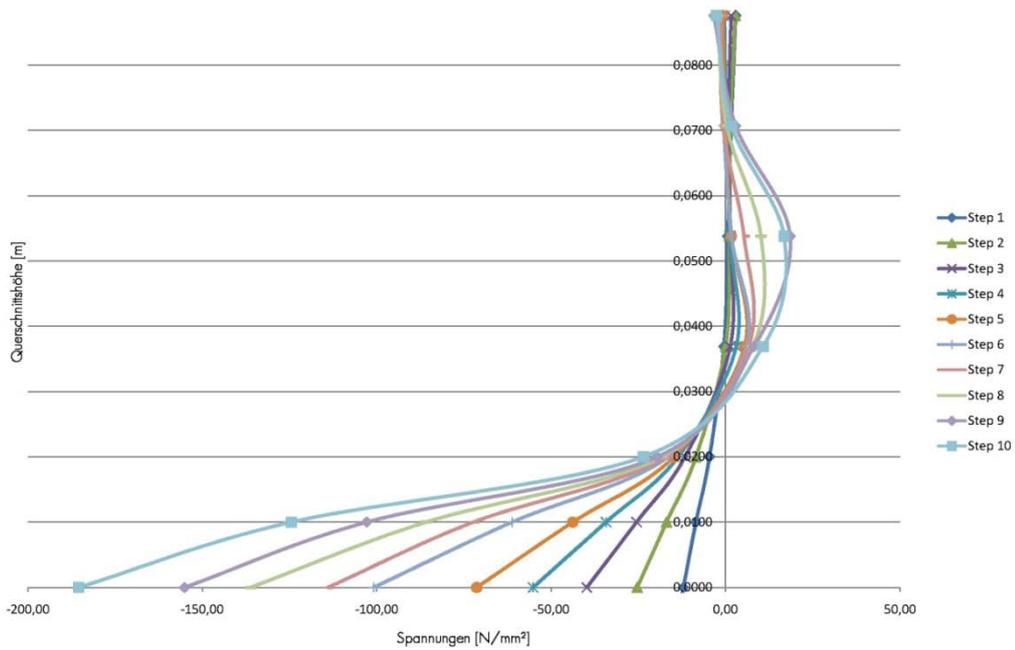


Abb.6-9: Bsp2: Spannungen im Mittelquerschnitt des Schubelementes

Die im Druck-/Schubelement auftretenden Spannungen sind im Vergleich zum ersten Beispiel weit höher und überschreiten im Druckbereich sogar die Maximalwerte. Zudem ist eine ausgeprägte Nichtlinearität des Dehnungsverlaufes festzustellen.

B) Spannungen im Einleitungsbereich des Druckelementes:

Die Auswertung der Druckkräfte des UHPC-Elementes auf den Normalbeton, bzw. vice versa, ist in unten gezeigter Abbildung dargestellt. Eine Überbeanspruchung ist auch hier gegeben.

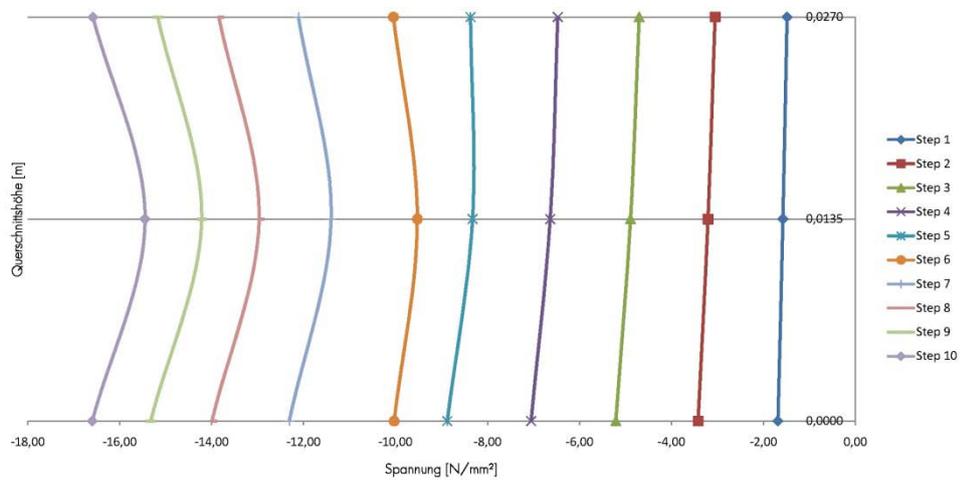


Abb.6-10: Bsp2: Spannungen im Einleitungsbereich des Druckelementes

C) Zusammenfassung Ergebnisse:

| Lastschritte | zug. p_{sd} [kN/m ²] | zug. m_{sd} [kNm] | $\sigma_{CFK2,x}$ [kN/m ²] | $W_{Kragarmende}$ [mm] |
|--------------|---------------------------------------|------------------------|---|---------------------------|
| 1 | 1,34 | 0,70 | 97,45 | -1,66 |
| 2 | 2,69 | 1,40 | 198,60 | -3,63 |
| 3 | 4,03 | 2,10 | 299,00 | -5,73 |
| 4 | 5,37 | 2,80 | 399,20 | -7,96 |
| 5 | 6,71 | 3,50 | 499,30 | -10,33 |
| 6 | 8,06 | 4,20 | 603,00 | -13,40 |
| 7 | 9,40 | 4,90 | 704,00 | -17,48 |
| 8 | 10,74 | 5,60 | 804,60 | -22,15 |
| 9 | 12,08 | 6,30 | 906,80 | -27,71 |
| 10 | 13,43 | 7,00 | 1012,00 | -32,72 |

Tab.6-3: Berechnungsergebnisse Beispiel 2

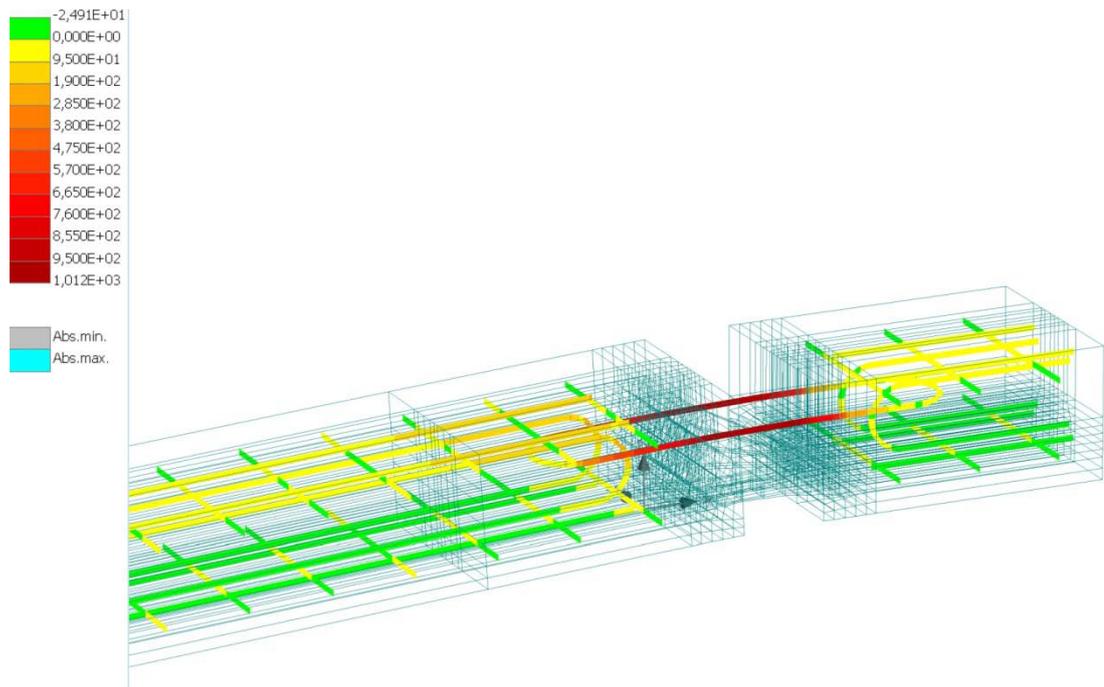


Abb.6-11: Bsp2: Verformte Figur – Darstellung Schlaufe und Anschlussbewehrung

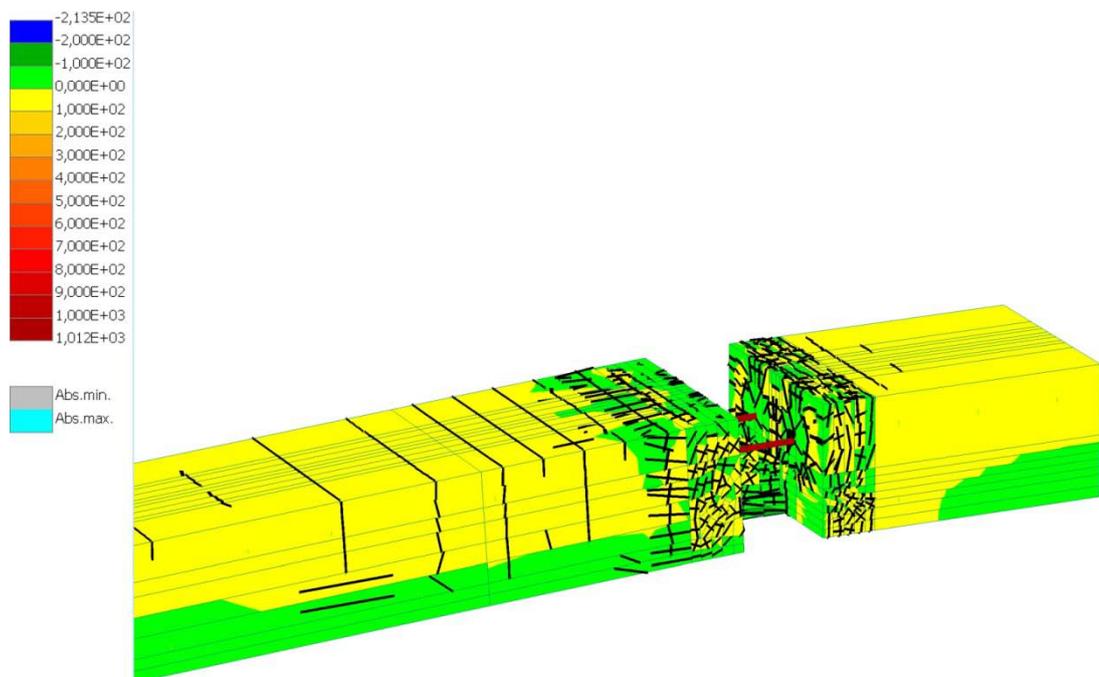


Abb.6-12: Bsp2: Verformte Figur – Darstellung Risse im Beton

6.2 BERECHNUNGSPROGRAMM IN MS EXCEL²

Um die große Anzahl von Einflussfaktoren, welche auf den konzipierten AVI-HL-Korb einwirken, in Interaktion zu stellen, wurde im Zuge der Masterarbeit ein MS Excel-Berechnungsprogramm erstellt. Dieses Programm soll in weiterer Folge jedoch nicht als Bemessungsprogramm herangezogen werden, sondern die Vielzahl möglicher Varianten und Abstufungen aufzeigen. Hierbei werden eingegebene Belastungen und Materialien in Beziehung zur Tragfähigkeit und Wärmedämmverhalten verschiedener Konfigurationen und Auskragungslängen gestellt.

Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die Berechnung:

- | | |
|---------------------|---|
| A) Belastung: | Schnittgrößen |
| B) Deckenstärke: | Eigengewicht; statische Nutzhöhe bzw. innerer Hebelsarm; Druckstrebenneigung; Wärmedämmeigenschaften |
| C) Normalbetongüte: | Druckzonenhöhe bzw. erforderliche Bewehrung; maximal aufnehmbare Druckkräfte im Übergabebereich der UHPC-Druck- bzw. Schubelemente und der FKV-Schlaufe; min. Verbundlänge der Anschlussbewehrung |
| D) FKV-Material: | Wärmeleitfähigkeit; Tragfähigkeit; Verformungsverhalten; innerer Hebelsarm |
| E) UHPC-Güte: | Tragfähigkeit |
| F) UHPC-Elemente: | Tragfähigkeit; Wärmedämmeigenschaften |

Allgemeine Hinweise zum Berechnungsprogramm:

- A) Grün hinterlegte Felder kennzeichnen Eingabefelder
- B) Grau gefärbte Felder stehen für vordefinierte Felder bzw. Berechnungsfelder
- C) Rote Felder kennzeichnen Überschreitungen von Grenzwerten und scheiden diese Auskragungslänge für die gewählte Belastung bzw. Ausgangskonfiguration aus
- D) Spalte A stellt in jedem Berechnungsblatt die Auskragungslänge dar

² Ausdrucke der im Kapitel beschriebenen Berechnungsdatei liegen im Anhang bei.

In den folgenden Abschnitten soll auf die Eingangswerte bzw. die Ausgabewerte des Programmes näher eingegangen werden, um die Berechnungsschritte besser darzustellen.

6.2.1 ERLÄUTERUNG EINGANGSWERTE

Den ersten Teil der Eingangswerte bilden die Belastungsannahmen. Hier stehen zusätzlich zum Eigengewicht der Kragplatte, welches vom Programm direkt berücksichtigt wird, noch die Eingabe einer zusätzlichen, ständigen Auflast zur Verfügung. Als Eingabe veränderlicher Einwirkungen stehen EC-konform eine Leiteinwirkung und eine Begleiteinwirkung zur Auswahl. Zusätzlich kann eine Randlast (zB. eine Brüstungskonstruktion) definiert werden.

Falls erwünscht, können mit dem Eingabeparameter „Lastfaktor“ definierte Werte abgemindert bzw. erhöht werden. Dieser Faktor wirkt sich in der Berechnung jedoch nur auf ULS-Lastfälle aus.

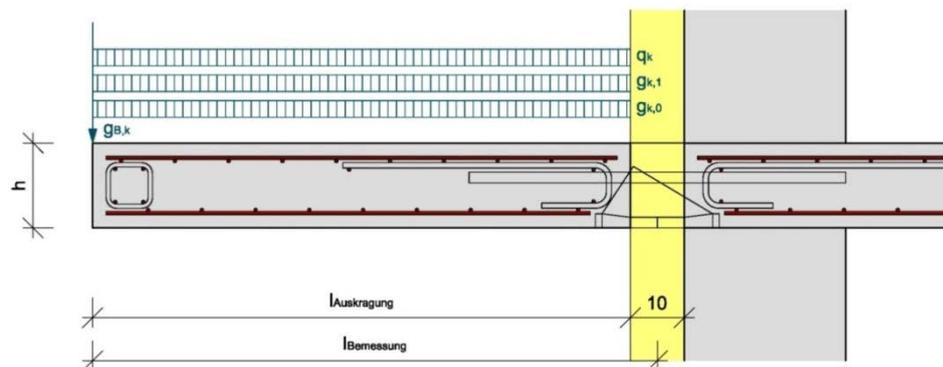


Abb.6-13: Ausgangssituation für Eingabe in das Berechnungsprogramm

Der nächste Eingabeblock beinhaltet die Deckenstärke h der auskragenden Platte bzw. die Referenzbreite, die betrachtet werden soll. Anschließend kann die Betongüte des Normalbetons gewählt werden.

Darauf folgend sind die Eigenschaften des Schlaufenmaterials bzw. der UHPC Druck- und Schubelemente einzugeben. Für die Auswahl des Faserverbund-Werkstoffes stehen 9 vorgefertigte Kombinationen zur Verfügung, welche jedoch gegebenenfalls im Blatt „Kenndaten“ abgeändert werden können. Des Weiteren sind die Breite, die Höhe und die Anzahl der eingesetzten Schlaufen wählbar. Der Innenradius der Schlaufen ist mit 5 [cm] vordefiniert. Danach sind die charakteristische Druckfestigkeit und der E-Modul des eingesetzten UHPC auszufüllen. Schlussendlich ist die Anzahl der eingesetzten Schubelemente sowie der Druckelemente zu wählen.

Sind die zuvor aufgezählten Eingaben getätigt, berechnet das Programm eigenständig die Auslastungen bzw. Wärmedämmeigenschaften der gewählten Konfiguration. Die Nachweisführung erfolgt in Zeilenform. Pro Zeile wird je eine mögliche Auskragungslänge betrachtet. Rot hinterlegte Zeilen bzw. Spalten stellen Belastungen dar, welche die gewählte Konfiguration nicht aufnehmen kann. Die Nachweise erstrecken sich auf mehrere Berechnungsblätter, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

6.2.2 ERLÄUTERUNG DER EINZELNEN BERECHNUNGSSCHRITTE

Die genaue Dokumentation der einzelnen Berechnungsschritte dient dazu, die Zusammenhänge der Eingangswerte besser aufzuzeigen sowie die theoretischen Hintergründe der Berechnung darzulegen.

Um das Kräftegleichgewicht im Übergangsbereich des HL-Korbes zu errechnen, ist es notwendig, ein geeignetes Modell aufzustellen. Hierzu kommen Stabwerkmodelle (in [4] unter Kapitel 6.5 Stabwerksmodelle erläutert) zum Einsatz. Durch die Anwendung dieser Modelle können im Betonbau so genannte Diskontinuitätsbereiche (D-Bereiche) näher beschrieben werden. [5]

Dieses Prinzip wurde bereits in [1] angewendet, wird hier jedoch nochmals modifiziert, um weitere Eingangsparameter abzudecken.

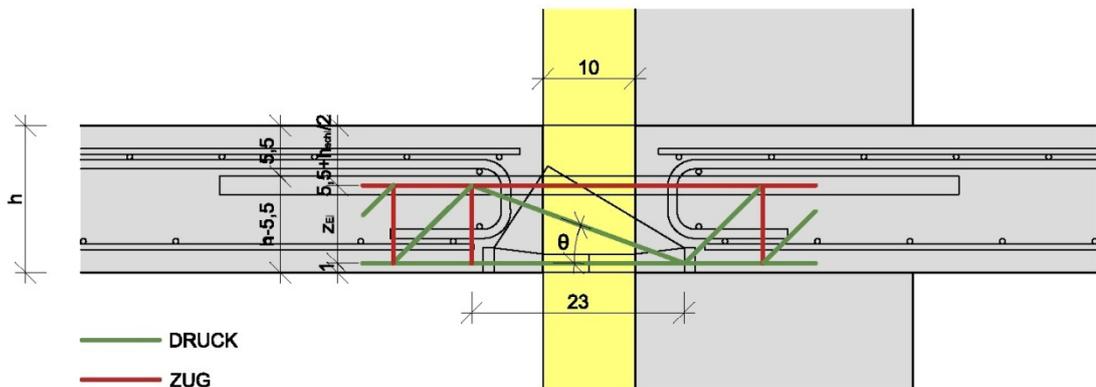


Abb.6-14: Übersicht Fachwerkmodell Übergangsbereich

Wie in Abbildung 6-14 dargestellt, wird das Fachwerkmodell des Übergangsbereiches in ein Zugglied (Achse FKV-Schlaufe), eine Druckstrebe im Mittelquerschnitt des UHPC Druckelementes und eine Druckdiagonale, welche die Neigung θ aufweist, unterteilt. Die Druckdiagonalenneigung θ ist im Unterschied zu [1] jedoch nicht konstant alle

Deckenstärken mit 31 [°] definiert, sondern variiert mit dem inneren Hebelsarm z_{Ei} . Konstant wird in diesem Modell die Breite des Übergangsbereiches gehalten, welche der Länge der Druck- bzw. Schubelemente mit 23 [cm] entspricht. Die mathematischen Darstellungen hierzu sind in Formel (6-1) und (6-2) zu finden.

$$z_{\text{Element}} = h - 0,055 - 0,01 \cdot \frac{h_{\text{schl}}}{2} \quad (6-1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{z_{\text{Element}}}{0,23} \right) \quad (6-2)$$

Die maximale Kombination der Bemessungslast (ULS) wird nach [7] ermittelt und als p_{sd} für die Gleichlasten bzw. $g_{B,sd}$ für Linienbelastung im Programm ausgegeben. Derselbe Berechnungsschritt erfolgt auf SLS-Niveau, um die quasi-ständigen Belastungen zu erhalten.

6.2.2.1 BER1 - SCHNITTGRÖßENERMITTLUNG KRAGPLATTE

Spalte B: Ermittlung der vorhandenen Biegeschlankheit

$$\frac{l}{d_{\text{vorh}}} = \frac{l_{\text{Auskragung}}}{h - 0,03} \quad (6-3)$$

Spalte D: Ermittlung des zugehörigen Bemessungsmoment zur Auskragungslänge

$$m_{sd} = p_{sd} \cdot b \cdot \frac{l_{\text{Bemessung}}^2}{2} + g_{B,sd} \cdot b \cdot l_{\text{Bemessung}} \quad (6-4)$$

Spalte E: Ermittlung der zugehörigen Bemessungsquerkraft zur Auskragungslänge

$$V_{sd} = (p_{sd} \cdot l_{\text{Bemessung}} + g_{B,sd}) \cdot b \quad (6-5)$$

Spalte F: Gibt die erforderliche Querschnittsbewehrung in der Zugzone der Kragplatte bzw. die erforderliche Mindestbewehrung aus

$$a_s = \max \left\{ \begin{array}{l} a_{s,\text{erf}} \\ a_{s,\text{min}} \end{array} \right. \quad (6-6)$$

Spalte G: Auswertung der maximalen Biegeschlankheit (Verhältnis von Stützweite zu Nutzhöhe).

