



Masterarbeit

**Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen -  
Bemessungskonzept**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplomingenieurs  
der Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften

unter der Leitung von

O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue

Dipl.-Ing. Günther Illich

Institut für Betonbau

eingereicht an der Technischen Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

von

Robert Peheim

Graz, Oktober 2013

## 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 05.11.2015 darf die Veröffentlichung erfolgen.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

---

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

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## DANKSAGUNG

---

An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei meinen Eltern bedanken, die durch ihre bedingungslose Unterstützung mein Studium möglich machten, sowie für ihr grenzenloses Vertrauen, dass sie mir die ganze Zeit entgegenbrachten. Ein besonderes Dankschön gilt auch meiner Partnerin Judith, die mir im Laufe meines Studiums immer zur Seite stand und die mich ebenfalls bedingungslos unterstützte.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.- Ing. Günther Illich für die Betreuung, sowie Herrn Professor Tue für die Möglichkeit meine Masterarbeit am Institut für Betonbau verfassen zu können. Des Weiteren danke ich den gesamten Mitarbeitern des Institutes für die freundliche Unterstützung. Besonders danken möchte ich Frau Dipl.-Ing Regina della Pietra für die außertourliche Betreuung beim Verfassen meiner Masterarbeit, sowie für ihre enorme Hilfsbereitschaft.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Studienkollegen Stefan und Matthias, mit denen ich meine gesamte Studienzeit genießen konnte und die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

## KURZFASSUNG

---

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Bemessung eines Wärmedämmelementes, welches im Rahmen eines Forschungsvorhabens zwischen dem Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz und der Firma AVI-Alpenländische Veredelungs-Industrie GesmbH, entwickelt wurde. Zur Anwendung für dieses neuartige Thermoelement kommen die Hochleistungswerkstoffe ultrahochfester Beton (UHPC) auf der Druckseite und glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) auf der Zugseite. Um das Tragverhalten des neuartigen Elementes realitätsnah beschreiben zu können, wurden im Vorfeld und im Laufe dieser Masterarbeit die verschiedensten Versuche durchgeführt. Bei diesen Versuchen handelte es sich zum Teil um Einzelversuche der beiden Komponenten UHPC und GFK, und zum anderen um Biegeversuche am gesamten Bauteil. Basierend auf den Versuchsergebnissen und den theoretischen Untersuchungen, konnte ein Bemessungsmodell für das Thermoelement erstellt werden. Der letzte Teil der Arbeit befasst sich mit der konstruktiven Durchbildung von möglichen Bereichen in denen das Thermoelement eingesetzt werden kann. Hierbei wird auf die Anordnung der Elemente, sowie auf den Anschluss in den Bereichen des Normalbetons eingegangen.

## ABSTRACT

---

This Master thesis deals with the structural design of warmth insulating elements, which is organized by the Institute of Structural Concrete at the Graz University of Technology in cooperation with the AVI-Alpenländische Veredelungs-Industrie GesmbH. The main elements for this new kind of thermocouple are high-performance materials like ultra-high performance concrete (UHPC) for the pressure side and glass-fiber reinforced plastics (GRP) on the tension side. Various tests were carried out before and in the course of this work to describe the structural behavior of the element in a realistic way. These experiments were composed by individual tests concerning the components of UHPC and GRP as well as bending test on the entire constructional element. Using these bending test series, the structural behavior of the thermo-element-system is meant to be tested under real conditions. Based on the experiments and the insights gained from these test series, it was possible to create an adequate measurement model for the thermo-element-system. The last part of this thesis focuses on the practical implementation of the possible areas where the thermocouple could be used. Finally, the arrangement of the elements will be discussed as well as the connection to the areas where normal concrete is integrated.