Es darf laut EC davon ausgegangen werden, dass bei Einhaltung der maximalen Schlankheiten, die zulässigen Durchbiegungsgrenzen eingehalten werden. [4]

Wird die aus Starrkörperverdrehung – diese Verformung entsteht aufgrund der Dehnung der FKV-Schlaufe und der Stauchung der UHPC-Elemente – hervorgerufene Durchbiegung am Kragarmende kleiner als die zulässige Überhöhung gehalten, ist somit der Verformungsnachweis gemäß EC2 erfüllt. Dies wird im Absatz 6.2.2.4 genauer betrachtet.

Kraglängen, deren vorhandene Schlankheit größer als die maximale ist, werden als nicht mögliche Varianten ausgesondert und rot hinterlegt.

EN1992-1-1:2004 - Formel 7.16a bzw. 7.16b

Spalte H: wie Spalte D, jedoch auf SLS-Niveau

Spalte I: wie Spalte E, jedoch auf SLS-Niveau

6.2.2.2 BER2 - REAKTIVE SCHNITTGRÖßEN ZUGZONE UND NW SCHLAUFE

Spalte B: Ermittlung der maximalen Kraft in der Zugzone des Übergangsbereiches (lt. Fachwerkmodell)

$$T_{d,ges} = \frac{m_{sd}}{z} + \frac{v_{sd}}{2 \cdot \tan \theta} \quad (6-7)$$

Spalte C: Gibt den Wert der Zugkraft aus Spalte B pro Schlaufe wieder

$$T_d = \frac{T_{d,ges}}{n_{schl}} \quad (6-8)$$

Spalte D: Berechnet die Spannung im Querschnitt einer FKV-Schlaufe

$$\sigma_{FKV} = \frac{T_d}{2 \cdot b_{schl} \cdot h_{schl}} \quad (6-9)$$

Spalte E: Stellt den Ausnutzungsgrad des FKV-Materials dar und berücksichtigt keine Spannungsüberhöhungen im Übergangsradius der Schlaufe. Überschreitet der Wert die 100 [%]-Marke, wird diese Kraglänge automatisch ausgeschieden und rot hinterlegt.

$$\eta_{FKV} = \frac{\sigma_{FKV}}{f_{yd,FKV}} \quad (6-10)$$

- Spalte F: Ermittelt ebenfalls den Ausnutzungsgrad, jedoch mit reduziertem f_{yd}
- Spalte G: Berechnet die notwendige Stahl-Anschlussbewehrung pro Übertragungsschleife. Hierbei werden die erforderliche Fläche und mittels einer Abfrage die richtigen Durchmesser bestimmt.
- Spalte H: Ermittelt die vorhandene Dehnsteifigkeit EA der minimal notwendigen Stahlbewehrung aus BER1/Spalte F
- Spalte I: Stellt das Verhältnis der Dehnsteifigkeit der FKV-Schlaufen zu der zuvor ermittelten Steifigkeit aus Spalte H dar. Dieser Wert soll nach Auswertung genügender Anzahl möglicher Varianten eine schnelle Auskunft über das Verformungsverhalten des neuen Hochleistungsthermokorbes geben. Wie, in weiterer Folge, noch näher behandelt wird, soll dieses Maß beschränkt werden, um übermäßige Verformungen auszuschließen.

$$\eta = \frac{EA_{FKV}}{EA_{Stahl}} \quad (6-11)$$

6.2.2.3 BER3 - REAKTIVE SCHNITTGRÖßEN DRUCKZONE UND NW UHPC-EL.(1)

- Spalte B: Ermittlung der maximalen Kraft in der Druckzone des Übergangsbereiches (lt. Fachwerkmodell)

$$C_{d,ges} = \frac{m_{sd}}{z} \cdot \frac{v_{sd}}{2 \cdot \tan \theta} \quad (6-12)$$

- Spalte C: Gibt den Wert der Druckkraft aus Spalte B pro Element wider

$$C_d = \frac{C_{d,ges}}{n_{Schub} + n_{Druck}} \quad (6-13)$$

- Spalte D: Berechnet die maximale Druckdiagonalkraft des Übergangsbereiches (lt. Fachwerkmodell)

$$D_{d,ges} = v_{sd} \cdot \sin \theta \quad (6-14)$$

- Spalte E: Wie Spalte D, jedoch pro Schubelement.

$$D_d = \frac{D_{d,ges}}{n_{Schub}} \quad (6-15)$$

- Spalte F: Stellt den Ausnutzungsgrad des gewählten Normalbetons im Druckübergangsbereich dar. Überschreitungen der 100 [%]-Marke werden ausgesondert.

Tritt, wie im Fall der Druckelemente, eine Teilflächenbelastung auf, darf laut [4 - 6.7] die Verteilungsfläche um maximal den Faktor 3 erhöht werden. Jedoch dürfen nicht mehrere Druckkräfte auf denselben Betonquerschnitt wirken. Für eine große Anzahl von Druck- bzw. Schubelementen kann dies der Fall sein, wie die Abbildung 6-15 zeigt.

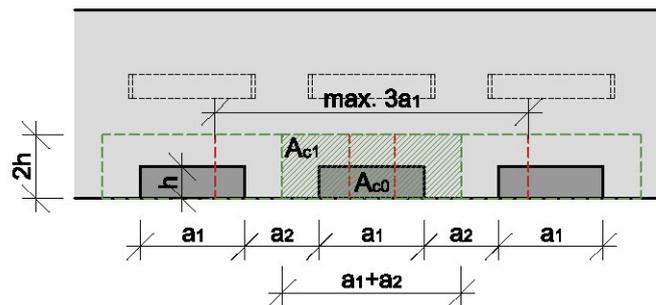


Abb.6-15: Flächendarstellung Teilflächenbelastung Druckzone

Ermöglicht werden diese Annahmen durch die behinderte Querdehnung des Betons, welche einen günstigen mehrdimensionalen Spannungszustand erzeugt.

$$F_{Rd,u} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot (a_1 + a_2)}{a_1 \cdot h}} \leq 3,0 \cdot A_{c0} \cdot f_{cd} \quad (6-16)$$

$$\eta_{Druck} = \frac{C_d}{F_{Rd,u}} \quad (6-17)$$

Spalte G: Hier wird die Druckkraft pro Druckelement auf den minimalen Querschnitt des UHPC-Einzelteiles (Abmessung 32/20 [mm]) bezogen und mit der maximal aufnehmbaren Bemessungsspannung verglichen. Für die aufnehmbare Spannung wurde zusätzlich zum Sicherheitsbeiwert der Dauerstandsbeiwert $\alpha_{cc} = 0,85$ berücksichtigt.

$$\eta = \frac{\sigma_{cd,UHPC}}{f_{cd,UHPC}} \quad (6-18)$$

Spalte H: Die Lasteinleitung der Zugkräfte aus den Schlaufenquerschnitten erfolgt im Übergangsbereich über Druckspannungen im Beton bzw. über die Weiterleitung der Kräfte in die Stahl-Anschlussbewehrung. Auch hier wird der Ansatz der

Teilflächenpressung ausgenutzt (siehe Abbildung 6-16). Inwieweit diese Annahmen gerechtfertigt sind, sollen weitere Versuche zeigen.

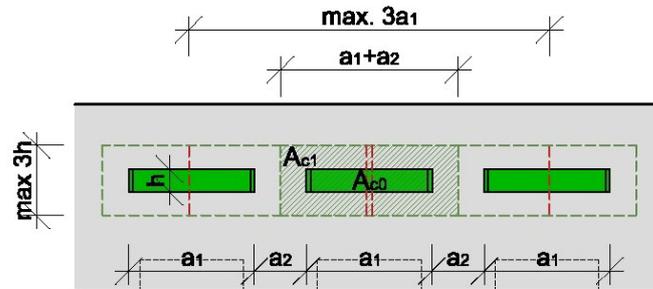


Abb.6-16: Flächendarstellung Teilflächenpressung Übergabe Schlaufenkraft

Für die Ermittlung der maximalen Teilflächenpressungskraft ist Formel (6-19) gültig.

$$F_{Rd,u} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot h \cdot (a_1 + a_2)}{a_1 \cdot h}} \leq 3,0 \cdot A_{c0} \cdot f_{cd} \quad (6-19)$$

Spalte I: Wertet die Ausnutzung der maximalen Spannung im Übergabebereich der Schlaufenkräfte auf den Beton aus.

$$\eta_{\text{Übergabe Schlaufenkraft}} = \frac{T_d}{F_{Rd,u}} \quad (6-20)$$

6.2.2.4 BER4 - NACHWEISE UHPC-ELEMENT (2) + VERFORMUNG

Spalte B: Spannung im Auflagerbereich der Druckdiagonale

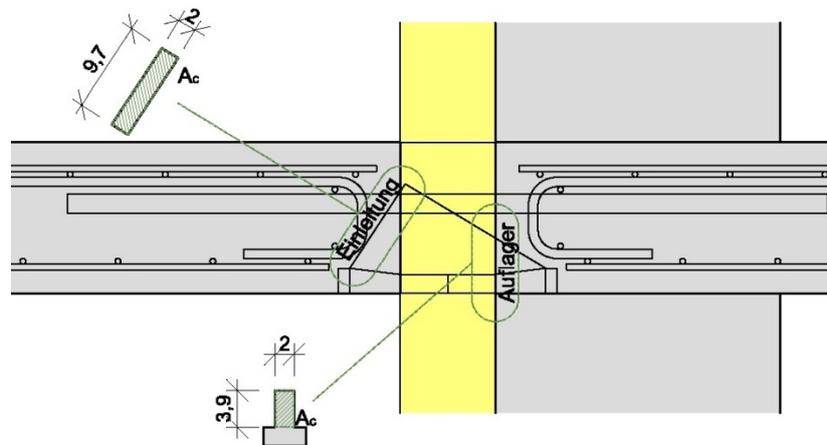


Abb.6-17: Flächendarstellung Schubelement

Die zur Berechnung verwendeten Querschnittsabmessungen sind in Abbildung 6-17 dargestellt.

$$\sigma_{\text{Schub, Auflager}} = \frac{D_d}{A_{\text{Schub1}}} \quad (6-21)$$

Spalte C: Wertet die Ausnutzung der maximalen Spannung im Auflagerbereich der Druckdiagonale aus.

$$\eta_{\text{Schub, Auflager}} = \frac{\sigma_{\text{Schub, Auflager}}}{f_{\text{cd,UHPC}}} \quad (6-22)$$

Spalte D: Gibt die Spannung im Lasteinleitungsbereich der Druckdiagonale aus. Verwendete Flächen sind Abbildung 6-17 zu entnehmen.

$$\sigma_{\text{Schub, Einleitung}} = \frac{D_d}{A_{\text{Schub2}}} \quad (6-23)$$

Spalte E: Wertet die Ausnutzung der maximalen Spannung im Lasteinleitungsbereich der Druckdiagonale aus. Da in Spalte C die UHPC-Spannung schon für den kleineren Querschnitt nachgewiesen wurde, kann hier darauf verzichtet und der Normalbeton betrachtet werden.

$$\eta_{\text{Schub, Einleitung}} = \frac{\sigma_{\text{Schub, Einleitung}}}{f_{\text{cd}}} \quad (6-24)$$

Spalte F: Verformung w am Kragarmende infolge Biegemomentenbelastung. Wie schon in Abschnitt 6.2.2.1 erläutert, kann bei Einhaltung der Biegeschlankheiten lt. Eurocode der Nachweis der

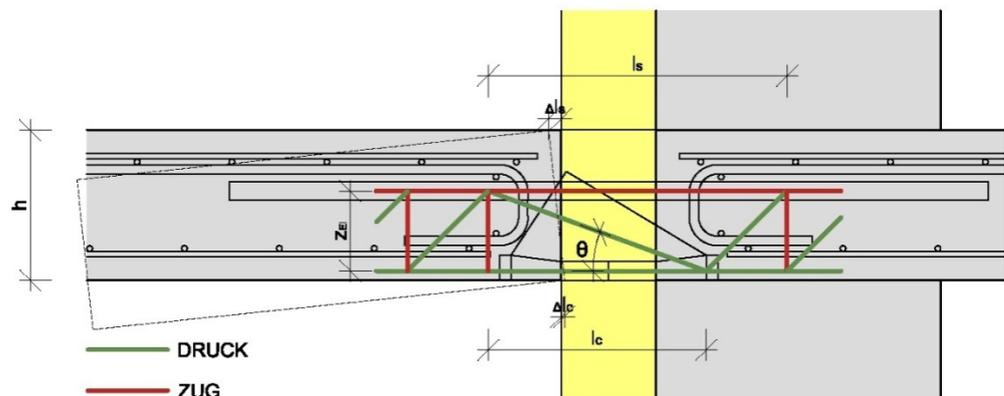


Abb.6-18: Verformungsverhalten des HL-Korbes (konzeptionell aus [1])

Verformung am Kragarmende über den Vergleich einer Starrkörperrotation (Dehnung der FKV-Schlaufen und Stauchung der UHPC-Elemente) zur maximal erlaubten Überhöhung erfolgen. Vorausgesetzt wird hier, dass sich die Kragplatte nach der Starrkörperrotation in horizontaler Lage befindet.

Die Berechnung erfolgt auf dem quasi-ständigen Lastniveau des SLS. Für weitere Erläuterungen sei auf [1 – 7.10] verwiesen.

$$w_{m2} = \frac{l_{\text{Auskragung}}}{z_{\text{Element}}} \cdot \left(\frac{T_{d,\text{ges}} \cdot l_s}{E_{\text{FKV}} \cdot A_{\text{FKV}}} + \frac{C_{d,\text{ges}} \cdot l_c}{E_{\text{UHPC}} \cdot A_{\text{UHPC}}} \right) \quad (6-25)$$

Spalte G: Berechnet die Durchbiegung w zur Folge Querkrafteinwirkung

Anmerkung: Verformungen sind sehr gering und können vernachlässigt werden.

$$w_{v2} = \frac{C_{d,\text{ges}} \cdot l_c}{E_{\text{UHPC}} \cdot A_{\text{UHPC}}} \cdot \sin \theta \quad (6-26)$$

Spalte H: Summiert Ergebnisse der Spalten F und G zu einer Gesamtdurchbiegung am Kragarmende zur Folge einer Starrkörperrotation (Verformungen im Kragplattenbereich sind hier nicht berücksichtigt)

$$w_{\text{ges}} = w_{m2} + w_{v2} \approx w_{m2} \quad (6-27)$$

Spalte I: Mit den Ergebnissen aus Spalte H kann nun ein Verhältnis zwischen auftretender Verformung und der nach EC2 maximal erlaubten Überhöhung hergestellt werden. Wie angenommen, sind hohe Ausnutzungen bzw. Überschreitungen bei niedrigem FKV-Modul zu erwarten. Daher dient diese Berechnungshilfe in weiterer Folge zur Abgrenzung ausführbarer HL-Korb-Typen. Aufgrund der Auswertung signifikanter Variationen der Eingangswerte kann ein Bereich möglicher Dehnsteifigkeitsverhältnisse aufgestellt werden. Dies wird in Kapitel 6.3 genauer bearbeitet. Ausgangswert für die Berechnung der maximalen Überhöhung stellt das Verhältnis von Kraglänge (Knicklänge = $2 \cdot l_{\text{Auskragung}}$) zu 250 dar.

$$\eta_{\text{Verformung}} = \frac{w_{\text{ges}}}{\bar{u}_{\text{max}}} \quad (6-28)$$

6.2.2.5 BER5 – ÄQU. WÄRMEDURCHLASSWIDERSTAND GEW. KONFIGURATION

Seite 5 dient der Aufsummierung bzw. Zusammenfassung gesammelter Ergebnisse aus den vorangegangenen Berechnungsblättern. Im ersten Bereich werden die Flächenanteile der gewählten Konfiguration aufgezeigt. In weiterer Folge wird ein flächenmäßig gewichtetes Mittel der einzelnen Materialeitfähigkeiten (λ_{eq}) gebildet. Dies führt zum äquivalenten Wärmedurchlasswiderstand (Dämmstoffdicke/ λ_{eq}), mit welchem der gewählte Aufbau mit am Markt befindlichen Systemen vergleichsfähig wird.

Die Hauptgrafik in diesem Berechnungsblatt bildet den Vergleich des gewählten AVI-Hochleistungsthermoelementes mit Systemen einiger Konkurrenzanbieter ab. Hierbei stellen die stufenartigen Kennlinien verschiedene Ausführungsvarianten dar, von denen ein definierter Momententragfähigkeitsbereich bzw. ein äquivalenter Wärmedurchlasswiderstand bekannt sind. Die Kennlinien variieren mit Auswahl der Deckenstärke h (Darstellungen entsprechen einem b von 1,0 [m]). Grundlage für diese Darstellung stellen Auswertungen aus [1] dar. Es ist anzumerken, dass die Abbildung des AVI-HL-Korbes lediglich einer Tragfähigkeitsstufe entspricht – nämlich jener der gewählten Konfiguration. Eine Abstufung mehrerer Untersuchungsergebnisse wird in 6.4 dargestellt.

Die zweite Grafik gibt eine Übersicht über die gewählten Elemente in einer Schnittdarstellung eines Deckenstreifens. Hier sind blau gekennzeichnete Bereiche schematisch Druck- bzw. Schubelemente und rot gefärbte Darstellungen FKV-Schleifen. Die Aufteilung der einzelnen Elemente erfolgt symmetrisch und dient lediglich der Veranschaulichung, muss jedoch nicht der weiteren Ausführung entsprechen.

In den letzten beiden Zeilen des erstellten Berechnungsprogrammes werden maximal nutzbare Kräfte bzw. Momente und das Gesamtgewicht eines Elementes, bezogen auf die gewählte Breite b , angeführt.

Ausgewertete Berechnungen, die mit dem Programm erstellt wurden, liegen dem Anhang bei.

6.3 KONTROLLBERECHNUNGEN

Die folgenden Absätze beziehen sich auf die FE-Berechnungen in 6.1.2 und sollen eine Sicherstellung der gewählten Berechnungs- bzw. Nachweisverfahren darstellen. Der Vergleich einzelner signifikanter Ergebnisse, wie z.B. der Spannung im FKV-Schlaufenquerschnitt, ist Hauptbestandteil dieses Abschnittes.

6.3.1 VERGLEICH VERSCHIEDENER FACHWERKMODELLE

Um die Vielzahl der möglichen Fachwerkmodelle für den Übergangsbereich miteinander zu vergleichen, dient Tabelle 6-4. Es wurden sechs Fachwerkmodelle (drei davon dargestellt) den Ergebnissen aus der FE-Berechnung gegenüber gestellt und ausgewertet. Grundsätzlich konnten, trotz sehr guter Übereinstimmung mit der FE-Simulation, Modell 3 und 4 ausgesondert werden, da sich bei näherer Betrachtung Unstimmigkeiten in der Lastübertragung der Druckdiagonale ergaben. Modell 5 und 6, mit den definierten Druckstrebenneigungen von 32 und 40 [°] wurden ebenfalls nicht für die weitere Betrachtung angewendet, da die Modelle 1 und 2 mit einer variablen Neigung über die Deckenstärken besser den tatsächlichen Lastfluss widerspiegeln. Anwendung fand Modell 2, welches auch im erstellten Berechnungsprogramm (siehe 6.2) implementiert wurde. Verglichen wurden Auskragungslängen von 1, 1,5 und 2,0 [m]. Grau hinterlegte Zeilen stellen hochbelastete Kragelamente dar.

| z [m] | | | 1 | | | 2 | | | 3 | | |
|----------|-----------|-------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| | | | θ [°] | step 1 [%] | step 10 [%] | θ [°] | step 1 [%] | step 10 [%] | θ [°] | step 1 [%] | step 10 [%] |
| 1,00 | 16cm Brl. | 0,085 | 20,28 | 68% | 70% | 20,28 | 81% | 83% | 40,36 | 83% | 85% |
| | 16cm | 0,085 | 20,28 | 61% | 69% | 20,28 | 72% | 81% | 40,36 | 73% | 83% |
| | 17cm | 0,095 | 22,44 | 62% | 70% | 22,44 | 73% | 82% | 43,53 | 75% | 84% |
| | 18cm | 0,105 | 24,54 | 63% | 70% | 24,54 | 74% | 82% | 46,40 | 76% | 84% |
| | 19cm Brl. | 0,115 | 26,57 | 70% | 71% | 26,57 | 83% | 84% | 48,99 | 85% | 86% |
| | 19cm | 0,115 | 26,57 | 63% | 69% | 26,57 | 74% | 81% | 48,99 | 76% | 83% |
| | 20cm | 0,125 | 28,52 | 65% | 71% | 28,52 | 77% | 84% | 51,34 | 79% | 86% |
| | 21cm | 0,135 | 30,41 | 67% | 71% | 30,41 | 78% | 84% | 53,47 | 80% | 86% |
| | 22cm | 0,145 | 32,23 | 67% | 71% | 32,23 | 79% | 84% | 55,41 | 81% | 86% |
| | 23cm | 0,155 | 33,98 | 68% | 72% | 33,98 | 80% | 84% | 57,17 | 82% | 86% |
| 1,50 | 16cm | 0,085 | 20,28 | 71% | 76% | 20,28 | 80% | 85% | 40,36 | 82% | 87% |
| 2,00 | 16cm | 0,085 | 20,28 | 77% | 80% | 20,28 | 85% | 88% | 40,36 | 86% | 90% |

Tab.6-4: Vergleich unterschiedlicher Fachwerkmodelle

Aus Tabelle 6-4 kann gefolgert werden, dass bei hoher Ausnutzung bzw. Belastung des Kragarmes die Näherung des Fachwerkmodelles sehr gute Ergebnisse erzielt. Dies weist darauf hin, dass bei hohen Laststufen die Realität durch das gewählte System sehr gut abgebildet wird. Dazu kann angemerkt werden, dass Step 1 den Zustand I im Beton widerspiegelt und die Druckstrebe aus den Hauptspannungen ermittelbar ist. Step 10 stellt

im Normalfall den Zustand II dar und die Druckstrebenneigung stellt sich je nach gewähltem Stabwerkmodell ein (statischer Satz).

Statischer Satz: Wenn für ein Tragwerk mit einer bestimmte Last eine Schnittgrößenverteilung existiert, die sowohl sicher als auch statisch zulässig ist, so ist diese Last kleiner oder gleich der plastischen Grenzlast. [9]

6.3.2 VERGLEICH MIT FE-BERECHNUNG

6.3.2.1 DRUCKSTREBENNEIGUNG AUS HAUPTSPANNUNGSRICHTUNG

Um die Wahl des geeigneten Fachwerkmodelles bzw. die Ermittlung der Druckstrebenneigung zu verifizieren, wird anhand zweier berechneter Beispiele unterschiedlicher Deckenstärke ein Schnitt durch das Schubelement gelegt. Für diesen Schnitt werden die Hauptspannungsrichtungen in unten angeführten Abbildungen dargestellt. Zusätzlich ist ergänzt die Neigung der Hauptdruckspannung grün dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit dem gewählten Fachwerkmodell.

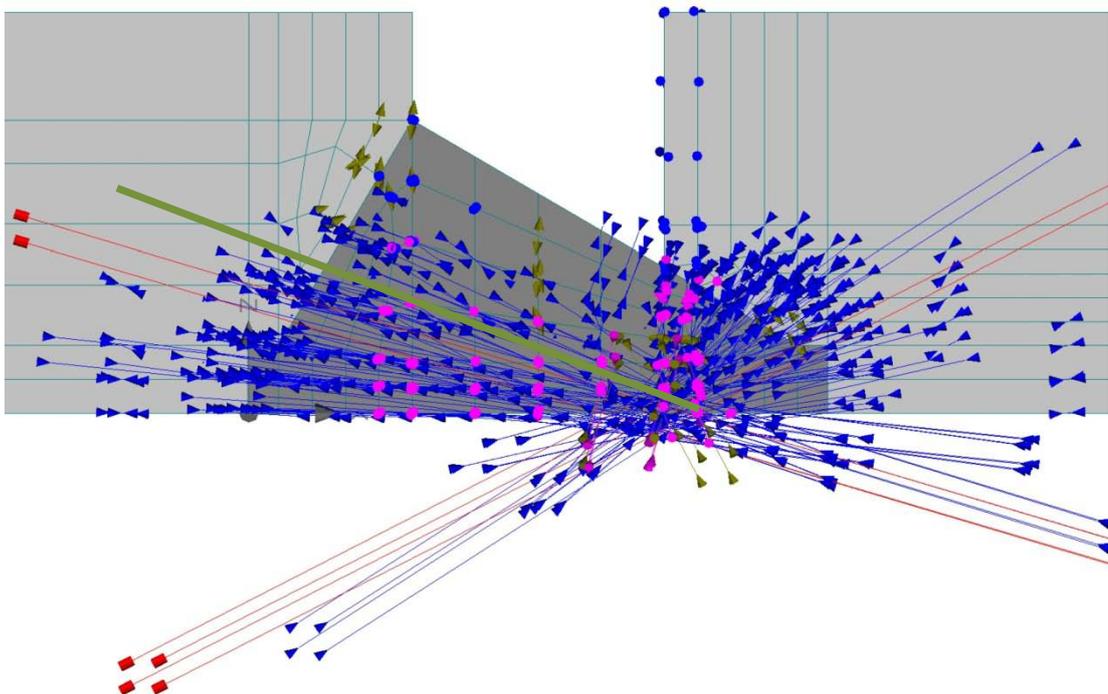


Abb.6-19: Hauptspannungsrichtungen Laststep 10, Deckenstärke 16 [cm]

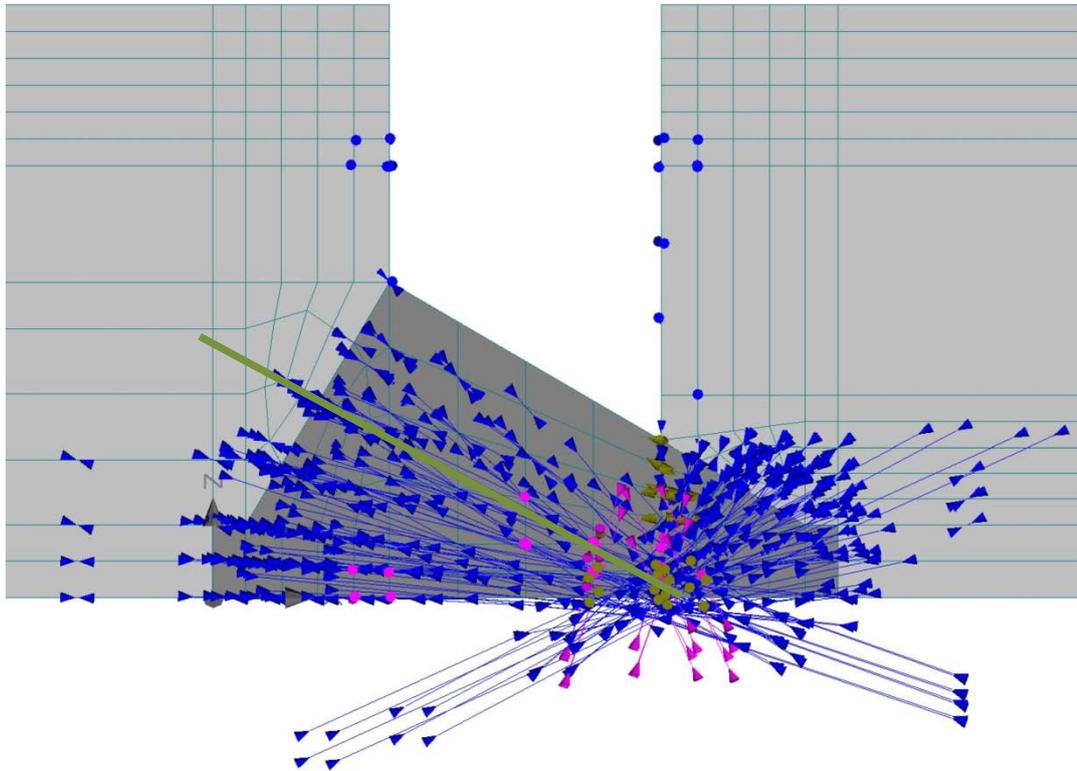


Abb.6-20: Hauptspannungsrichtungen Laststep 10, Deckenstärke 22 [cm]

6.3.2.2 BEISPIEL 1: DS_16_100_CFK-80/126000

Um Vergleichswerte zu erhalten, wurden die Eingangswerte des FE-Berechnungsbeispiels in das erstellte Kontrollprogramm eingegeben. Um die Ergebnisse auch mit den Konkurrenzprodukten vergleichbar zu machen, wurde ein ein Meter langer Streifen abgebildet, d.h. jeweils vier Elemente angeordnet. Der Gesamtausdruck der Berechnungsdatei liegt dem Anhang unter der Bezeichnung A1 bei.

Folgende Ergebnisse wurden verglichen:

CFK-Schlaufe:

Die Spannung im CFK-Querschnitt ergibt sich zu 331,7 [N/mm²], was einer Näherung zur FE-Berechnung von 80 [%] entspricht. Das Grundmaterial ist, bezogen auf die angenommenen Festigkeitseigenschaften (Designwerte) zu rund 43 [%] ausgelastet. Für weitere Betrachtungen ist es angedacht, die Querschnittsflächen der Schlaufen im Nachweis des ULS zu überdimensionieren, um

für das Verformungsverhalten eine hohe Dehnsteifigkeit (EA) zu erreichen. Abbildung 6-21 stellt den Vergleich der FE-Rechnung zum Stabwerkmodell grafisch über den Verlauf der Laststeigerung dar. Hierbei zeigt die rote Kennlinie die FE-Berechnung an. Es ist klar zu erkennen, dass das Fachwerkmodell stets die konservativere Näherung darstellt.

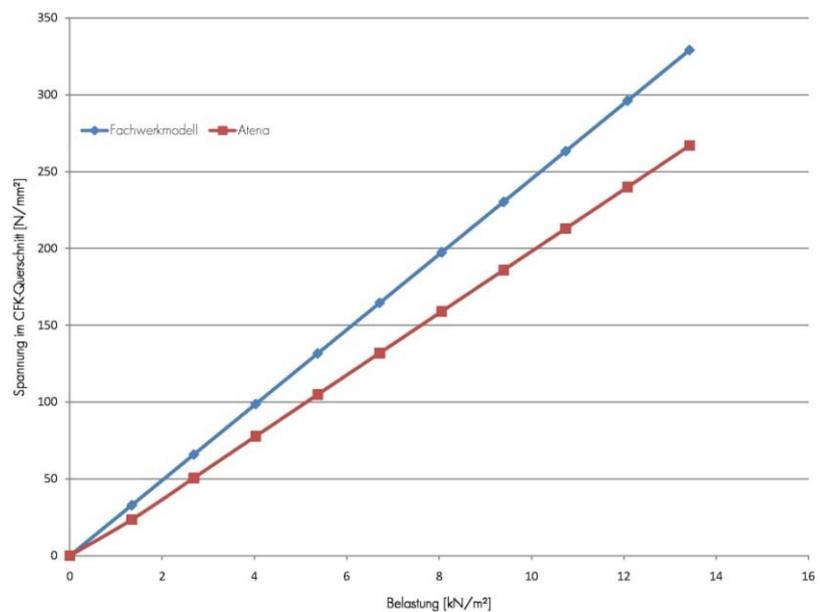


Abb.6-21: Bsp1: Vergleich der Spannungen im CFK (FEM/FWM)

Druckspannungen im Übergabebereich:

Die berechnete Spannung im Lastübergabebereich (27/88 [mm]) des Druckelementes ergibt sich zu 7,15 [N/mm²]. Wie in Abbildung 6-22 zu ersehen „überschätzt“ das Stabwerkmodell die auftretenden Druckkräfte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Schubteil auf Biegung mitträgt. Es liegt kein getrennter Tragmechanismus von Moment und Querkraft vor. Daher wirken auf das eigentliche Druckelement geringere Kräfte als errechnet. Lt. FE-Auswertung stellt sich hier ein Maximalwert von 4,77 [N/mm²] ein. Zusätzlich ist der Verlauf der Spannung über die Höhe nicht konstant und nimmt zum Druckaußenrand zu.

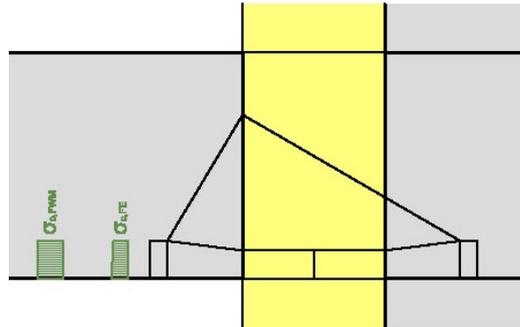


Abb.6-22: Lasteinleitungsbereich Druckelement

Verformungen am Kragarmende:

Vorab ist anzumerken, dass weder die Ergebnisse aus dem Fachwerkmodell noch jene aus der vermeintlich genaueren FE-Vorberechnung die Realität gänzlich abbilden. Das Stabwerkmodell beruht auf einfachen statischen Zusammenhängen, welche jedoch wiederum auf vereinfachten Annahmen basieren. Die Berechnung mittels der Methode der Finiten Elemente kann die Wirklichkeit sehr gut darstellen – je mehr Parameter der Einzelkomponenten bekannt sind, desto besser und genauer sind die Ergebnisse. Eben diese Parameter sollen mittels Versuchen bestimmt werden. Zum Beispiel sind Ausziehversuche von Schlaufen-Prüfkörpern aus Normalbeton geplant, welche eine Verbund-Schlupf-Beziehung ergeben sollen. Für die vorliegende Berechnung wurde von vollem Verbund ausgegangen.

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass für eine genauere Berechnung der Verformung realistische Eingangswerte bereitzustellen sind.

Die Verformungen betragen lt. Fachwerkmodell 5,6 [mm] und die Berechnung in Atena liefert den Wert von 2,3 [mm]. Der realistische Wert wird dazwischen zu liegen kommen, da das Stabwerkmodell vom konservativsten Fall ausgeht und auch die FE-Berechnung die Verformung der Schlaufe nicht wirklichkeitsgetreu abbildet. Daher sind diese Werte als zu erwartende Grenzen zu verstehen.

6.3.2.3 BEISPIEL 2: DS_16_200_CFK-80/126000

Die Kontrollberechnung für Beispiel 2 ist ebenfalls im Anhang A1 enthalten.

CFK-Schlaufe:

Die Spannung im CFK-Querschnitt wird mit 1153,5 [N/mm²] beziffert. Dies entspricht rund 88 [%] der FE-Ergebnisse. Das Materialverhalten in der Atena-Eingabe wurde linear-elastisch ohne ein Grenzkriterium der Spannung angenommen. Dies führt dazu, dass die erwartete Bemessungsspannung überschritten wurde, wobei die Definition eines Sicherheitsbeiwertes erst nach einer funktionierenden Schlaufenversuchsreihe erfolgen kann. Unten abgebildete Grafik zeigt die unterschiedlichen Berechnungsergebnisse beider Modelle. Die Differenz der Ergebniswerte ist für höhere Belastungsstufen geringer.

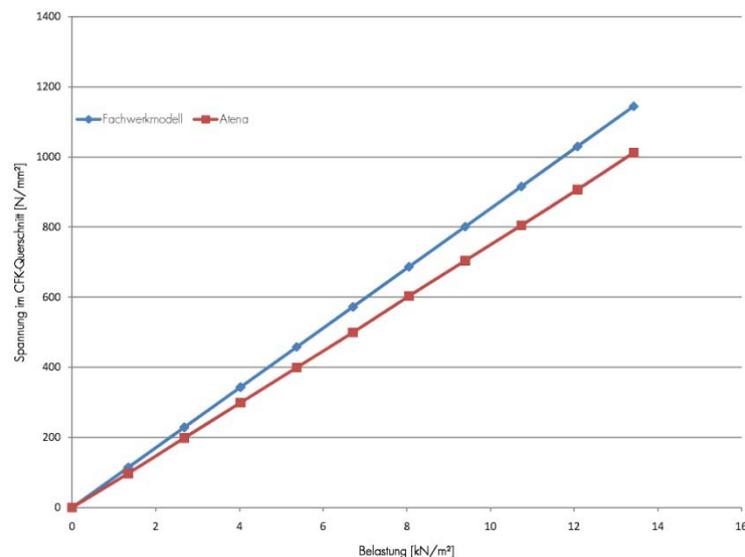


Abb.6-23: Bsp2: Vergleich der Spannungen im CFK (FEM/FWM)

Druckspannungen im Übergabebereich:

Die berechnete Spannung im Lastübergabebereich des Druckelementes ergibt sich zu 31,02 [N/mm²]. In der FE-Auswertung stellt sich hier ein Maximalwert von 16,58 [N/mm²] ein, was wie in Beispiel 1 ca. Faktor 2 bedeutet.

Verformungen am Kragarmende:

Die Verformungen betragen lt. Fachwerkmodell 40,2 [mm]. Die Berechnung in Atena liefert den Wert von 32,7 [mm]. Dies demonstriert sehr deutlich, dass die angenommene Auskragungslänge für den Einsatz von vier HL-Elementen nicht realisierbar ist. Hier sei auf das Kapitel 6.4 verwiesen, in welchem eine Parameterstudie über mögliche Belastungs- und Auskragungslängen angestellt wird. Zusätzlich werden mögliche Vorschläge für die Tragfähigkeitsabstufung des AVI-Hochleistungskorbes gegeben.

6.4 VORSCHLÄGE FÜR DIE TRAGFÄHIGKEITSABSTUFUNG

Um einen Überblick der unzähligen verschiedenen Kombinationen zu erhalten, werden in den folgenden Unterkapiteln für unterschiedliche Deckenstärken ausführbare Varianten ausgearbeitet. Die Studie erfolgte mit dem erstellten Berechnungsprogramm in Excel. Durch die große Anzahl an Datenblättern sind diese dem Anhang nicht beigelegt. Die Berechnung kann durch Eingabe der angegebenen Eingangswerte überprüft werden.

Es wurde in den Kombinationen darauf geachtet, Symmetriebedingungen zu beachten, beispielsweise ein Druck-/ bzw. Schubelement je FKV-Schlaufe. Im Anschluss an die tabellarische und grafische Ausgabe der Ergebnisse erfolgt jeweils eine Erläuterung der gewählten Kombinationen.

In der unten angeführten Tabelle sind fixierte Eingangswerte aufgelistet, welche nicht variiert wurden.

| | | | |
|---------------------|----------|-------|----------------------|
| UHPC-Eigenschaften: | E | 50000 | [N/mm ²] |
| | f_{ck} | 160 | [N/mm ²] |
| Normalbeton: C25/30 | f_{ck} | 25 | [N/mm ²] |

Tab.6-5: Fixierte Eingangswerte

6.4.1 DECKENSTÄRKE 16CM

6.4.1.1 VARIANTE 1

Für Variante 1 wird als Schlaufenmaterial glasfaserverstärkter Kunststoff verwendet. Eigenschaftswerte sind in der unten dargestellten Tabelle aufgelistet. Es werden

Systemaufbauten mit fünf, sechs, sieben und acht Schlaufen errechnet, wobei die Querschnittsabmessungen konstant gehalten werden. Mit der Anzahl der Schlaufen variieren auch die Druck- und Schubelemente wobei eine Reihe mit erhöhter Querkrafttragfähigkeit ermittelt wurde. Diese Kombinationen sind mit einem „v“ gekennzeichnet. Die Summe der Druck- und Schubelemente entspricht in dieser Kombinationsreihe der Anzahl der angewendeten Schlaufen. Allgemein stellt die Benennung der Systeme die Deckenstärke und die Anzahl der Schlaufen dar (vgl. hierzu Tabelle 6-7).

| FKV-Eigenschaften: | GFK | | |
|--------------------|------------------|-------|----------------------|
| | E | 40000 | [N/mm ²] |
| | f _{yk} | 900 | [N/mm ²] |
| | λ _{FKV} | 1,0 | [W/mK] |

Tab.6-6: Variante1: Eingangswerte FKV-Material

| Bezeichnung | b _{schl} | h _{schl} | Schlaufen | Schub- elemente | Druck- elemente | V _{rd} | m _{rd} | R _{eq} |
|----------------|-------------------|-------------------|-----------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| | [mm] | [mm] | [Stk.] | [Stk.] | [Stk.] | [kN] | [kNm] | [m ² K/W] |
| AVI - HLE16/5 | 6,0 | 20,0 | 5 | 3 | 2 | 35,8 | 30,6 | 0,91 |
| AVI - HLE16/6 | 6,0 | 20,0 | 6 | 3 | 3 | 35,8 | 33,9 | 0,85 |
| AVI - HLE16/6v | 6,0 | 20,0 | 6 | 4 | 2 | 47,8 | 32,5 | 0,77 |
| AVI - HLE16/7 | 6,0 | 20,0 | 7 | 3 | 4 | 35,8 | 36,9 | 0,80 |
| AVI - HLE16/7v | 6,0 | 20,0 | 7 | 4 | 3 | 47,9 | 35,6 | 0,73 |
| AVI - HLE16/8 | 6,0 | 20,0 | 8 | 4 | 4 | 35,8 | 39,8 | 0,76 |
| AVI - HLE16/8v | 6,0 | 20,0 | 8 | 6 | 2 | 71,7 | 35,6 | 0,59 |

Tab.6-7: Abstufung DS16 - Variation 1

Wie aus Tabelle und Grafik dieser Variante hervorgeht, ist eine „breite“ Momentenabstufung, wie es bei einigen Konkurrenzsystemen der Fall ist, nicht gegeben. Weiters ist zu erwähnen, dass der konzipierte Korb HLE16/5 schon eine sehr hohe Tragfähigkeit aufweist und damit einen relativ großen Bereich bis rund 30 [kNm] abdeckt. Dies resultiert aus einer Mindestzahl an Schubelementen, die nötig ist, um die Kräfte einleiten bzw. weiterleiten zu können. Der mit HLE16/8v gekennzeichnete Korb weist dieselbe Momententragfähigkeitsstufe als 7v auf und wird daher nur als Punkt dargestellt. Dies ergibt sich daraus, da dasselbe begrenzende Kriterium, das Versagen des Normalbetons im Bereich der Kräfteinleitung der Schlaufe, eintritt.