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STAND DES ARBEITSFORTSCHRITTS</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>VERWENDETE MATERIALIEN</b> .....	<b>3</b>
3.1	ULTRAHOCHFESTER BETON UHPC .....	3
3.2	GLASFASER-KUNSTSTOFF-VERBUND GFK .....	4
<b>4</b>	<b>VERSUCHE IM VORFELD</b> .....	<b>5</b>
4.1	ZUGVERSUCHE AN DER EINZELSCHLAUFE .....	5
4.2	DRUCKVERSUCHE AM UHPC-DRUCKELEMENT .....	6
4.3	AUSZUGSVERSUCHE DER SCHLAUFE .....	7
<b>5</b>	<b>VERSUCHE AM BAUTEIL</b> .....	<b>10</b>
5.1	VERSUCHSAUFBAU .....	10
5.2	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	12
5.2.1	<i>Versuchsserie 1</i> .....	12
5.2.2	<i>Versuchsserie 2</i> .....	14
5.2.3	<i>Versuchsserie 3</i> .....	17
5.3	VERSUCHSAUSWERTUNG .....	20
5.3.1	<i>Versuchsserie 1</i> .....	20
5.3.2	<i>Versuchsserie 2</i> .....	21
5.3.3	<i>Versuchsserie 3</i> .....	23
<b>6</b>	<b>TRAGMODELL / LAST-KRAFT-FLUSS</b> .....	<b>25</b>
6.1	KRAFTAUFTeilUNG .....	25
6.2	KRAFTEINLEITUNG IN NORMALBETON .....	26
6.2.1	<i>UHPC-Formteil-Normalbeton</i> .....	26
6.2.2	<i>Schlaufe-Normalbeton</i> .....	28
6.3	KINEMATISCHE REAKTIONSGRÖßEN IM THERMOELEMENT .....	29
6.4	VERSUCHSERGEBNISSE .....	31
6.4.1	<i>Versuchsserie 1</i> .....	31
6.4.2	<i>Versuchsserie 2</i> .....	33
6.4.3	<i>Versuchsserie 3</i> .....	34
6.4.4	<i>Gegenüberstellung der Versuchsserien</i> .....	36

6.5	VERSUCHSNACHRECHNUNG .....	38
<b>7</b>	<b>BEMESSUNGSMODELL .....</b>	<b>42</b>
7.1	ALLGEMEINES.....	42
7.1.1	<i>Bauteilbezeichnungen und Abmessungen</i> .....	42
7.1.2	<i>Schnittebenen</i> .....	44
7.1.3	<i>UHPC-Flächen</i> .....	44
7.2	NACHWEISFÜHRUNG .....	45
7.2.1	<i>Nachweis der Spannung im Normalbeton ULS</i> .....	45
7.2.2	<i>Nachweis der Betondrucknormalkraft im UHPC ULS</i> .....	46
7.2.3	<i>Nachweis der Spannung im Normalbeton SLS</i> .....	47
7.2.4	<i>Nachweis der Spannung im UHPC SLS</i> .....	47
7.2.5	<i>Nachweis der Stahlspannung in der Anschlussbewehrung SLS</i> .....	47
7.2.6	<i>Nachweis der Verformungen im SLS</i> .....	48
7.3	EINWIRKUNGEN IM HOCHBAU .....	52
7.3.1	<i>Eigengewicht</i> .....	52
7.3.2	<i>Nutzlasten</i> .....	53
7.4	BEMESSUNG .....	55
7.4.1	<i>Auskragungslängen</i> .....	57
7.4.2	<i>Überhöhungen / Verformungen</i> .....	59
7.5	M / V INTERAKTIONSDIAGRAMM .....	62
<b>8</b>	<b>KONSTRUKTIVE DURCHBILDUNG.....</b>	<b>68</b>
8.1	STANDARD AUSFÜHRUNG OHNE HÖHENSPRUNG .....	68
8.2	ÜBERGANG MIT KLEINEM HÖHENSPRUNG INNEN UND AUßEN .....	69
8.3	ÜBERGANG MIT GROßEM HÖHENSPRUNG .....	71
8.4	INDIREKTE LAGERUNG .....	72
8.5	AUSSPRINGENDE ECKE MIT KLEINEM HÖHENSPRUNG INNEN / AUßEN .....	73
8.6	ATTIKA .....	75
8.7	KONSOLE.....	76
8.8	AUSFÜHRUNGSHINWEISE .....	77
<b>9</b>	<b>RESÜMEE.....</b>	<b>78</b>
9.1	ZUSAMMENFASSUNG .....	78
9.2	AUSBlick .....	79