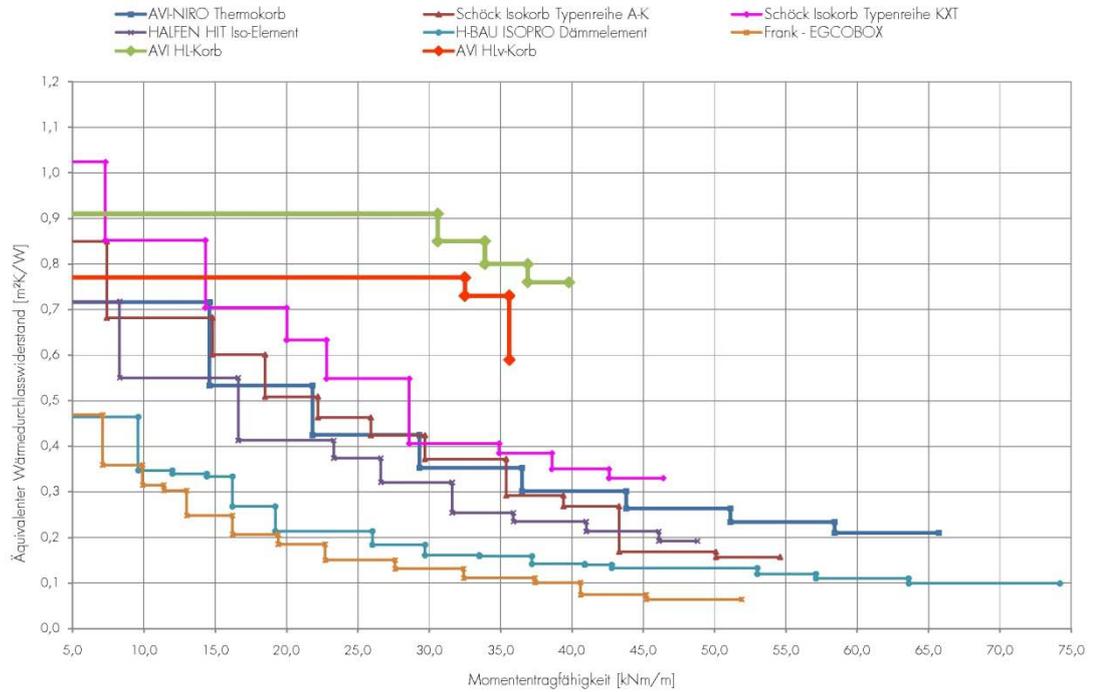


Abb.6-24: Abstufung DS16 - Variation 1

6.4.1.2 VARIANTE 2

Die Grundbezeichnungen der HL-Elemente werden in Variante 2 beibehalten. Prinzipiell unterscheidet sich diese Variante lediglich in Schlaufenstärke und -höhe.

| Bezeichnung | b_{schl} | h_{schl} | Schlaufen | Schub- elemente | Druck- elemente | V_{rd} | m_{rd} | R_{eq} |
|----------------|------------|------------|-----------|--------------------|--------------------|----------|----------|----------|
| | [mm] | [mm] | [Stk.] | [Stk.] | [Stk.] | [kN] | [kNm] | [m²K/W] |
| AVI - HLE16/5 | 5,0 | 25,0 | 5 | 3 | 2 | 34,8 | 38,1 | 0,91 |
| AVI - HLE16/6 | 5,0 | 25,0 | 6 | 3 | 3 | 34,8 | 42,1 | 0,85 |
| AVI - HLE16/6v | 5,0 | 25,0 | 6 | 4 | 2 | 46,4 | 40,8 | 0,77 |
| AVI - HLE16/7 | 5,0 | 25,0 | 7 | 3 | 4 | 34,8 | 45,2 | 0,80 |
| AVI - HLE16/7v | 5,0 | 25,0 | 7 | 4 | 3 | 46,4 | 44,5 | 0,73 |
| AVI - HLE16/8 | 5,0 | 25,0 | 8 | 4 | 4 | 46,4 | 47,9 | 0,69 |
| AVI - HLE16/8v | 5,0 | 25,0 | 8 | 6 | 2 | 69,6 | 45,3 | 0,59 |

Tab.6-8: Abstufung DS16 - Variation 2

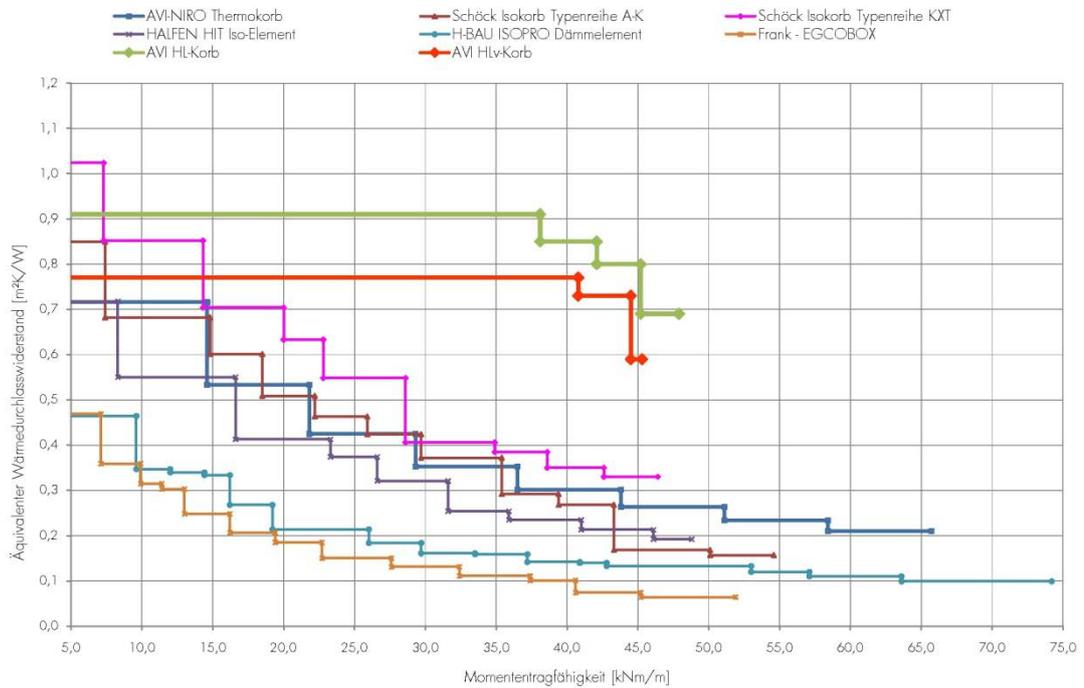


Abb.6-25: Abstufung DS16 - Variation 2

Die Veränderungen in Variante 2 bewirkten eine Verschiebung hin zu höherer Tragfähigkeit, was auf die größere Schlaufenhöhe zurückzuführen ist. Diese bewirkt einen größeren Lasteinleitungsbereich für die Übergabe der Schlaufenkraft auf den Beton. Da die Schlaufenquerschnitte aus Verformungsgründen für den ULS-Fall überbemessen sind, tritt hier als limitierende Kenngröße die Normalbetonfestigkeit auf. Diese Feststellung gilt jedoch auch für Variante 1.

6.4.1.3 VARIANTE 3

Diese Variante beinhaltet als Schlaufenwerkstoff Aramid. Das Material weist einen höheren E-Modul und eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit auf (siehe Tabelle). Ansonsten wurden alle Eingangswerte von Variante 2 übernommen.

| FKV-Eigenschaften: | AFK | | |
|--------------------|-------|----------------------|--|
| E | 45000 | [N/mm ²] | |
| f _{yk} | 900 | [N/mm ²] | |
| λ _{FKV} | 0,4 | [W/mK] | |

Tab.6-9: Variante3: Eingangswerte FKV-Material

| Bezeichnung | b_{schl} | h_{schl} | Schlaufen | Schub- elemente | Druck- elemente | V_{rd} | m_{rd} | R_{eq} |
|----------------|-------------------|-------------------|-----------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| | [mm] | [mm] | [Stk.] | [Stk.] | [Stk.] | [kN] | [kNm] | [m ² K/W] |
| AVI - HLE16/5 | 5,0 | 25,0 | 5 | 3 | 2 | 34,8 | 38,1 | 0,95 |
| AVI - HLE16/6 | 5,0 | 25,0 | 6 | 3 | 3 | 34,8 | 42,1 | 0,90 |
| AVI - HLE16/6v | 5,0 | 25,0 | 6 | 4 | 2 | 46,4 | 40,8 | 0,80 |
| AVI - HLE16/7 | 5,0 | 25,0 | 7 | 3 | 4 | 34,8 | 45,2 | 0,85 |
| AVI - HLE16/7v | 5,0 | 25,0 | 7 | 4 | 3 | 46,4 | 44,5 | 0,76 |
| AVI - HLE16/8 | 5,0 | 25,0 | 8 | 4 | 4 | 46,4 | 47,9 | 0,73 |
| AVI - HLE16/8v | 5,0 | 25,0 | 8 | 6 | 2 | 69,6 | 45,3 | 0,62 |

Tab.6-10: Abstufung DS16 - Variation 3

Durch den Wechsel des Schlaufenmaterials veränderten sich die Tragfähigkeiten der HL-Körbe nicht, allerdings war hier die Überlegung, die schlechten Wärmeleiteigenschaften des Aramid zu nutzen, um dadurch das Element von Konkurrenzprodukten weiter abzuheben. Es muss jedoch festgestellt werden, dass die um 60 [%] niedrigere Wärmeleitung lediglich eine 4-6 [%-ige] Verbesserung der Dämmeigenschaften bewirkt. Die höhere Steifigkeit des Aramid ist jedoch von Vorteil für die Verformungsberechnung.

6.4.2 DECKENSTÄRKE 18CM

| Bezeichnung | b_{schl} | h_{schl} | Schlaufen | Schub- elemente | Druck- elemente | V_{rd} | m_{rd} | R_{eq} |
|----------------|-------------------|-------------------|-----------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| | [mm] | [mm] | [Stk.] | [Stk.] | [Stk.] | [kN] | [kNm] | [m ² K/W] |
| AVI - HLE18/5 | 5,0 | 25,0 | 5 | 3 | 2 | 43,2 | 47,3 | 0,98 |
| AVI - HLE18/6 | 5,0 | 25,0 | 6 | 3 | 3 | 43,2 | 52,3 | 0,92 |
| AVI - HLE18/6v | 5,0 | 25,0 | 6 | 4 | 2 | 57,6 | 50,7 | 0,84 |
| AVI - HLE18/7 | 5,0 | 25,0 | 7 | 3 | 4 | 43,2 | 56,2 | 0,87 |
| AVI - HLE18/7v | 5,0 | 25,0 | 7 | 4 | 3 | 57,6 | 55,3 | 0,79 |
| AVI - HLE18/8 | 5,0 | 25,0 | 8 | 4 | 4 | 57,6 | 59,5 | 0,75 |
| AVI - HLE18/8v | 5,0 | 25,0 | 8 | 6 | 2 | 86,5 | 56,2 | 0,65 |

Tab.6-11: Abstufung DS18 - Variation 2

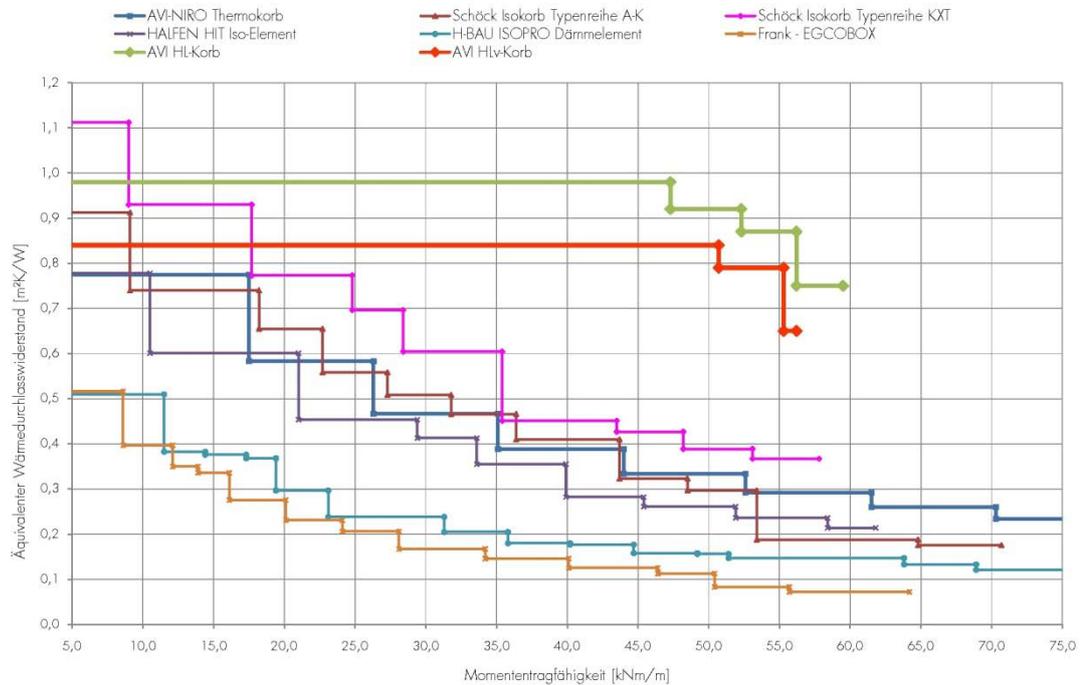


Abb.6-26: Abstufung DS18 - Variation 2

Das Diagramm 6-26 zeigt klar die Überlegenheit des neuen HL-Elementes im hohen Tragfähigkeitsbereich. Das Manko der schlechteren Dämmeigenschaften im unteren Bereich von m_{rd} bleibt jedoch aufrecht.

6.4.3 DECKENSTÄRKE 20CM

| Bezeichnung | b_{schl} [mm] | h_{schl} [mm] | Schlaufen [Stk.] | Schub- elemente [Stk.] | Druck- elemente [Stk.] | V_{rd} [kN] | m_{rd} [kNm] | R_{eq} [m²K/W] |
|----------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| AVI - HLE20/5 | 5,0 | 25,0 | 5 | 3 | 2 | 51,7 | 56,6 | 1,05 |
| AVI - HLE20/6 | 5,0 | 25,0 | 6 | 3 | 3 | 51,7 | 62,5 | 0,99 |
| AVI - HLE20/6v | 5,0 | 25,0 | 6 | 4 | 2 | 68,9 | 60,6 | 0,90 |
| AVI - HLE20/7 | 5,0 | 25,0 | 7 | 3 | 4 | 51,7 | 67,1 | 0,94 |
| AVI - HLE20/7v | 5,0 | 25,0 | 7 | 4 | 3 | 68,9 | 66,0 | 0,86 |
| AVI - HLE20/8 | 5,0 | 25,0 | 8 | 4 | 4 | 68,9 | 71,2 | 0,81 |
| AVI - HLE20/8v | 5,0 | 25,0 | 8 | 6 | 2 | 103,3 | 67,2 | 0,70 |

Tab.6-12: Abstufung DS20 - Variation 2

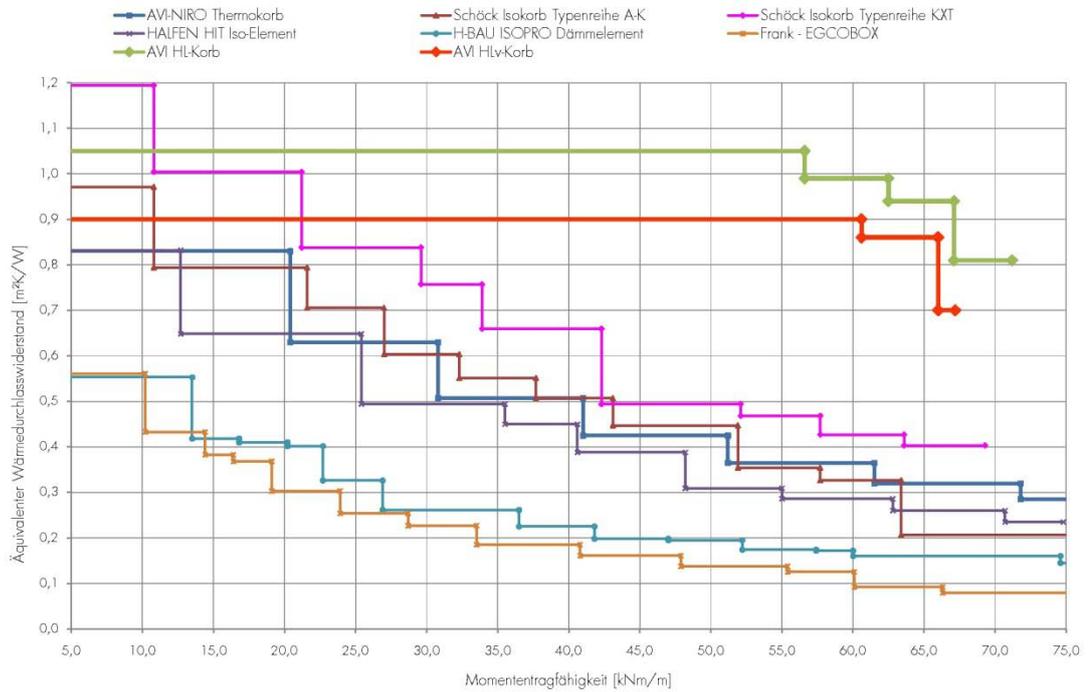
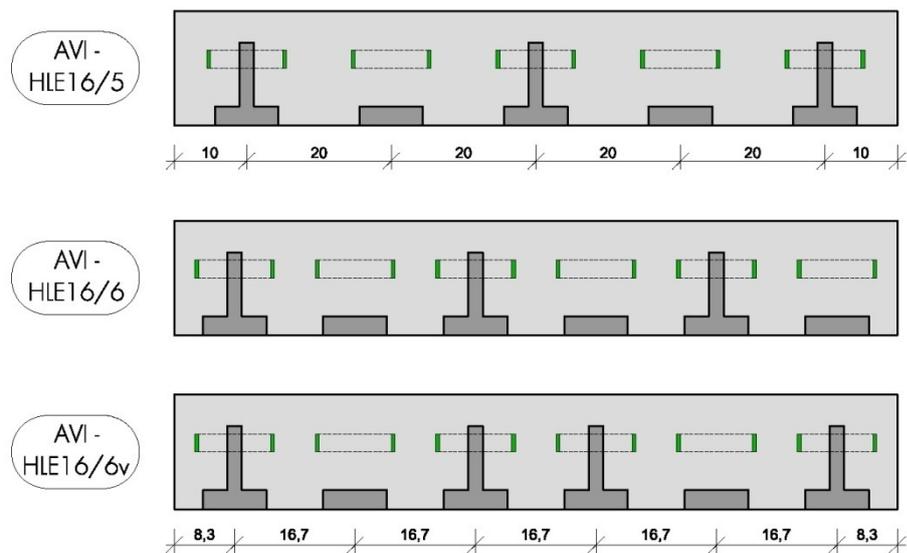


Abb.6-27: Abstufung DS20 - Variation 2

Die Betrachtung der Deckenstärke von 20 [cm] führt zu den gleichen Erkenntnissen wie zuvor schon festgestellt.

6.4.4 GRAFISCHE DARSTELLUNG SYSTEMAUFBAU

Um den Aufbau der zuvor berechneten und dokumentierten möglichen Systeme auch grafisch darzustellen, dient folgende Abbildung:



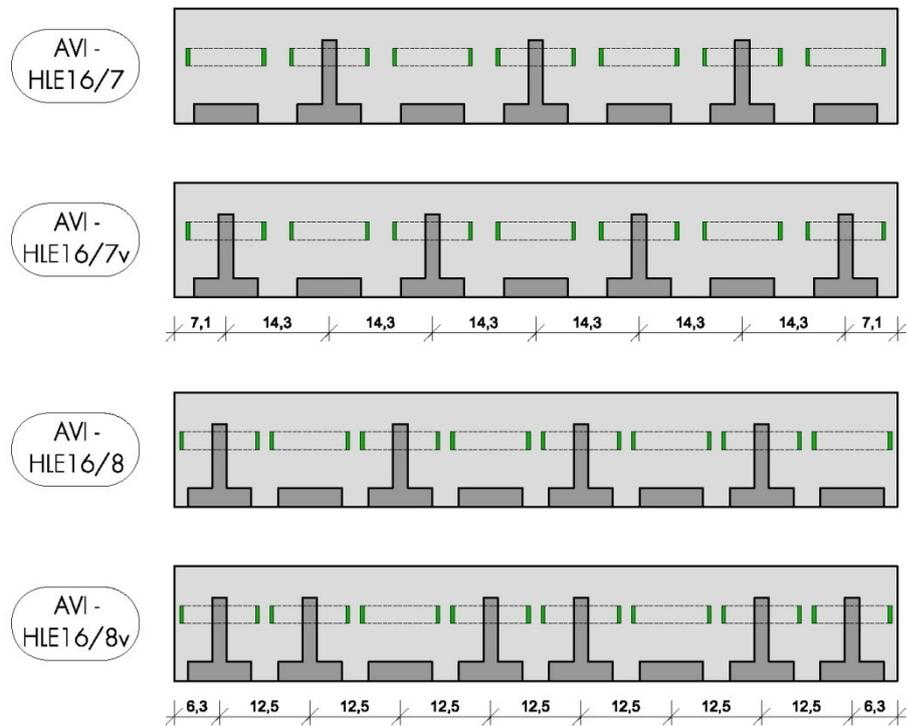


Abb.6-28: Grafische Darstellung Systemaufbauten (VAR1-3)

6.4.5 SYSTEMAUFBAU OHNE REINE DRUCKELEMENTE

Da der gemeinsame Einsatz von Druck- und Druck-/Schubelementen statisch, wirtschaftlich und herstellungsbedingt Probleme aufwirft, wird im Folgenden eine weitere mögliche Variante aufgezeigt, in der ausschließlich kombinierte Druck-/Schubelemente Verwendung finden.

| Bezeichnung | b_{schl} | h_{schl} | Schlaufen | Schub- elemente | Druck- elemente | v_{rd} | m_{rd} | R_{eq} |
|----------------|------------|------------|-----------|--------------------|--------------------|----------|----------|----------------------|
| | [mm] | [mm] | [Stk.] | [Stk.] | [Stk.] | [kN] | [kNm] | [m ² K/W] |
| AVI - HLE16/S4 | 5,0 | 25,0 | 5 | 4 | 0 | 46,4 | 29,9 | 0,87 |
| AVI - HLE16/S5 | 5,0 | 25,0 | 5 | 5 | 0 | 58,0 | 35,4 | 0,74 |
| AVI - HLE16/S6 | 5,0 | 25,0 | 6 | 6 | 0 | 69,6 | 38,1 | 0,65 |
| AVI - HLE16/S7 | 5,0 | 25,0 | 7 | 7 | 0 | 81,2 | 40,5 | 0,57 |
| AVI - HLE16/S8 | 5,0 | 25,0 | 8 | 8 | 0 | 92,8 | 42,6 | 0,51 |

Tab.6-13: Abstufung DS16 - Variation 4

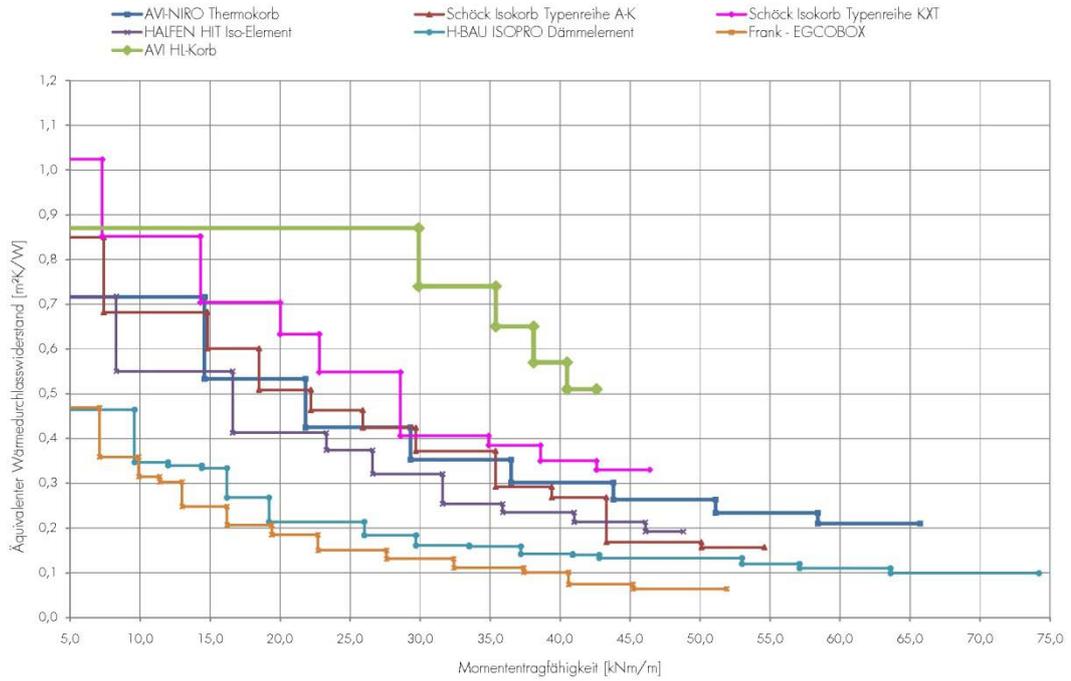
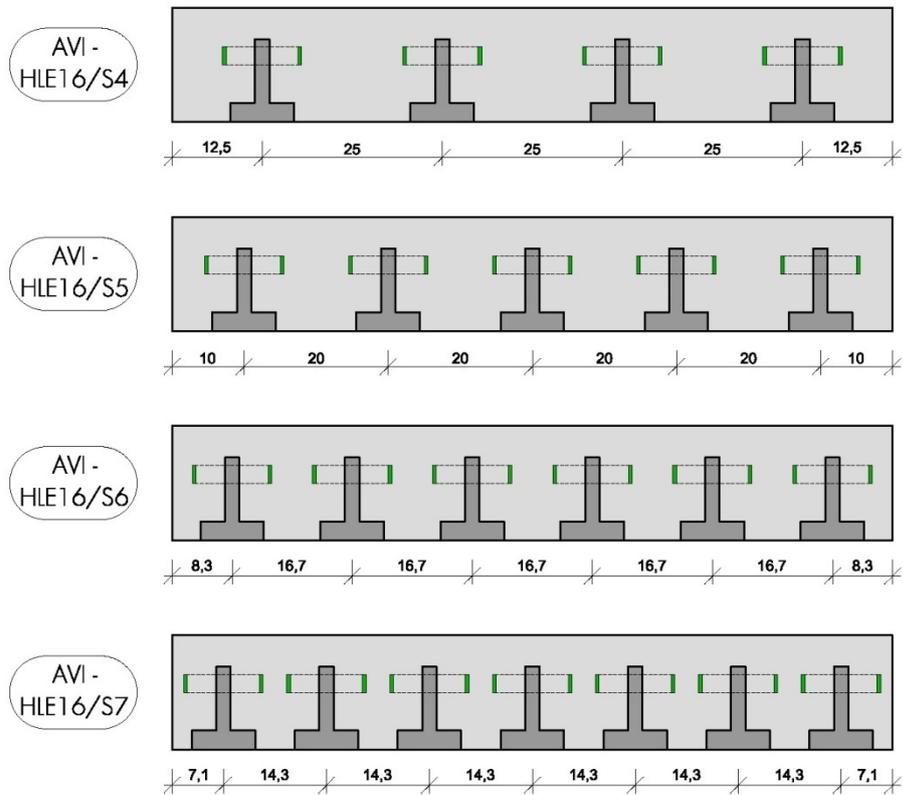


Abb.6-29: Abstufung DS16 - Variation 4



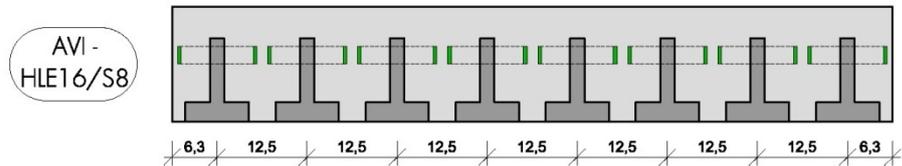


Abb.6-30: Grafische Darstellung Systemaufbauten (VAR4)

6.4.6 VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN SYSTEMAUFBAUTEN

Vergleicht man die Dämmleistung von Variante 2 und 4 direkt miteinander, kann festgestellt werden, dass der alleinige Einsatz der Druck-/Schubelemente die Wärmedämmleistung des Aufbaues um 20-30 [%] verringert.

| Anzahl Elemente | R_{eq} HL-Korb Variante 2 [m ² K/W] | Dämmwert von HL-Korb [%] | R_{eq} HLv-Korb Variante 2 [m ² K/W] | Dämmwert von HL-Korb [%] | R_{eq} HL-S-Korb Variante 2 [m ² K/W] | Dämmwert von HL-Korb [%] |
|-----------------|---|--------------------------|--|--------------------------|---|--------------------------|
| 4 | – | – | – | – | 0,87 | – |
| 5 | 0,91 | 100% | – | – | 0,74 | 81% |
| 6 | 0,85 | 100% | 0,77 | 91% | 0,65 | 76% |
| 7 | 0,80 | 100% | 0,73 | 91% | 0,57 | 71% |
| 8 | 0,69 | 100% | 0,59 | 85% | 0,51 | 73% |

Tab.6-14: Vergleich verschiedener Abstufungen DS16

6.5 ZUSAMMENFASSUNG - SCHLUSSFOLGERUNGEN

- A) Die ausgewerteten Versuchsaufbauten zeigen klar die Überlegenheit des neuen AVI-HL-Thermoelementes in Bezug auf Tragfähigkeit und Wärmedämmvermögen. Verglichen mit Konkurrenzsystemen bzw. dem vorhandenen Thermokorb kann eine Steigerung der Dämmleistung um bis zu 100 [%] zu vergleichbaren Systemen am Markt erwartet werden.
- B) Einer der entscheidendsten Punkte des Systems stellt die Einleitung der Schlaufenkräfte in den Normalbeton dar. Das Verhalten der FKV-Schlaufen in Beton ist noch versuchstechnisch abzudecken, um einerseits eine Kraft-Verformungsbeziehung zu definieren und andererseits die Umschnürungswirkung des Betons näher zu betrachten. Eine Schlaufenhöhe kleiner 2,0 [cm] erscheint aus Sicht dieser Auswertungen als nicht sinnvoll.

- C) Als etwas problematisch stellt sich der Systemaufbau dar, da eine Mindestanzahl von Schubelementen pro Meterstreifen nötig ist, um die Querkräfte in das Auflager zu übertragen. Hierbei wäre eine kleinere Anzahl von Elementen denkbar, jedoch sinkt dabei auch die Neigung der druckeinleitenden Betonstreben – dies würde eine nicht materialgerechte Konstruktion für den Betonbau darstellen. Die Konzipierung eines Versuchsaufbaus würde Gewissheit verschaffen.
- D) Die Halbierung des Wärmeleitwertes im Schlaufenquerschnitt hat (vom Standpunkt der Ausführung in GFK) wenig Sinn, da lediglich eine Steigerung von rund 4-6 [%] erreicht wird.
- E) Wirtschaftlich gesehen ist es durchaus denkbar die Abstufung der verschiedenen Aufbauten zu reduzieren. Dies kann auch mit dem hohen Dämmwert des Systems begründet werden. Hierbei könnte die große Anzahl der Einzelteile drastisch reduziert werden. Die Fertigung des Korbes in Modulen, wie in [1] geplant, ist gegeben.

7 AUSBLICK

7.1 ZUSAMMENFASSUNG

- A) Die durchgeführten Vorversuche (Versuch 1 und 2) an CFK-Schlaufen führten aufgrund herstellungsbedingter Mängel nicht zu den erwarteten Ergebnissen. Lediglich zwei Versuchskörper, an denen das charakteristische Versagensbild der Zerfaserung der einzelnen Kohlefaserstränge auftrat, erreichen ansatzweise die errechneten Werte, wobei der erwünschte E-Modul durchgängig gegeben war. Aufgrund der aufgetretenen Fertigungsmängel wird auf die Berechnung von Streuung und Mittelwert der Versuchsreihe verzichtet. Weiters führten die überraschenden Versuchsergebnisse zu Überlegungen bezüglich der Wahl von CFK als Schlaufenmaterial. Im Zuge der Arbeit wurden mehrere Faserverbunde anhand eines erstellten Anforderungsprofils miteinander verglichen. Aus Gründen der schlechten Wärmeleitung und des „gutmütigeren“ Versagensbildes fiel die Wahl auf glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK).
- B) Im Versuchsaufbau 3 dieser Arbeit wurde die Belastbarkeit der konzipierten Druckelemente aus UHPC getestet. Das Versagen trat wie erwartet im Mittelquerschnitt des UHPC-Elementes auf und das Tragverhalten kann bis zum Bruch als quasi linear bezeichnet werden. Die Streuung der maximal erreichten Druckkräfte war gering. Des Weiteren trat ein gutes Verbundverhalten des UHPC zum Normalbeton auf.
- C) Die in Berechnungsbeispielen ausgewerteten Versuchsaufbauten zeigen deutlich die Vorteile des neuen AVI-HL-Thermoelementes in Hinblick auf Tragfähigkeit und Wärmedämmvermögen. Verglichen mit Konkurrenzsystemen bzw. dem vorhandenen Thermokorb kann eine Steigerung der Dämmleistung von bis zu 100 [%] zu vergleichbaren Systemen am Markt erwartet werden (siehe Abbildung 7-1). Die rote, blaue und grüne Abstufung stellen die ausgearbeiteten Lösungen dar.

Die mögliche Halbierung des Wärmeleitwertes durch die Wahl eines geeigneten FKV-Materials im Schlaufenquerschnitt hat (vom Standpunkt der Ausführung in GFK) wenig Sinn, da lediglich eine Steigerung von rund 4-6 [%] erreicht wird. Wirtschaftlich gesehen ist es durchaus denkbar, die Abstufung der verschiedenen Aufbauten zu reduzieren. Dies kann auch mit dem hohen Dämmwert des Systems begründet werden. Hierbei könnte die große Anzahl der Einzelteile drastisch

reduziert werden. Beispielsweise könnte ein Korbsystem ohne reine Druckelemente ausgeführt werden (siehe grüne Abstufung in Abbildung 7-1). Die Fertigung des Korbes in Modulen, wie in [1] geplant, ist gegeben.

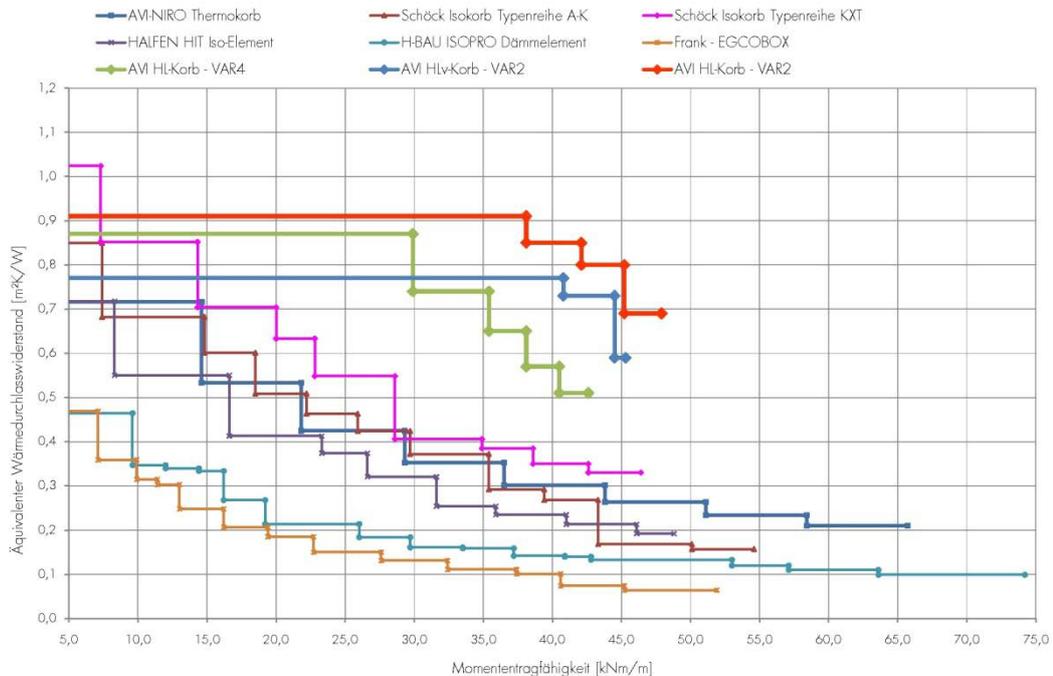


Abb.7-1: Vergleich möglicher Abstufungen DS16

7.2 WEITERE SCHRITTE

- A) Durchführung von Vorversuchen (ident zu Versuch 1) an den in Auftrag gegebenen GFK-Schlaufen.
- B) Bei gleichmäßiger Auslastung der Versuchskörper ist der Mittelwert zu errechnen bzw. eine statistische Auswertung zu erstellen mit dem Ziel, einen geeigneten Sicherheitsbeiwert zu generieren.
- C) Unter Voraussetzung des Erfolges dieser Vorversuche ist der Zugversuch mit einbetonierten Schlaufen geplant. Nach Abschluss dieses Versuches sind alle Voraussetzungen für einen Bauteilversuch gegeben.
- D) Neukonzipierung und Durchführung des Bauteilversuches aufgrund der Erkenntnisse aus den Punkten A) - C).
- E) Erstellung eines Bemessungsprogrammes und einer geeigneten Tragfähigkeitsabstufung für das marktaugliche Produkt: AVI-Hochleistungsthermoelement.

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] Prügger, Gernot: Studie über die Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen, TU Graz, 2009
- [2] Produktinformation SECAR Technologie GmbH – CFK, Datenblätter der Materialeigenschaften, Müzzzuschlag, [Stand: 27.08.2009]
- [3] Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer, 2007
- [4] ÖNORM EN 1992-1-1 „Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“, Ausgabe: 2005-11-01, Österreichisches Normungsinstitut
bzw. der dazugehörige nationale Anhang:
ÖNORM EN 1992-1-1 „Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau“, Ausgabe: 2007-02-01, Österreichisches Normungsinstitut
- [5] König, Tue, Schenck: Grundlagen des Stahlbetonbaus – Einführung in die Bemessung nach DIN 1045-1, 3. Auflage, Vieweg+Teubner, 2008
- [6] Zilch, Zehetmaier: Bemessung im konstruktiven Betonbau (nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1), Springer, 2006
- [7] ÖNORM EN 1990 „Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung“, Ausgabe: 2003-03-01, Österreichisches Normungsinstitut
- [8] Firmenprofil der 4a engineering GmbH:
<http://www.4a.co.at/index.php?id=30> [Stand: 08.03.2011]
- [9] <http://www.unikassel.de/fb14/stahlbau/steelstruc/downloads/Plastische%20Grenzlast%202.pdf> [Stand: 13.03.2011]
- [10] Untersuchungsbericht Fa. 4a – Ergebnispräsentation vom 17.03.2011
- [11] Owens-Corning Fiberglass: Datenblatt zur HOLLEX™ Fiber, 1993

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abb.1-1: Geplanter Versuchsaufbau: Zugelement | 2 |
| Abb.1-2: Geplanter Versuchsaufbau: Druckelement..... | 3 |
| Abb.2-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm: Material C02 [1 bzw. 2] | 4 |
| Abb.2-2: Geometrie der Versuchskörper | 5 |
| Abb.2-3: Repräsentative Darstellung der Fehlstellen (Falte) | 6 |
| Abb.2-4: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S1_1 | 6 |
| Abb.2-5: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S1_2 | 7 |
| Abb.2-6: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S1_3 | 7 |
| Abb.2-7: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S2_1 | 8 |
| Abb.2-8: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S2_2 | 8 |
| Abb.2-9: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S2_3 | 9 |
| Abb.2-10: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S3_1 | 9 |
| Abb.2-11: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S3_2 | 10 |
| Abb.2-12: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S3_3 | 10 |
| Abb.2-13: Versuchsaufbau Zugversuch CFK-Schlaufe (Grundriss) | 11 |
| Abb.2-14: Versuchsaufbau Zugversuch CFK-Schlaufe (Foto) | 12 |
| Abb.2-15: Querpressung im Bereich der Kraftumlenkung [1]..... | 12 |
| Abb.2-16: Spannungsverläufe in einer zugbelasteten Parallelschlaufe [3] | 14 |
| Abb.2-17: Tangentialspannungsverlauf für Versuchsreihe S1 | 15 |
| Abb.2-18: Vergleich verschiedener Schlaufenbreiten in Bezug auf Bruchlastabweichung | 16 |
| Abb.2-19: Effekt eines auftretenden Biegemoments unter Lastdehnung..... | 16 |
| Abb.2-20: Ergebnisse Versuchsreihe S1 (grafisch) | 17 |
| Abb.2-21: Bruch an einer Falte (exemplarisch) | 18 |
| Abb.2-22: Ergebnisse Versuchsreihe S2 (grafisch) | 18 |
| Abb.2-23: Versagensbild Versuchskörper S2_1 | 19 |
| Abb.2-24: Ergebnisse Versuchsreihe S3 (grafisch) | 20 |
| Abb.3-1: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S4_1 | 22 |
| Abb.3-2: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S4_2 | 23 |
| Abb.3-3: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S4_3 | 23 |

| | |
|---|----|
| Abb.3-4: Geometrie/Fehlstellen: Schlaufe S4_4 | 24 |
| Abb.3-5: Ergebnisse Versuchsreihe S4 (grafisch) | 24 |
| Abb.3-6: Versagensbild Versuchskörper S4_1 | 25 |
| Abb.4-1: Unterschiedliche Faserdurchmesser [3] | 28 |
| Abb.4-2: Festigkeitseigenschaften bei Temperatureinwirkung [1 1]..... | 32 |
| Abb.4-3: Werkzeug zur Prototypherstellung (Skizze) [3]..... | 33 |
| Abb.5-1: Ergebnis Betonage C2..... | 37 |
| Abb.5-2: Herstellung der Schalung der Druckelemente..... | 39 |
| Abb.5-3: Abmessung Versuchskörper V3 | 39 |
| Abb.5-4: Versuchskörper V3 vor Normalbetonfüllung..... | 40 |
| Abb.5-5: Versuchsaufbau V3..... | 41 |
| Abb.5-6: Fachwerkmodell Lasteinleitung V3..... | 42 |
| Abb.5-7: Teilflächenpressung Lasteinleitung V3 | 43 |
| Abb.5-8: Modell im Berechnungsprogramm Atena..... | 44 |
| Abb.5-9: Querschnitt Hauptspannungsrichtungen Atena..... | 44 |
| Abb.5-10: Kraft-Weg-Diagramm der Versuchskörper D4-D9 | 46 |
| Abb.5-11: Exemplarische Darstellung Versagensbild Druckelement..... | 48 |
| Abb.6-1: Aufbau des Schubelementes..... | 49 |
| Abb.6-2: Einbettung des Schubelementes in Normalbeton..... | 49 |
| Abb.6-3: Systemübersicht (Eingabedatei) | 50 |
| Abb.6-4: Bsp1: Dehnungen im Mittelquerschnitt des Schubelementes | 52 |
| Abb.6-5: Bsp1: Spannungen im Mittelquerschnitt des Schubelementes..... | 53 |
| Abb.6-6: Schnittführung zu Diagramm 6-4 und 6-5 | 53 |
| Abb.6-7: Bsp1: Spannungen im Einleitungsbereich des Druckelementes | 54 |
| Abb.6-8: Bsp2: Dehnungen im Mittelquerschnitt des Schubelementes | 55 |
| Abb.6-9: Bsp2: Spannungen im Mittelquerschnitt des Schubelementes..... | 55 |
| Abb.6-10: Bsp2: Spannungen im Einleitungsbereich des Druckelementes | 56 |
| Abb.6-11: Bsp2: Verformte Figur – Darstellung Schlaufe und Anschlussbewehrung | 57 |
| Abb.6-12: Bsp2: Verformte Figur – Darstellung Risse im Beton..... | 57 |
| Abb.6-13: Ausgangssituation für Eingabe in das Berechnungsprogramm..... | 59 |
| Abb.6-14: Übersicht Fachwerkmodell Übergangsbereich | 60 |