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>80</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>83</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>84</b>
<b>ANHANG.....</b>	<b>85</b>
<b>MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG.....</b>	<b>85</b>



# 1 EINLEITUNG

---

Für den Wärmeschutz bei auskragenden Elementen stehen zwei Varianten zur Verfügung. Eine Möglichkeit wäre das komplette Umhüllen des Bauteils, was aus ökonomischen und ästhetischen Gründen nicht möglich ist. Aus diesem Grund liegt das Bestreben in erster Linie darin, Wärmedämmelemente zu entwickeln, die den Wärmeverlust im Übergangsbereich minimieren. Diese Minderung kann einerseits durch die Reduktion der durchgehenden Flächen erfolgen oder andererseits durch den Einsatz von Materialien, deren Wärmeleitfähigkeit gering ist. Denkbar ist natürlich auch eine Kombination der beiden genannten Varianten, was die optimale Lösung darstellen würde. Trotz der Flächenminimierung muss die Tragfähigkeit des auskragenden Bauteils sichergestellt sein. Daher wird versucht neue Hochleistungswerkstoffe für den Einsatz als tragende Komponenten im Bereich der Wärmedämmelemente einzusetzen. Das Problem bei solchen Werkstoffen ist, dass sie durch ihr dichtes Gefüge zu einem sprödebruchartigem Versagen neigen, was im Bereich von auskragenden Bauteilen zu vermeiden ist. Aus diesem Grund ist es sehr wichtig im Vorfeld einer Markteinführung von einem neuartigen Thermoelement, unter der Verwendung von hochfesten Materialien, eine Reihe von Versuchen durchzuführen, die zeigen, dass diese Werkstoffe durchaus für dieses Einsatzgebiet herangezogen werden können.

Das Institut für Betonbau erforscht gerade unter der Zusammenarbeit mit der Firma AVI-Alpenländische Veredelungs-Industrie GesmbH, ein neuartiges Thermoelement, welches sich durch den Einsatz von hochfesten Materialien von den anderen Wärmedämmelement, die zur Zeit auf dem Markt angeboten werden, abhebt. Bei diesen Materialien handelt es zum einen um ultrahochfesten Beton (UHPC) und zum anderen um glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK).

Diese Masterarbeit mit dem Schwerpunkt der Bemessung des neuartigen Thermoelementes, stützt sich auf die Entwicklungsarbeit, die bereits im Vorfeld durchgeführt wurde. Für diese Entwicklung wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt, die Aufschluss über das Verhalten der einzelnen Komponenten geben sollen, welche bei diesem Thermoelement zum Einsatz kommen. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird im Zuge dieser Arbeit eine ausreichende Bemessung für das Wärmedämmelement erstellt. Außerdem wird versucht mit Hilfe eines Momenten-Querkraft-Interaktionsdiagramm die Bemessung für das Thermoelement zu vereinfachen, wobei lediglich die vorhandenen Schnittgrößen für das vorliegende System benötigt werden.

Zum Abschluss dieser Arbeit werden noch konstruktive Ausarbeitungen für Detailbereiche, bei denen das Thermoelement eingesetzt werden kann, aufgezeigt. Hierbei wird gezeigt, wie die Anschlussbereiche im Normalbeton auszuführen sind.