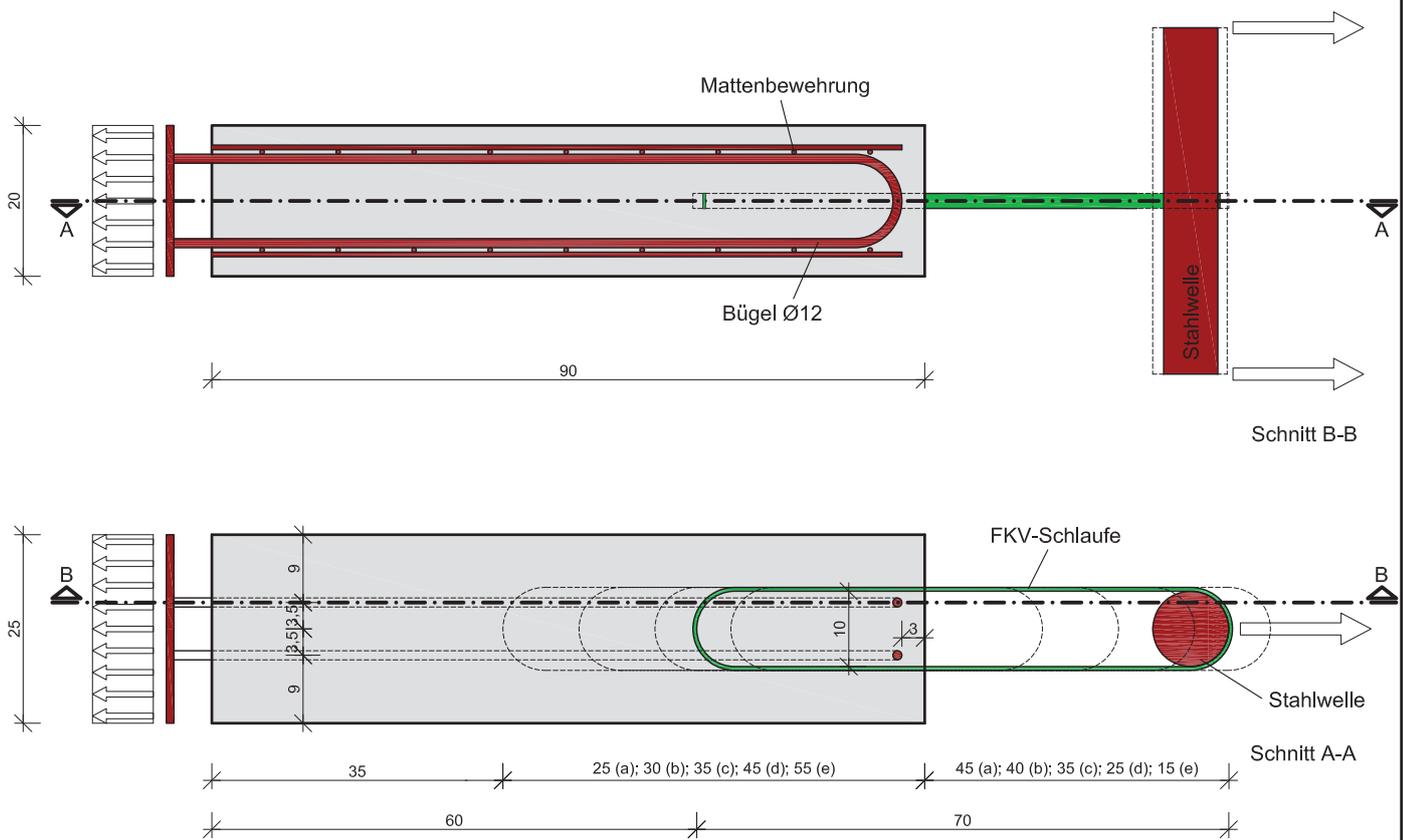
| | |
|--|----|
| Abb.6-15: Flächendarstellung Teilflächenpressung Druckzone | 64 |
| Abb.6-16: Flächendarstellung Teilflächenpressung Übergabe Schlaufenkraft | 65 |
| Abb.6-17: Flächendarstellung Schubelement | 65 |
| Abb.6-18: Verformungsverhalten des HL-Korbes (konzeptionell aus [1]) | 66 |
| Abb.6-19: Hauptspannungsrichtungen Laststep 10, Deckenstärke 16 [cm] | 70 |
| Abb.6-20: Hauptspannungsrichtungen Laststep 10, Deckenstärke 22 [cm] | 71 |
| Abb.6-21: Bsp1: Vergleich der Spannungen im CFK (FEM/FWM) | 72 |
| Abb.6-22: Lasteinleitungsbereich Druckelement | 73 |
| Abb.6-23: Bsp2: Vergleich der Spannungen im CFK (FEM/FWM) | 74 |
| Abb.6-24: Abstufung DS16 - Variation 1 | 77 |
| Abb.6-25: Abstufung DS16 - Variation 2 | 78 |
| Abb.6-26: Abstufung DS18 - Variation 2 | 80 |
| Abb.6-27: Abstufung DS20 - Variation 2 | 81 |
| Abb.6-28: Grafische Darstellung Systemaufbauten (VAR1-3) | 82 |
| Abb.6-29: Abstufung DS16 - Variation 4 | 83 |
| Abb.6-30: Grafische Darstellung Systemaufbauten (VAR4) | 84 |
| Abb.7-1: Vergleich möglicher Abstufungen DS16 | 87 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Tab.2-1: Festigkeitseigenschaften: Material C02 [1 bzw. 2] | 4 |
| Tab.2-2: Sollwerte der Schlaufenreihen S1-S3 | 5 |
| Tab.2-3: Sollwerte für Bruchlast und Querdruck der Schlaufenreihen S1-S3 | 13 |
| Tab.2-4: Vergleich verschiedener Schlaufenbreiten in Bezug auf Bruchlastabweichung | 15 |
| Tab.2-5: Ergebnisse Versuchsreihe S1 (tabellarisch) | 17 |
| Tab.2-6: Ergebnisse Versuchsreihe S2 (tabellarisch) | 19 |
| Tab.2-7: Ergebnisse Versuchsreihe S3 (tabellarisch) | 20 |
| Tab.3-1: Sollwert der Schlaufenreihe S4 | 22 |
| Tab.3-2: Ergebnisse Versuchsreihe S4 (tabellarisch) | 25 |
| Tab.4-1: Anforderungsprofil..... | 27 |
| Tab.4-2: Eigenschaften Glasfaser [3] | 28 |
| Tab.4-3: Kennfeld E-GFK [10] | 29 |
| Tab.4-4: Kennfeld S-GFK [10] | 29 |
| Tab.4-5: Eigenschaften Kohlefaser [3] | 30 |
| Tab.4-6: Kennfeld S-GFK [10] | 30 |
| Tab.4-7: Eigenschaften Basaltfaser [3] | 31 |
| Tab.4-8: Eigenschaften Aramidfaser [3]..... | 31 |
| Tab.4-9: Vergleich möglicher Faserverbunde [10] | 32 |
| Tab.5-1: Versuchsbetonagen UHPC..... | 36 |
| Tab.5-2: Rezeptur Feinkorn-UHPC (TU Graz)..... | 38 |
| Tab.5-3: Rezeptur C20/25 (TVFA TU Graz) | 38 |
| Tab.5-4: Versuchsbetonagen Normalbeton | 38 |
| Tab.5-5: Betondruckversuch Normalbetonwürfel C6..... | 45 |
| Tab.5-6: Betondruckversuch UHPC C4 und C5 | 45 |
| Tab.5-7: Ergebnisse Druckversuch V3..... | 46 |
| Tab.5-8: Verdrehung der Lasteinleitungsflächen | 48 |
| Tab.6-1: Eingangswerte Berechnungsbeispiel 1 | 51 |
| Tab.6-2: Berechnungsergebnisse Beispiel 1 | 52 |
| Tab.6-3: Berechnungsergebnisse Beispiel 2..... | 56 |

| | |
|---|----|
| Tab.6-4: Vergleich unterschiedlicher Fachwerkmodelle..... | 69 |
| Tab.6-5: Fixierte Eingangswerte | 75 |
| Tab.6-6: Variante1: Eingangswerte FKV-Material..... | 76 |
| Tab.6-7: Abstufung DS16 - Variation 1..... | 76 |
| Tab.6-8: Abstufung DS16 - Variation 2..... | 77 |
| Tab.6-9: Variante3: Eingangswerte FKV-Material..... | 78 |
| Tab.6-10: Abstufung DS16 - Variation 3..... | 79 |
| Tab.6-11: Abstufung DS18 - Variation 2..... | 79 |
| Tab.6-12: Abstufung DS20 - Variation 2..... | 80 |
| Tab.6-13: Abstufung DS16 - Variation 4..... | 82 |
| Tab.6-14: Vergleich verschiedener Abstufungen DS16 | 84 |

PLANANHANG



Versuchsaufbau I/a

Anzahl der Versuchskörper: 3 Stk.
 Betonmenge (Normalbeton): ca. 0,045 m³/Stk.
 Einbindelänge Schlaufe: 25 cm

Versuchsaufbau I/d

Anzahl der Versuchskörper: 3 Stk.
 Betonmenge (Normalbeton): ca. 0,045 m³/Stk.
 Einbindelänge Schlaufe: 45 cm

Versuchsaufbau I/b

Anzahl der Versuchskörper: 3 Stk.
 Betonmenge (Normalbeton): ca. 0,045 m³/Stk.
 Einbindelänge Schlaufe: 30 cm

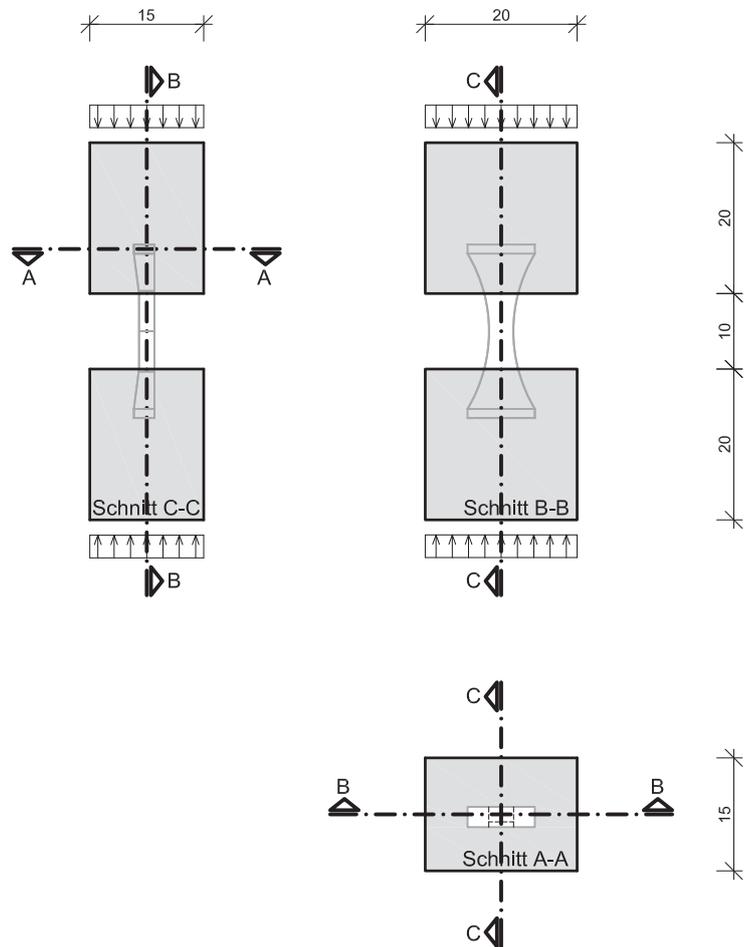
Versuchsaufbau I/e

Anzahl der Versuchskörper: 3 Stk.
 Betonmenge (Normalbeton): ca. 0,045 m³/Stk.
 Einbindelänge Schlaufe: 55 cm

Versuchsaufbau I/c

Anzahl der Versuchskörper: 3 Stk.
 Betonmenge (Normalbeton): ca. 0,045 m³/Stk.
 Einbindelänge Schlaufe: 35 cm

| | | | | | |
|---|---------------|---|------------|---------|------|
| MASTERARBEIT | | PLANINHALT | | | |
| Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen - VERSUCHE | | Versuchsaufbau I - Variante 2 (insg. 15 Versuchskörper) | | | |
| GEZEICHNET | Walter Sammer | DATUM | 28.05.2010 | MST | 1:10 |
| PLANNUMMER | 1a | INDEX | C | | |
| UHPC | Normalbeton | CFK | Stahl | Dämmung | |



Versuchsaufbau II (Variante)

Anzahl der Versuchskörper: 5 Stk.
 Betonmenge (Normalbeton): ca. 0,012 m³/Stk.
 Betonmenge (UHPC): 312 cm³/Stk.
 Masse Gesamtprobe: ca. 30,5 kg/Stk.

MASTERARBEIT

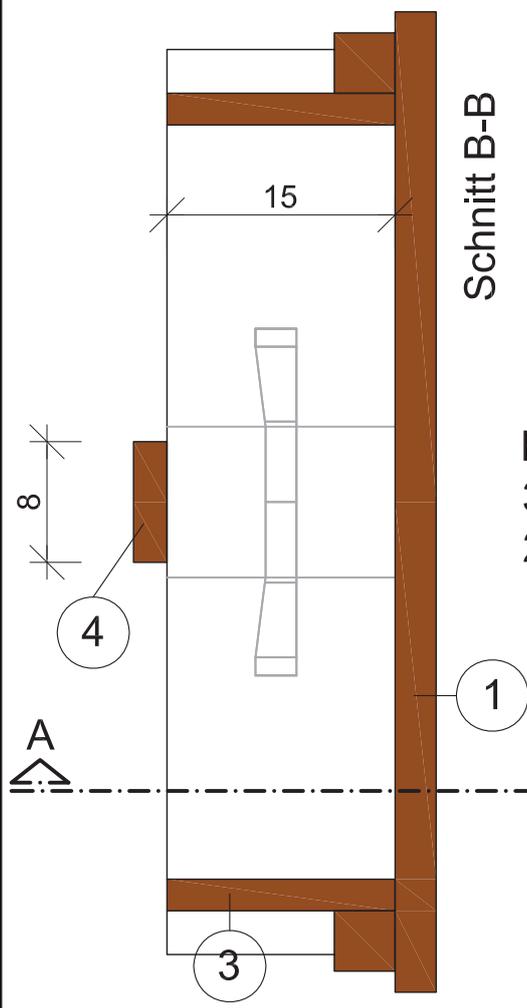
Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärme-dämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen - VERSUCHE

PLANINHALT

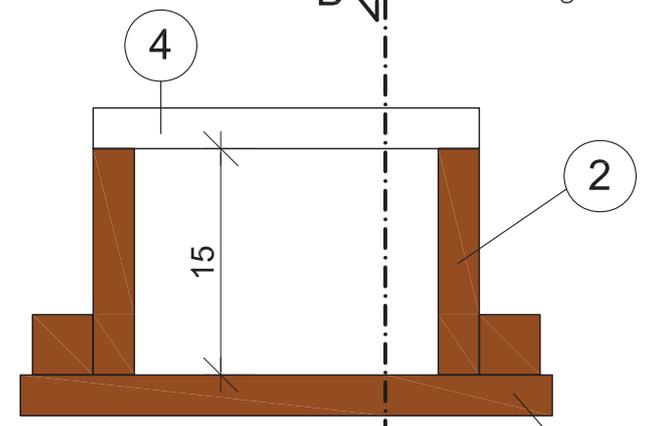
Versuchsaufbau II - UHPC Druckel.
 (insg. 5 Versuchskörper)

| | | | | |
|-----------------------------|---------------------|-------------|-----------------|------------|
| GEZEICHNET Walter Sammer | DATUM 07.02.2010 | MST 1:10 | PLANNUMMER 2 | INDEX D |
|-----------------------------|---------------------|-------------|-----------------|------------|

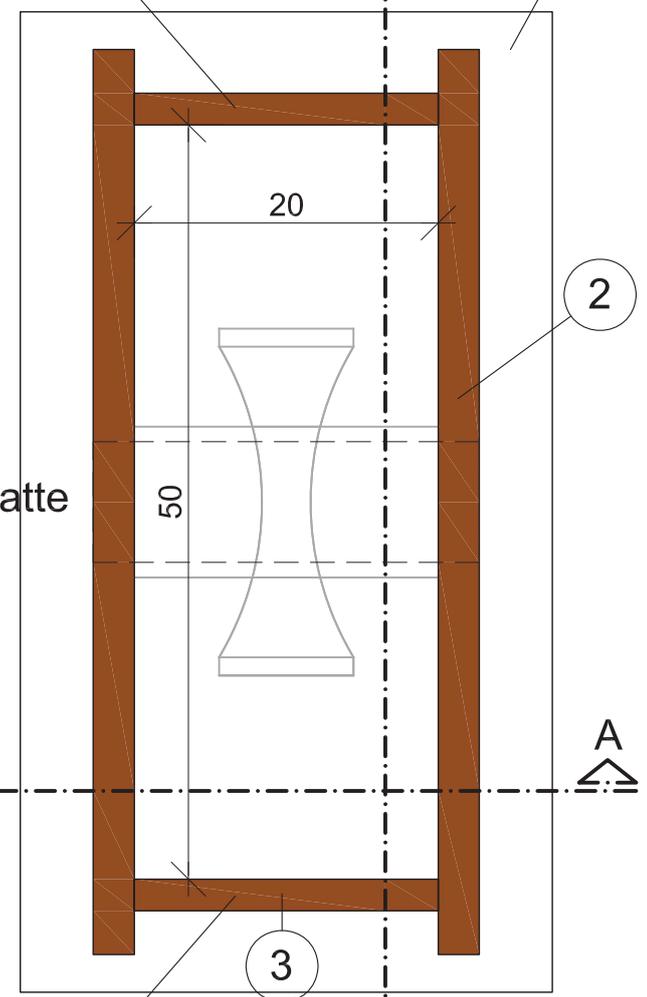
| | | | | |
|------|-------------|-----|-------|---------|
| UHPC | Normalbeton | CFK | Stahl | Dämmung |
|------|-------------|-----|-------|---------|



Rest:
3-Schicht Platte
27mm



Mehrschicht Platte
21mm



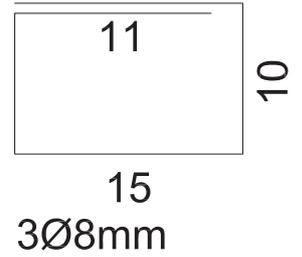
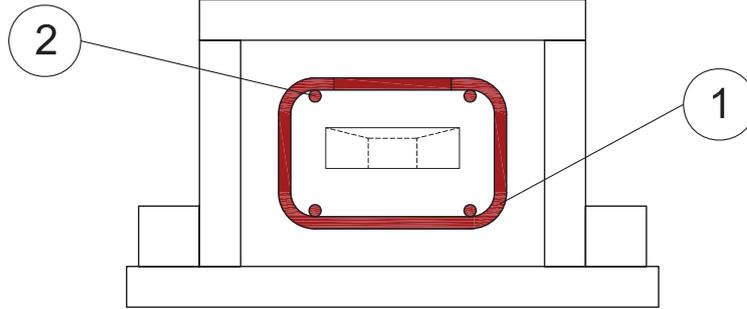
Maße in cm

| | | | | | |
|--|---------------------|---|----------------|------------|--|
| MASTERARBEIT | | PLANINHALT | | | |
| Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen - VERSUCHE | | Versuchsaufbau II - UHPC Druckel. SCHALPLAN | | | |
| GEZEICHNET Walter Sammer | DATUM 08.02.2010 | MST 1:5 | PLANNR. 2.1 | INDEX C | |
| UHPC | Normalbeton | CFK | Stahl | Dämmung | |

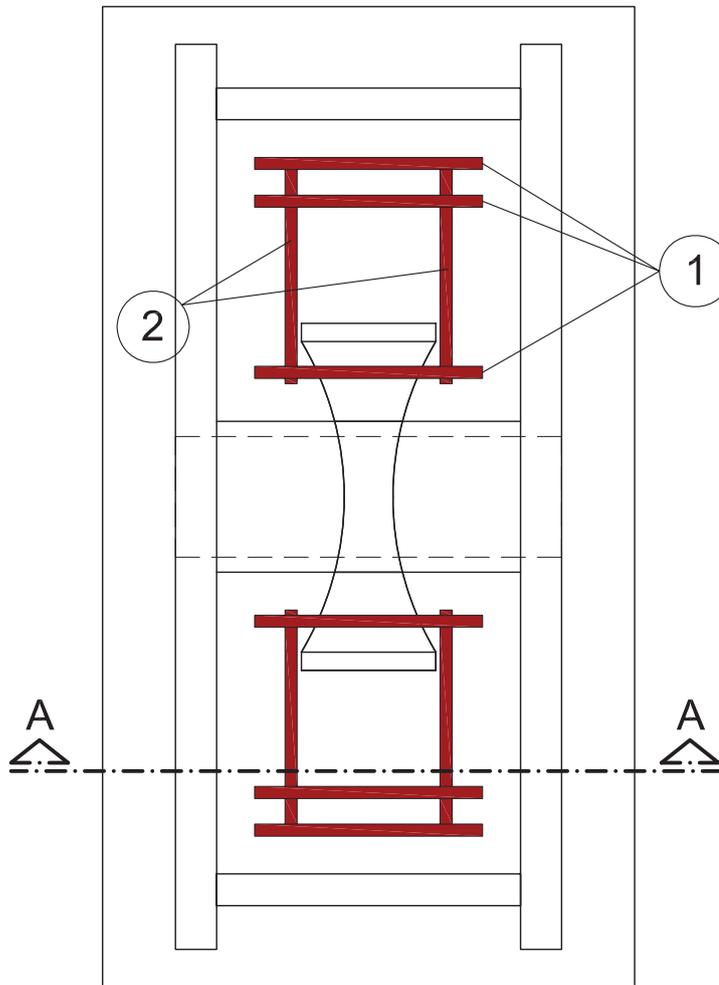
5 STÜCK

Plananhang 4

15
4Ø8mm



Schnitt A-A



| Stabliste - Bieformen | | | | |
|-----------------------|------|---|-------------|-----------|
| Pos. | Stk. | Ø | Einzellänge | Biegeform |
| 1 | 30 | 8 | 0,61 | |
| 2 | 40 | 8 | 0,15 | |

Maße in cm

MASTERARBEIT

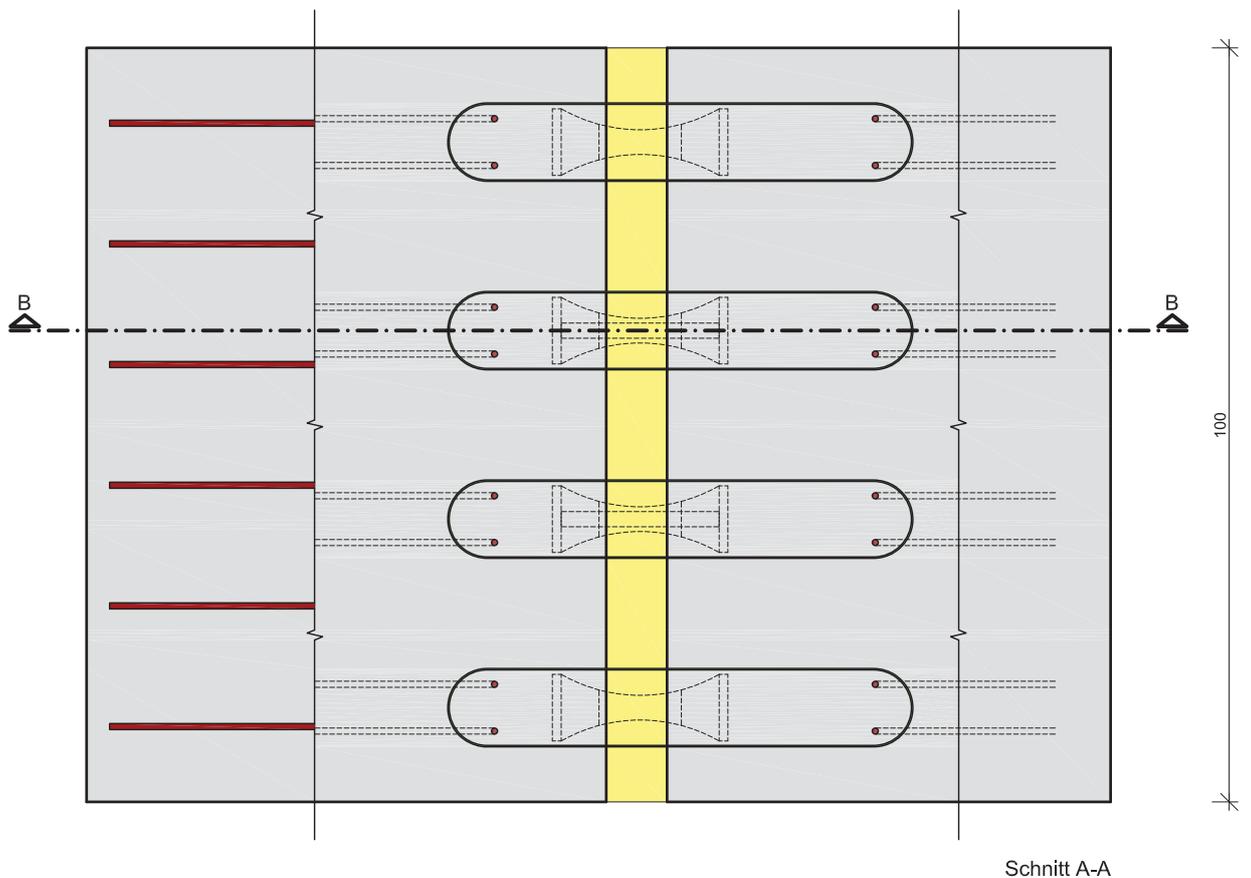
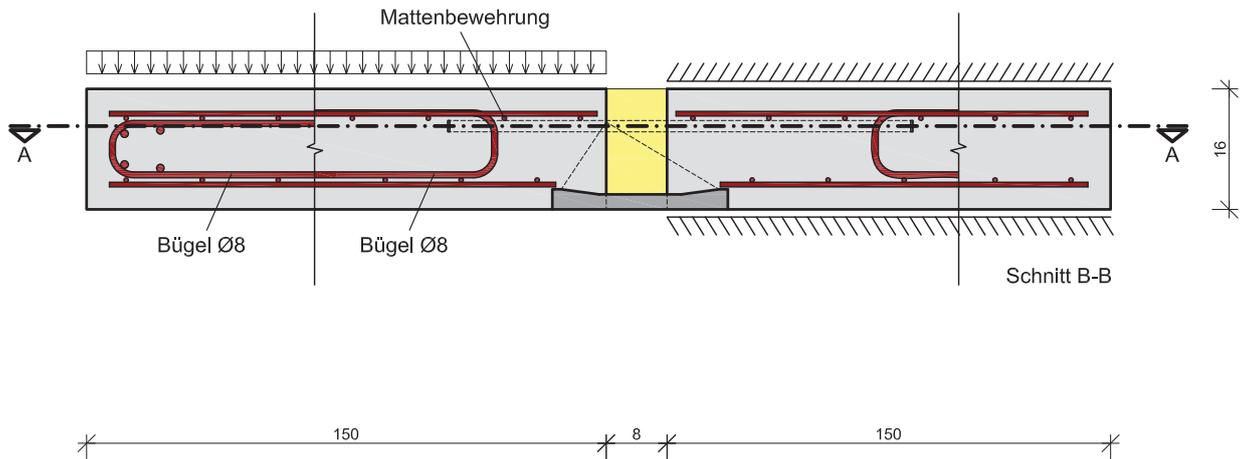
Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen - VERSUCHE

PLANINHALT

Versuchsaufbau II - UHPC Druckel.
Bewehrungsplan

GEZEICHNET: Walter Sammer | DATUM: 10.02.2010 | MST: 1:5 | PLANNR.: 2.2 | INDEX: A

| | | | | |
|------|-------------|-----|-------|---------|
| UHPC | Normalbeton | CFK | Stahl | Dämmung |
|------|-------------|-----|-------|---------|



Versuchsaufbau III

| | |
|----------------------------|--------------------------------|
| Anzahl der Versuchskörper: | 3 Stk. |
| Betonmenge (Normalbeton): | ca. 0,480 m ³ /Stk. |
| Betonmenge (UHPC): | 289 cm ³ /Stk. |
| Masse Gesamtprobe: | ca. 1200 kg/Stk. |

MASTERARBEIT

Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärme-dämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen - VERSUCHE

PLANINHALT

Versuchsaufbau III - Großversuch (insg. 3 Versuchskörper)

| | | | | |
|---------------|------------|------|------------|-------|
| GEZEICHNET | DATUM | MST | PLANNUMMER | INDEX |
| Walter Sammer | 18.05.2010 | 1:10 | 3 | A |

| | | | | |
|------|-------------|-----|-------|---------|
| UHPC | Normalbeton | CFK | Stahl | Dämmung |
|------|-------------|-----|-------|---------|

3 Stück:

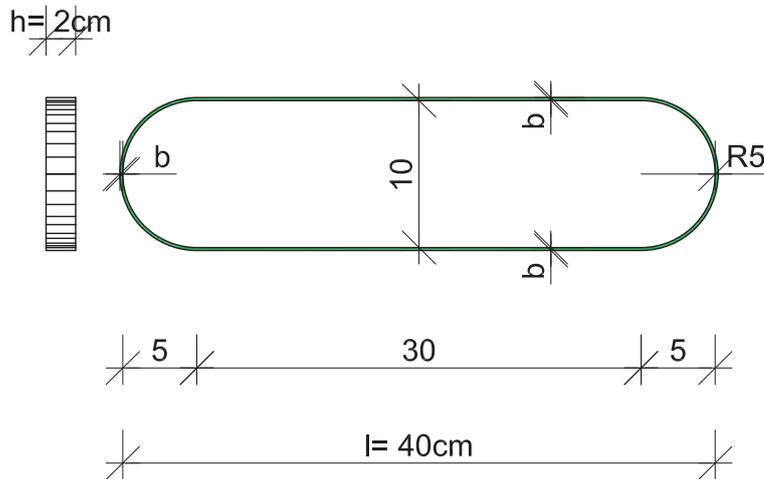
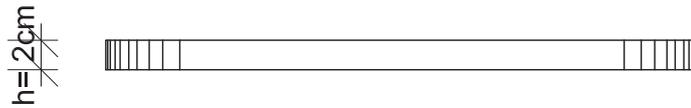
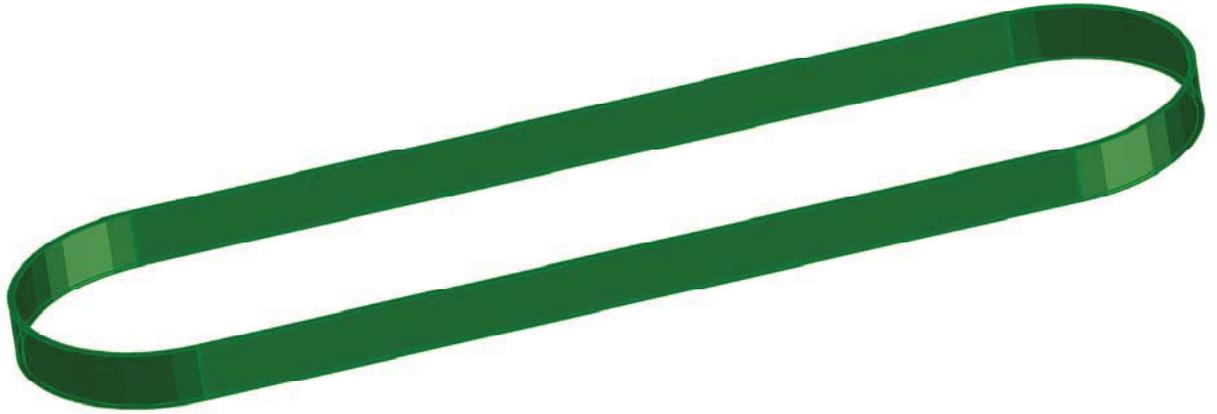
b= 2mm
h= 20mm
l= 400mm

3 Stück:

b= 2,5mm
h= 20mm
l= 400mm

3 Stück:

b= 3mm
h= 20mm
l= 400mm



Maße in cm

MASTERARBEIT

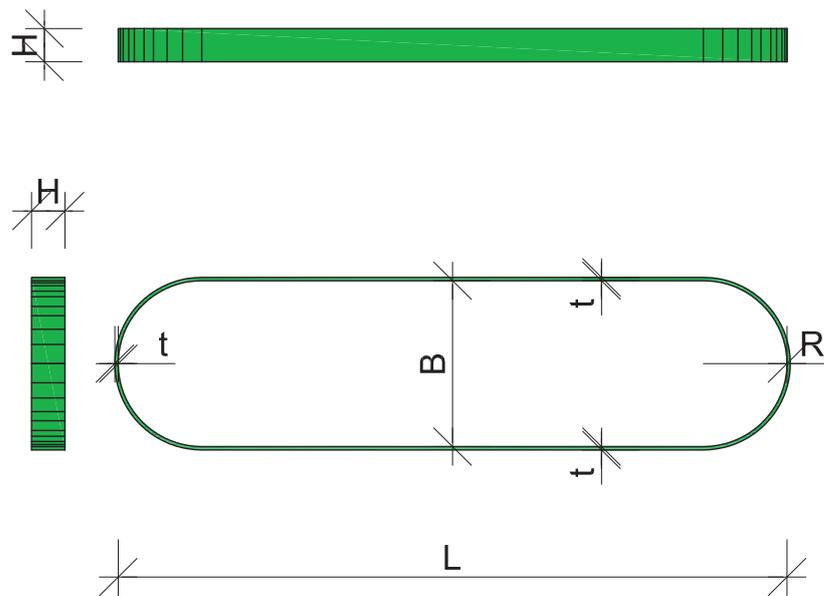
Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärme-dämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen - VERSUCHE

PLANINHALT

Schlaufengeometrie - Vorversuche
(insg. 9 Versuchskörper)

| | | | | |
|-----------------------------|---------------------|-----------|-----------------|------------|
| GEZEICHNET Walter Sammer | DATUM 05.08.2010 | MST -- | PLANNUMMER 6 | INDEX B |
|-----------------------------|---------------------|-----------|-----------------|------------|

| | | | | |
|------|-------------|-----|-------|---------|
| UHPC | Normalbeton | CFK | Stahl | Dämmung |
|------|-------------|-----|-------|---------|

**Anforderungsprofil:****-) Innenabmessungen:**

$L = 800\text{mm}$; $R = 50\text{mm}$; $B = 100\text{mm}$; $H = 20\text{mm} - \text{max. } 25\text{mm}$; $t = \text{var. (max. } 10\text{mm ?)}$

-) E-Modul des Faserverbundes:

rund 50000 MPa bzw. so groß wie möglich

-) gesicherte Bemessungslast/Schlaufe* (Bauteilfestigkeit):

min. 125 kN

-) Dehnsteifigkeit EA:

min. 15000 kN (größer von Vorteil)

-) minimale Schlaufenanzahl / grober Lieferzeitraum:

| | | |
|---------------------|--------------------|--------|
| 1) Vorversuche: | Beginn | 10Stk. |
| 2) Ausziehversuche: | 2 Wochen nach 1) | 15Stk. |
| 3) Großversuch: | 1-2 Monate nach 2) | 12Stk. |

*) $F_d = F_k / \gamma_m$ $\gamma_m =$ Sicherheitsbeiwert (von Streuung abhängig)
 $F_k =$ charakteristischer Wert (5%-Fraktilwert)
 $F_d =$ Bemessungswert

MASTERARBEIT

Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärme-dämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen - VERSUCHE

PLANINHALT

Anforderungsprofil und Geometrie Faserverbundschaufen

| | | | | |
|-----------------------------|---------------------|-----------|-----------------|------------|
| GEZEICHNET Walter Sammer | DATUM 10.02.2010 | MST -- | PLANNUMMER 7 | INDEX A |
|-----------------------------|---------------------|-----------|-----------------|------------|

UHPC

Normalbeton

Faserverbund

Stahl

Dämmung

ALLGEMEINER ANHANG

BEMESSUNG AVI-HOCHLEISTUNGSTHERMOELEMENT

| | | | |
|--|-----------------|------|----------------------|
| Zusätzliche ständige Einwirkung (zB.: Bodenaufbau) | g_{k1} | 1,50 | [kN/m ²] |
| Veränderliche Einwirkung - Leiteinwirkung (zB.: Nutzlast) | $q_{k,Leit}$ | 4,00 | [kN/m ²] |
| Veränderliche Einwirkung - Begleiteinwirkung (zB.: Schneelast) | $q_{k,Begleit}$ | 0,00 | [kN/m ²] |
| Randlast (Brüstung) | $g_{B,k}$ | 0,00 | [kN/m] |
| Lastfaktor (korr. für ULS-Lasten) | f | 1,00 | [-] |

| | | | |
|-------------------------|-------|--------|----------------------|
| Deckenstärke Kragplatte | h | 0,16 | [m] |
| Deckenbreite Kragplatte | b | 1,00 | [m] |
| Betonklasse | Beton | C25/30 | [N/mm ²] |

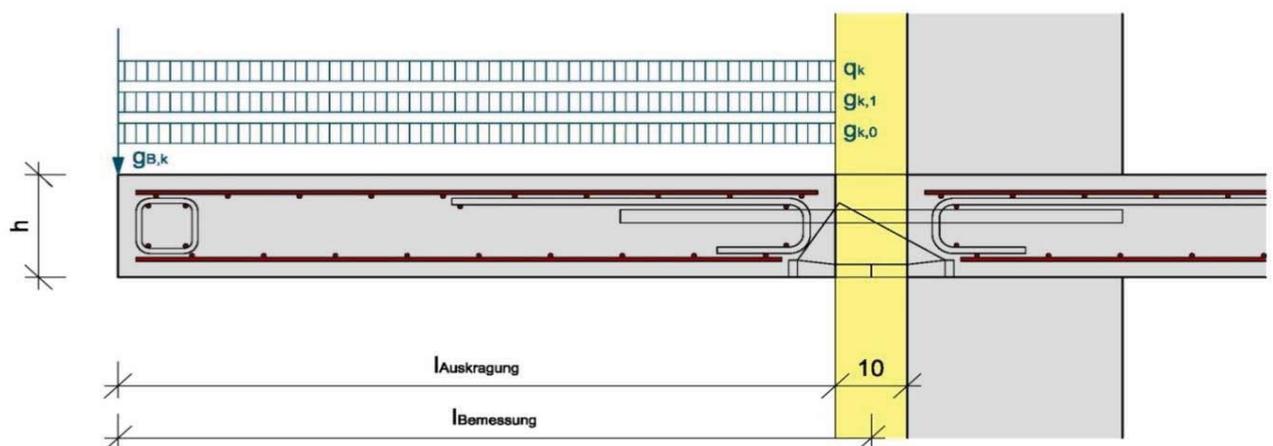
| Zugelement (Schlaufe) | | | |
|-----------------------|--------------|--------|----------------------|
| Material | | 6CFK | |
| Breite | b_{schl} | 2,0 | [mm] |
| Höhe | h_{schl} | 20,0 | [mm] |
| Schlaufenanzahl | | 4 | [Stk./b] |
| E-Modul | E | 126000 | [Mpa] |
| Festigkeit | $f_{yk,FKV}$ | 1560 | [N/mm ²] |
| WLeitung | λ | 17,0 | [W/mK] |

| Druck-/Schubelement | | | |
|----------------------|----------|-------|----------------------|
| Festigkeit | f_{ck} | 170 | [N/mm ²] |
| E-Modul | E | 50000 | [Mpa] |
| Anzahl Schubelemente | | 4 | [Stk./b] |
| Anzahl Druckelemente | | 0 | [Stk./b] |

| | | | |
|-----------|---------------|--------|-----|
| Hebelsarm | $z_{Element}$ | 0,0850 | [m] |
| D-Strebe | θ | 20,28 | [°] |

| | | | | | | |
|----------------------|------------|------|------------------|------|-----------------|------|
| Sicherheitsbeiwerte | γ_g | 1,35 | γ_{Beton} | 1,50 | γ_{UHPC} | 1,35 |
| | γ_q | 1,50 | γ_{Stahl} | 1,15 | γ_{FKV} | 2,00 |
| Kombinationsfaktoren | ψ_0 | 0,70 | ψ_1 | 0,50 | ψ_2 | 0,30 |

| | | | | | | |
|---------------------------|----------|-------|----------------------|------------|------|--------|
| Bemessungslast (ULS) | p_{sd} | 13,43 | [kN/m ²] | $g_{B,sd}$ | 0,00 | [kN/m] |
| Quasi-ständige Last (SLS) | p_2 | 6,70 | [kN/m ²] | $g_{B,2}$ | 0,00 | [kN/m] |



| | |
|---------|---|
| Legende | Eingabefelder |
| | Vordefinierte Felder |
| | Überschreitung des Grenzwertes der Biegeschlankheit (lt. EN1992-1-1:2004 - Formel 7.1.6a) |

| | |
|-------------|---|
| BER1 | Schnittgrößenermittlung Kragplatte |
|-------------|---|

| Erläuterungen: | | | |
|----------------|---|----------|--|
| Spalte A | Auskrängungslänge ab Dämmung Aussenkante | Spalte F | Erforderliche Stahlbewehrung im Einspannquerschnitt |
| Spalte B | Vorhandene Biegeschlankheit: Auskrängungslänge/statischen Nutzhöhe | Spalte G | Grenzwertes der Biegeschlankheit (lt. EN1992-1-1:2004 - Formel 7.16a) |
| Spalte D | ULS - Bemessungsmoment | Spalte H | SLS - Moment (Quasi-ständige Belastungssituation) |
| Spalte E | ULS - Bemessungsquerkraft | Spalte I | SLS - Querkraft (Quasi-ständige Belastungssituation) |