## 2 STAND DES ARBEITSFORTSCHRITTS

---

Im Zuge der Entwicklung eines neuartigen Thermoelements, wurde bereits im Jahr 2009 eine Masterarbeit [1] mit dem Titel "*Studie zur Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelements im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen*" verfasst. Im Rahmen dieser Arbeit wurde erstmals geprüft, ob der Einsatz von ultrahochfesten Beton (UHPC) für die Aufnahme der Druckkräfte und damals noch mit kohlefaserverstärktem Kunststoff für die Zugkräfte, möglich ist. Des Weiteren wurde eine passende Form für das UHPC-Druckelement gesucht, um die Fläche an der Übergangsstelle zwischen Innen und Außen zu minimieren. Der Grund dafür ist, die Wärmeverluste an dieser Stelle so gering wie möglich zu halten, und dabei noch eine möglichst hohe Tragfähigkeit zu erzielen. Die theoretische Abbildung der Gegebenheiten zeigte, in welchen Bereichen Forschungsbedarf besteht, und so wurden anhand der Entwicklung aus [1], Versuche konfiguriert und durchgeführt. Hierbei handelte es sich um Versuche am Einzelement, wie z.B. der CFK-Schlaufe oder dem UHPC-Druckelement.

Diese Versuche wurden zum Teil im Rahmen der Masterarbeit [2] durchgeführt und ausgewertet. Die Auswertung dieser Versuche führten zum Resultat, dass die Schlaufen aus kohlenfaserverstärktem Kunststoff nicht die richtige Wahl für dieses Einsatzgebiet sind. In [2] wurden ebenfalls Berechnungen mit Hilfe der Finiten-Elementen-Methode (FE) im Bereich der Einbindung des UHPC-Elementes in den Normalbeton durchgeführt. Außerdem wurden in dieser Arbeit erste Bemessungen am Thermoelement durchgeführt.

Im Anschluss an diese Arbeit startete das Institut die Biegeversuchsserie 1 unter der Verwendung einer neu dimensionierten Schlaufe aus glasfaserverstärkten Kunststoff, anstatt des ursprünglichen kohlenfaserverstärkten Kunststoff. Darüber hinaus wurden Einzelversuche an der GFK-Schlaufe durchgeführt, wobei es sich in erster Linie um Kriech- und Auszugsversuche handelte. Um die Spanne der Daten und Ergebnisse für eine aussagekräftige Auswertung zu erweitern, wurde eine zweite Biegeversuchsserie in Auftrag gegeben, hierbei stütze man sich auf die Verwendung von neuen Abmessungen der GFK-Schlaufe. An diesen Punkt knüpft die hier vorliegende Arbeit an.

### 3 VERWENDETE MATERIALIEN

---

Bei einer Balkonplatte handelt es sich in Bezug auf das statische System um einen Auskragung. An der Stelle der Einspannung des Kragarmes, meist im Bereich der Aufmauerung, kommt es zu Druck- und Zugkräften. Im Rahmen der Neuentwicklung eines Thermoelementes müssen daher im Vorfeld mögliche Materialien angedacht werden, die diese Kräfte aufnehmen und auch weiterleiten können. Aus diesem Grund, wurden bereits im Vorfeld dieser Arbeit, Versuche an möglichen Materialien durchgeführt. Diese haben ergeben, einen Ultrahochfesterbeton (UHPC), auf der Druckseite, und einen Glasfaser-Kunststoff-Verbund (GFK) an der Zugseite zum Einsatz kommen zulassen. Die besonderen Eigenschaften, welche die beiden Materialien für dieses Anwendungsgebiet mitbringen, soll in diesem Kapitel kurz erläutert werden.

#### 3.1 ULTRAHOCHFESTER BETON UHPC

---

Die guten Druckeigenschaften die der UHPC mit sich bringt, machen ihn für den Einsatz als Druckkomponente dieses Hochleistungsthermoelementes perfekt. Die Ausführung von ultrahochfesten Beton kann mit und ohne die Zugabe von Faser erfolgen. Durch das Beimengen von Fasern, wird das Bruchverhalten dahingehend verbessert, dass es zu keinem explosionsartigen Versagen kommt. Abbildung 1 zeigt das Spannungs-Dehnungsverhalten von UHPC mit einem Stahlfaseranteil von 2,5 Vol-%. Ohne das Beimengen von Fasern, werden die Kurven dahingehend verändert, dass die abfallenden Äste der Kurven nicht existieren würden. [3] Aus Tabelle 1 sind einige relevante Materialeigenschaften von ultrahochfesten Beton angegeben.

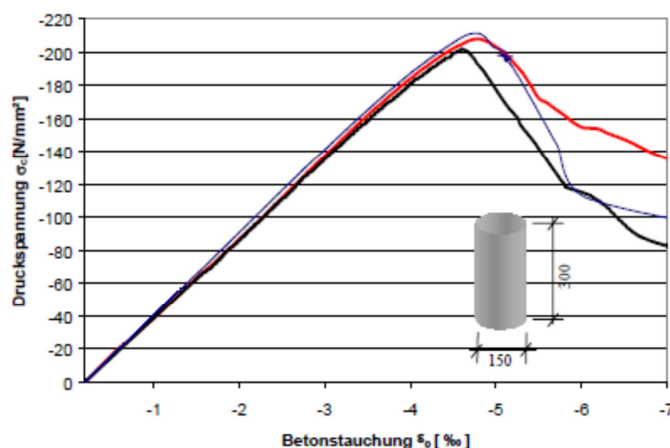


ABBILDUNG 1: SPANNUNGS-DEHNUNGS-DIAGRAMM UHPC [3]

TABELLE 1: MATERIALEIGENSCHAFTEN UHPC [3]

Bezeichnung		Einheit
Druckfestigkeit $f_c$	150-200	[MPa]
E-Modul	45-55	[GPa]
Wärmedehnzahl $\alpha_T$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	[1/K]

## 3.2 GLASFASER-KUNSTSTOFF-VERBUND GFK

Dieser Verbundwerkstoff setzt sich zum einen aus Glasfasern und zum anderen aus einem Verbundstoff zusammen. Als Verbundstoff kommen meist Duroplaste, Thermoplaste und Elastomere zum Einsatz, welche ein duktileres Materialverhalten erzeugen. Die Glasfasern selbst, weisen im Gegensatz zu ihrem Ausgangsprodukt dem Glas, eine sehr hohe Festigkeit auf. Die verschiedenen Eigenschaften der Fasern sind in erster Linie von den verschiedenen Glasfasertypen abhängig. Einen groben Überblick über die einzelnen mechanischen Eigenschaften sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Die angeführten Eigenschaften beziehen sich nur auf den Faserwerkstoff und nicht auf die gesamte Matrix von GFK.

TABELLE 2: MATERIALEIGENSCHAFTEN GLASFASERN [4]

Bezeichnung		Einheit
Zugfestigkeit $R_{fil}^+$	1.650-4.500	[MPa]
E-Modul $E_f$	55.000-86.810	[MPa]
Wärmedehnzahl $\alpha_{Tf}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	[1/°C]
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_f$	1	W/m K

Als Standardglasfasern werden E-Fasern (electrical) herangezogen, jedoch bei übermäßiger Temperatureinwirkung kommt es zu einem raschen Abfall der Festigkeit. Aus diesem Grund kommen daher meist S-Fasern (strength) oder R-Fasern (resistance) zum Einsatz. Abbildung 2 soll den Einfluss auf die Festigkeit der verschiedenen Glasfasertypen veranschaulichen. [4]

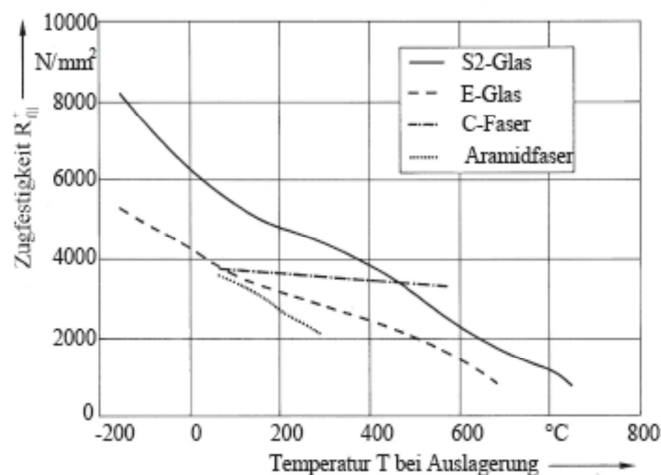


ABBILDUNG 2: FESTIGKEIT DER VERSCHIEDENEN FASER UNTER TEMPERATUREINFLUSS [4]



ten Kunststoff (GFK) verwendet und geprüft. Der Werkstoff GFK erwies sich als formstabiler und wurde für die weitere Entwicklung des Thermoelements als Zugkomponente herangezogen. Die Variante 1 der GFK-Schleife wies eine Gesamtlänge von 700 [mm] auf, wo hingegen die Variante 2 nur eine Schlaufenlänge von 400 [mm] besitzt. Außerdem wurde der Faseranteil bei Variante 2 erhöht.

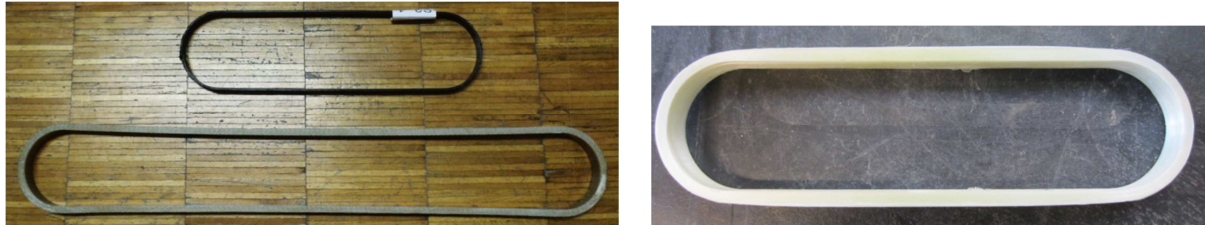


ABBILDUNG 4: CFK (OBEN LINKS), GFK VARIANTE 1 (UNTEN LI), GFK VARIANTE 2 (RE)

## 4.2 DRUCKVERSUCHE AM UHPC-DRUCKELEMENT

---

Im Rahmen der Druckversuche wurde, wie in Abbildung 5 zu sehen ist, ein UHPC-Druckelement in zwei gegenüberliegende Normalbetonblöcke einbetoniert. Der Abstand der beiden Betonblöcke zueinander beträgt 12 [cm]. Dies entspricht etwa der Dicke einer konventionellen Wärmedämmung. Der Druckversuch des UHPC-Druckelementes wurde stehend durchgeführt. Hierfür wurde eine gleichmäßig verteilte Druckkraft auf die Oberseite des Versuchskörpers aufgebracht, und solange gesteigert bis es zum Versagen des UHPC-Probekörpers kam (siehe Abbildung 5). Der Probekörper wurde im Vorfeld der Versuche so konzipiert, dass es zu einem gezielten Versagen des UHPC-Druckelementes kam. Dafür wurde der Bereich der Lasteinleitung der Normalbetonblöcke mit Bewehrung so verstärkt, dass der Normalbeton die maximal auftretende Normalkraft des UHPCs aufnehmen kann.

Die Erkenntnisse die aus dieser Versuchsreihe gewonnen wurden, sind zum einen das Bruchverhalten der UHPC-Elemente unter Druckbelastung und zum anderen das Verbundverhalten zwischen den beiden Werkstoffen im Bereich der Krafteinleitung. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, wurde während der Belastung die Verschiebung der Stirnfläche des oberen Betonblockes gemessen, um zu sehen, ob es zu einem Eindringen an der Übergangsfläche zwischen dem UHPC und Normalbeton kommt. Aus [2] ist zu entnehmen, dass es zu einer leichten Verdrehung des oberen Betonwürfels im Laufe des Versuchs kam. Dies ist auf eine exzentrische Lasteinleitung zurückzuführen. Im Bereich der Lasteinleitung wurden keine weiteren Beschädigungen oder Risse im Zuge der Versuchsdurchführung festgestellt.

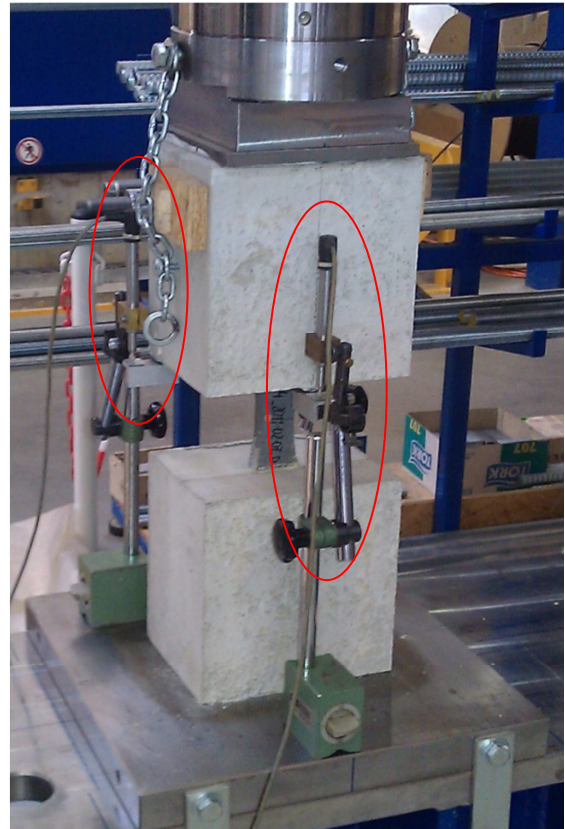
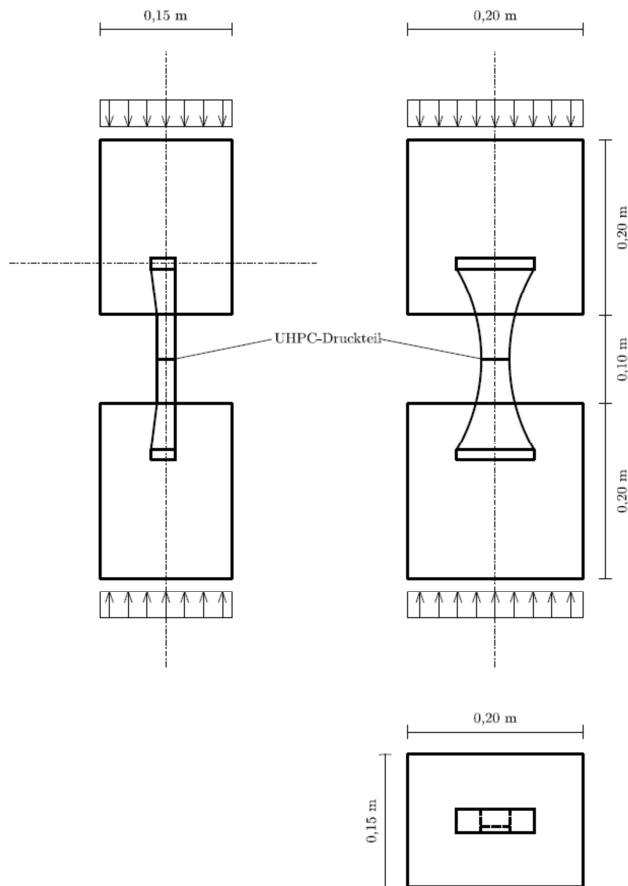


ABBILDUNG 5: VERSUCHSAUFBAU (LI) UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG (RE)

### 4.3 AUSZUGSVERSUCHE DER SCHLAUFE

Ein weiteres Hauptaugenmerk galt dem Verbundverhalten zwischen Normalbeton und der GFK-Schlaufe. Aus diesem Grund wurden im Zuge der ganzen Versuchsreihen auch Auszugsversuche an der Schlaufe durchgeführt. Die Prüfkfiguration der Versuche wurde so gewählt, dass sowohl die Einbindelänge der GFK-Schlaufen in den Normalbeton als auch die Bewehrungsführung im Betonblock variierte. Die Auszugsversuche wurden noch mit der anfänglichen GFK-Schlaufe (Abbildung 4 linkes Bild unten) durchgeführt. Abbildung 6 zeigt einerseits die verschiedenen Aufbauten der Ausziehversuche der GFK-Schlaufen, andererseits die unterschiedlichen Einbindelängen in den Normalbeton