| A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|--------------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------|---|--------------------|---------|--------|
| $l_{\text{Auskrängung}}$ | l/d_{vorh} | $l_{\text{Bemessung}}$ | m_{sd} | v_{sd} | A_{serf} bzw. A_{smin} | l/d_{max} | m_2 | v_2 |
| [m] | [-] | [m] | [kNm/m] | [kN/m] | [cm ² /m] | [-] | [kNm/m] | [kN/m] |
| 1,00 | 7,69 | 1,05 | 7,40 | 14,10 | 1,84 | 70,96 | 3,69 | 7,04 |
| 1,10 | 8,46 | 1,15 | 8,88 | 15,44 | 1,84 | 70,96 | 4,43 | 7,71 |
| 1,20 | 9,23 | 1,25 | 10,49 | 16,78 | 1,84 | 70,96 | 5,23 | 8,38 |
| 1,30 | 10,00 | 1,35 | 12,23 | 18,12 | 2,01 | 61,47 | 6,11 | 9,05 |
| 1,40 | 10,77 | 1,45 | 14,11 | 19,47 | 2,33 | 48,75 | 7,04 | 9,72 |
| 1,50 | 11,54 | 1,55 | 16,13 | 20,81 | 2,67 | 39,24 | 8,05 | 10,39 |
| 1,60 | 12,31 | 1,65 | 18,27 | 22,15 | 3,04 | 32,02 | 9,12 | 11,06 |
| 1,70 | 13,08 | 1,75 | 20,56 | 23,49 | 3,44 | 26,47 | 10,26 | 11,73 |
| 1,80 | 13,85 | 1,85 | 22,97 | 24,84 | 3,86 | 22,16 | 11,47 | 12,40 |
| 1,90 | 14,62 | 1,95 | 25,52 | 26,18 | 4,31 | 18,80 | 12,74 | 13,07 |
| 2,00 | 15,38 | 2,05 | 28,21 | 27,52 | 4,79 | 16,15 | 14,08 | 13,74 |
| 2,10 | 16,15 | 2,15 | 31,03 | 28,86 | 5,30 | 14,07 | 15,49 | 14,41 |
| 2,20 | 16,92 | 2,25 | 33,98 | 30,21 | 5,84 | 12,43 | 16,96 | 15,08 |
| 2,30 | 17,69 | 2,35 | 37,07 | 31,55 | 6,42 | 11,16 | 18,50 | 15,75 |
| 2,40 | 18,46 | 2,45 | 40,29 | 32,89 | 7,03 | 10,18 | 20,11 | 16,42 |
| 2,50 | 19,23 | 2,55 | 43,65 | 34,23 | 7,67 | 9,48 | 21,78 | 17,09 |
| 2,60 | 20,00 | 2,65 | 47,14 | 35,58 | 8,35 | 0,00 | 23,53 | 17,76 |
| 2,70 | 20,77 | 2,75 | 50,76 | 36,92 | 9,07 | 0,00 | 25,33 | 18,43 |
| 2,80 | 21,54 | 2,85 | 54,52 | 38,26 | 9,84 | 0,00 | 27,21 | 19,10 |
| 2,90 | 22,31 | 2,95 | 58,42 | 39,60 | 10,65 | 0,00 | 29,15 | 19,77 |
| 3,00 | 23,08 | 3,05 | 62,44 | 40,95 | 11,50 | 0,00 | 31,16 | 20,44 |
| 3,10 | 23,85 | 3,15 | 66,60 | 42,29 | 12,41 | 0,00 | 33,24 | 21,11 |
| 3,20 | 24,62 | 3,25 | 70,90 | 43,63 | 13,38 | 0,00 | 35,38 | 21,78 |

| | |
|-------------|---|
| BER2 | Reaktive Schnittgrößen Zugzone und NW Schlaufe |
|-------------|---|

| Erläuterungen: | | | |
|----------------|---|--|---|
| Spalte B | Maximale Kraft im Zugbereich des Thermoelementes (lt. Fachwerkmodell: $T_{d,ges} = T_1 + D_H/2$) | | Spalte F wie Spalte E mit der Ausnahme: Abgemindertes $f_{yd,FKV}$ aufgrund der Spannungsüberhöhung im Übergang |
| Spalte C | wie Spalte B jedoch pro eingelegter FKV-Schlaufe | | Spalte G Erforderlicher ϕ der Anschlussbew. (Maximalwert aus T_d oder gewählter Schlaufe) |
| Spalte D | Spannung in den FKV-Schlaufen | | Spalte H Steifigkeit EA der für ULS Bemessung im Einspannquerschnitt) |
| Spalte E | Verhältnis Spannung in FKV-Schlaufe/ Maximalspannung für gewähltes FKV-Material (Ausnutzungsgrad in %) | | Spalte I Verhältnis Steifigkeiten FKV-Schlaufen/erf. Stahlbewehrung (EA-Stahl= 100%) |

| A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|-------------------------|-------------|----------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|----------|-------------------------------|
| $l_{Auskr\ddot{a}gung}$ | $T_{d,ges}$ | $T_d/Schlaufe$ | σ_{FKV} | $\frac{\sigma_{FKV}}{f_{yd,FKV}}$ | $\frac{\sigma_{FKV}}{f_{yd,FKV,red}}$ | erf. $A_{S,Anschluss}$ | EA-Stahl | $\frac{EA_{FKV}}{EA_{Stahl}}$ |
| [m] | [kN] | [kN] | [N/mm ²] | [%] | [%] | [-] | [kN] | [%] |
| 1,00 | 106,1 | 26,5 | 331,7 | 43% | 43% | 2ø8 | 38587 | 104% |
| 1,10 | 125,3 | 31,3 | 391,6 | 50% | 51% | 2ø8 | 38587 | 104% |
| 1,20 | 146,1 | 36,5 | 456,5 | 59% | 60% | 2ø8 | 38587 | 104% |
| 1,30 | 168,4 | 42,1 | 526,4 | 67% | 69% | 2ø8 | 42259 | 95% |
| 1,40 | 192,4 | 48,1 | 601,2 | 77% | 79% | 2ø10 | 48927 | 82% |
| 1,50 | 217,9 | 54,5 | 680,9 | 87% | 89% | 2ø10 | 56126 | 72% |
| 1,60 | 245,0 | 61,2 | 765,5 | 98% | 100% | 2ø10 | 63869 | 63% |
| 1,70 | 273,6 | 68,4 | 855,1 | 110% | 112% | 2ø10 | 72171 | 56% |
| 1,80 | 303,9 | 76,0 | 949,6 | 122% | 124% | 2ø12 | 81048 | 50% |
| 1,90 | 335,7 | 83,9 | 1049,1 | 134% | 137% | 2ø12 | 90518 | 45% |
| 2,00 | 369,1 | 92,3 | 1153,5 | 148% | 151% | 2ø12 | 100599 | 40% |
| 2,10 | 404,1 | 101,0 | 1262,8 | 162% | 165% | 2ø12 | 111315 | 36% |
| 2,20 | 440,7 | 110,2 | 1377,0 | 177% | 180% | 2ø14 | 122690 | 33% |
| 2,30 | 478,8 | 119,7 | 1496,2 | 192% | 196% | 2ø14 | 134751 | 30% |
| 2,40 | 518,5 | 129,6 | 1620,4 | 208% | 212% | 2ø14 | 147529 | 27% |
| 2,50 | 559,8 | 140,0 | 1749,4 | 224% | 229% | 2ø14 | 161060 | 25% |
| 2,60 | 602,7 | 150,7 | 1883,4 | 241% | 246% | 2ø16 | 175382 | 23% |
| 2,70 | 647,2 | 161,8 | 2022,4 | 259% | 265% | 2ø16 | 190540 | 21% |
| 2,80 | 693,2 | 173,3 | 2166,3 | 278% | 283% | 2ø16 | 206585 | 20% |
| 2,90 | 740,8 | 185,2 | 2315,1 | 297% | 303% | 2ø16 | 223577 | 18% |
| 3,00 | 790,0 | 197,5 | 2468,8 | 317% | 323% | 2ø20 | 241582 | 17% |
| 3,10 | 840,8 | 210,2 | 2627,5 | 337% | 344% | 2ø20 | 260680 | 15% |
| 3,20 | 893,2 | 223,3 | 2791,1 | 358% | 365% | 2ø20 | 280964 | 14% |

| | |
|-------------|--|
| BER3 | Reaktive Schnittgrößen Druckzone und NW UHPC-Element(1) |
|-------------|--|

| Erläuterungen: | | | | |
|----------------|--|--|----------|---|
| Spalte B | Maximale Kraft im Druckbereich des Thermoelementes (lt. Fachwerkmodell: $T_{d,ges} = T_1 - D_H / 2$) | | Spalte F | Verhältnis max. auftretender Kraft/ Element zur max. Betondruckkraft (Ausnutzungsgrad in %) |
| Spalte C | wie Spalte B jedoch pro Element (Summe Druck- und Schubelemente) | | Spalte G | Verhältnis Spannung im UHPC-QS/ Bemessungsspannung des gewählten Betons (Ausnutzungsgrad in %) |
| Spalte D | Maximale Kraft der Druckdiagonale (lt. Fachwerkmodell: $D_{d,ges} = v_{sd} / \sin(\theta)$) | | Spalte H | max. Betondruckkraft im Übergangsbereich einer FVK-Schlaufe (lt. EN1992-1-1:2004 - Formel 6.63) |
| Spalte E | wie Spalte B jedoch pro Schubelement | | Spalte I | Verhältnis max. auftretender Kraft/ Schlaufe zur max. Betondruckkraft (Ausnutzungsgrad in %) |

| A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|-------------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| $l_{\text{Auskrägung}}$ | $C_{d,ges}$ | $C_d/\text{Elem.}$ | $D_{d,ges}$ | $D_d/\text{Elem.}$ | $C_d/\text{Element}/F_{Rdu,Beton}$ | $\sigma_{cd,UHPC}/f_{cd,UHPC}$ | $F_{Rdu,Beton}/\text{Schlaufe}$ | $T_d/\text{Schlaufe}/F_{Rdu,Beton}$ |
| [m] | [kN] | [kN] | [kN] | [kN] | [%] | [%] | [kN] | [%] |
| 1,00 | 68,0 | 17,0 | 40,66 | 10,17 | 18% | 25% | 91,3 | 29% |
| 1,10 | 83,6 | 20,9 | 44,54 | 11,13 | 22% | 30% | 91,3 | 34% |
| 1,20 | 100,7 | 25,2 | 48,41 | 12,10 | 27% | 37% | 91,3 | 40% |
| 1,30 | 119,4 | 29,9 | 52,28 | 13,07 | 32% | 44% | 91,3 | 46% |
| 1,40 | 139,7 | 34,9 | 56,16 | 14,04 | 37% | 51% | 91,3 | 53% |
| 1,50 | 161,6 | 40,4 | 60,03 | 15,01 | 43% | 59% | 91,3 | 60% |
| 1,60 | 185,0 | 46,3 | 63,90 | 15,98 | 49% | 68% | 91,3 | 67% |
| 1,70 | 210,1 | 52,5 | 67,77 | 16,94 | 56% | 77% | 91,3 | 75% |
| 1,80 | 236,7 | 59,2 | 71,65 | 17,91 | 63% | 86% | 91,3 | 83% |
| 1,90 | 264,9 | 66,2 | 75,52 | 18,88 | 70% | 97% | 91,3 | 92% |
| 2,00 | 294,6 | 73,7 | 79,39 | 19,85 | 78% | 108% | 91,3 | 101% |
| 2,10 | 326,0 | 81,5 | 83,26 | 20,82 | 86% | 119% | 91,3 | 111% |
| 2,20 | 358,9 | 89,7 | 87,14 | 21,78 | 95% | 131% | 91,3 | 121% |
| 2,30 | 393,4 | 98,4 | 91,01 | 22,75 | 104% | 144% | 91,3 | 131% |
| 2,40 | 429,5 | 107,4 | 94,88 | 23,72 | 114% | 157% | 91,3 | 142% |
| 2,50 | 467,2 | 116,8 | 98,76 | 24,69 | 124% | 170% | 91,3 | 153% |
| 2,60 | 506,4 | 126,6 | 102,63 | 25,66 | 134% | 185% | 91,3 | 165% |
| 2,70 | 547,3 | 136,8 | 106,50 | 26,63 | 145% | 200% | 91,3 | 177% |
| 2,80 | 589,7 | 147,4 | 110,37 | 27,59 | 156% | 215% | 91,3 | 190% |
| 2,90 | 633,7 | 158,4 | 114,25 | 28,56 | 168% | 231% | 91,3 | 203% |
| 3,00 | 679,2 | 169,8 | 118,12 | 29,53 | 180% | 248% | 91,3 | 216% |
| 3,10 | 726,4 | 181,6 | 121,99 | 30,50 | 192% | 265% | 91,3 | 230% |
| 3,20 | 775,1 | 193,8 | 125,87 | 31,47 | 205% | 283% | 91,3 | 245% |

| | |
|-------------|--|
| BER4 | Nachweise UHPC-Element (2) + Verformung |
|-------------|--|

| Erläuterungen: | | | | |
|----------------|--|--|----------|--|
| Spalte B | Mittlere Betonspannung in der Druckstrebe/UHPC-Schubelement (Auflagerbereich) | | Spalte F | Verformung aufgrund von Starrkörper-rotation zufolge quasi-ständiger Belastung (Moment) |
| Spalte C | Verhältnis Spannung/Bemessungs-spannung UHPC (Auflager) (Ausnutzungsgrad in %) | | Spalte G | Verformung aufgrund von Starrkörper-rotation zufolge quasi-ständiger Belastung (Querkraft) |
| Spalte D | Mittlere Betonspannung im Ein-leitungsbereich der Druckstrebe/ Schubelement (Kragbereich) | | Spalte H | Gesamtverformung aufgrund von Starrkörperrotation zufolge quasi-ständiger Belastung |
| Spalte E | Verhältnis Spannung/Bemessungsspannung Normalbeton (Einleitungsbereich) (Ausnutzungsgrad in %) | | Spalte I | Verhältnis von Spalte H zur maximal erlaubten Überhöhung der Kragplatte (Ausnutzungsgrad in %) |

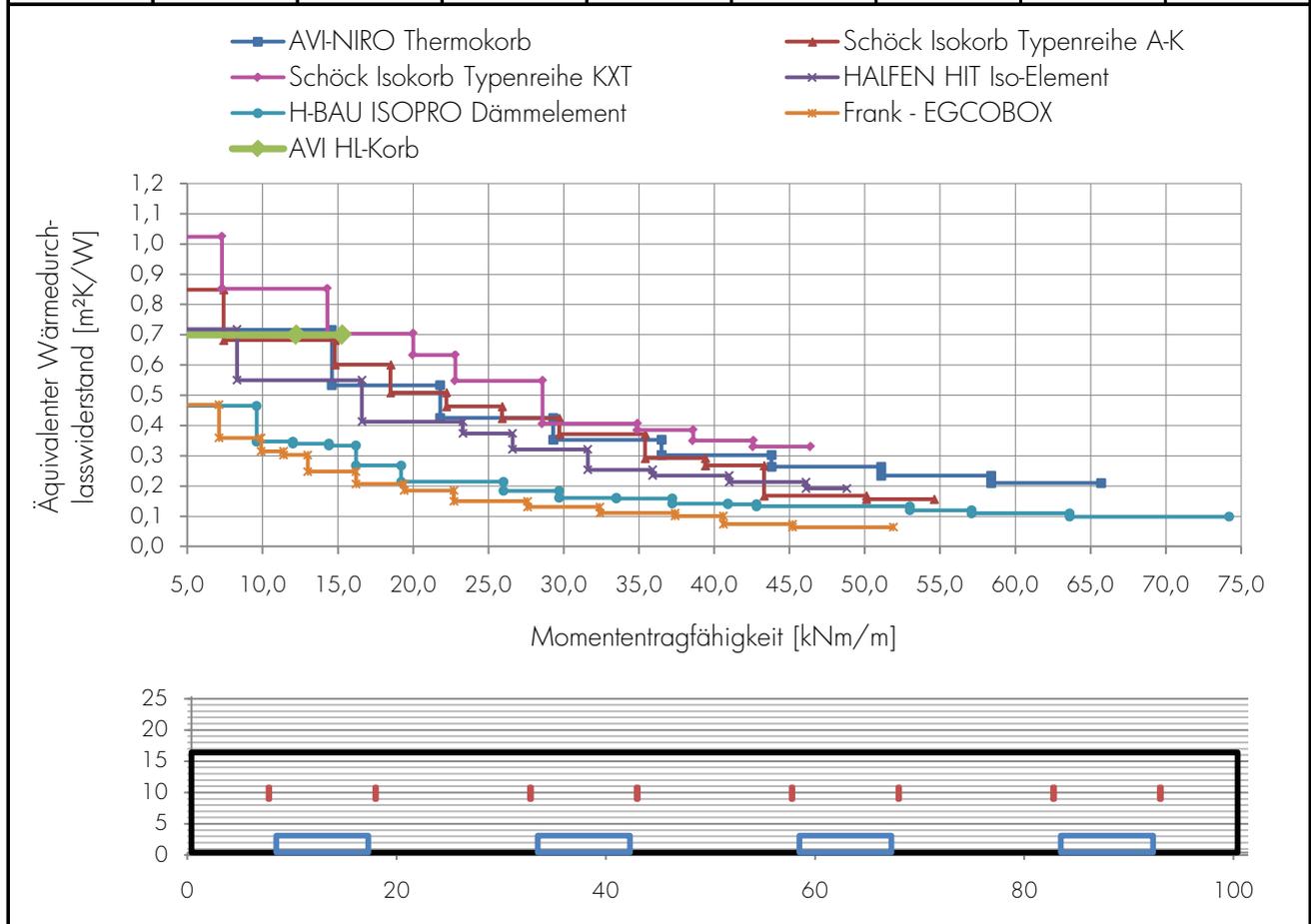
| A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|-------------------------|----------------------------|---|------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| $l_{\text{Auskrugung}}$ | σ_{Auflager} | $\sigma_{\text{Auflager}}/f_{\text{cd,UHPC}}$ | $\sigma_{\text{Einleitung}}$ | $\sigma_{\text{Einleitung}}/f_{\text{cd}}$ | $W_{\text{Element,m2}}$ | $W_{\text{Element,v2}}$ | $W_{\text{Element,ges}}$ | $W_{\text{Element,ges}}/\ddot{u}_{\text{max}}$ |
| [m] | [N/mm ²] | [%] | [N/mm ²] | [%] | [cm] | [cm] | [cm] | [%] |
| 1,00 | 13,03 | 12% | 5,24 | 31% | 0,56 | 0,01 | 0,56 | 56% |
| 1,10 | 14,27 | 13% | 5,74 | 34% | 0,73 | 0,01 | 0,74 | 67% |
| 1,20 | 15,52 | 14% | 6,24 | 37% | 0,93 | 0,01 | 0,94 | 78% |
| 1,30 | 16,76 | 16% | 6,74 | 40% | 1,17 | 0,01 | 1,18 | 90% |
| 1,40 | 18,00 | 17% | 7,24 | 43% | 1,44 | 0,01 | 1,45 | 104% |
| 1,50 | 19,24 | 18% | 7,74 | 46% | 1,75 | 0,01 | 1,76 | 118% |
| 1,60 | 20,48 | 19% | 8,23 | 49% | 2,11 | 0,01 | 2,12 | 132% |
| 1,70 | 21,72 | 20% | 8,73 | 52% | 2,51 | 0,01 | 2,52 | 148% |
| 1,80 | 22,96 | 21% | 9,23 | 55% | 2,96 | 0,01 | 2,97 | 165% |
| 1,90 | 24,20 | 23% | 9,73 | 58% | 3,46 | 0,01 | 3,47 | 182% |
| 2,00 | 25,45 | 24% | 10,23 | 61% | 4,01 | 0,01 | 4,02 | 201% |
| 2,10 | 26,69 | 25% | 10,73 | 64% | 4,61 | 0,01 | 4,63 | 220% |
| 2,20 | 27,93 | 26% | 11,23 | 67% | 5,28 | 0,01 | 5,29 | 241% |
| 2,30 | 29,17 | 27% | 11,73 | 70% | 6,01 | 0,01 | 6,02 | 262% |
| 2,40 | 30,41 | 28% | 12,23 | 73% | 6,80 | 0,01 | 6,81 | 284% |
| 2,50 | 31,65 | 30% | 12,73 | 76% | 7,65 | 0,01 | 7,67 | 307% |
| 2,60 | 32,89 | 31% | 13,23 | 79% | 8,58 | 0,01 | 8,59 | 330% |
| 2,70 | 34,14 | 32% | 13,72 | 82% | 9,57 | 0,01 | 9,59 | 355% |
| 2,80 | 35,38 | 33% | 14,22 | 85% | 10,65 | 0,01 | 10,66 | 381% |
| 2,90 | 36,62 | 34% | 14,72 | 88% | 11,79 | 0,02 | 11,81 | 407% |
| 3,00 | 37,86 | 35% | 15,22 | 91% | 13,02 | 0,02 | 13,04 | 435% |
| 3,10 | 39,10 | 37% | 15,72 | 94% | 14,33 | 0,02 | 14,35 | 463% |
| 3,20 | 40,34 | 38% | 16,22 | 97% | 15,73 | 0,02 | 15,74 | 492% |

BER5 Äquivalenter Wärmedurchlasswiderstand gew. Konfiguration

Erläuterungen:

| | | | | |
|----------|---|--|----------|--|
| Spalte A | Gesamfläche des betrachteten Bereiches: Elementbreite b x Deckenstärke h | | Spalte E | Flächenanteil: Dämmung bezogen auf Streifen der Breite b |
| Spalte B | Flächenanteil: Druckelementenfläche bezogen auf Streifen der Breite b | | Spalte G | Äquivalente Wärmeleitfähigkeit: Flächenmäßig, gewichtetes Mittel einzelner Materialeitfähigkeiten |
| Spalte C | Flächenanteil: Schubelementenfläche bezogen auf Streifen der Breite b | | Spalte H | Äquivalenter Wärmedurchlasswiderstand: Dämmstoffdicke/ λ_{eq} |
| Spalte D | Flächenanteil: FVK-Schlaufe bezogen auf Streifen der Breite b | | Spalte I | |

| A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|----------------|----------------------|---|
| A_{ges} | Druckelementanteil | Schubelementanteil | Schlaufenanteil | Anteil Dämmung | | λ_{eq} | R_{eq} | |
| [cm ²] | | [W/mK] | [m ² K/W] | |
| 1600,0 | 0,0 | 79,7 | 3,2 | 1517,1 | | 0,14 | 0,70 | |



| | | | | | | | | |
|-------------|-------|------|-------------|-------|---------|-------------|-------|------|
| $T_{d,max}$ | 244,6 | [kN] | $C_{d,max}$ | 377,6 | [kN] | $D_{d,max}$ | 129,3 | [kN] |
| V_{rd} | 47,8 | [kN] | m_{rd} | 15,3 | [kNm/m] | Masse | 6,2 | [kg] |

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplomarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl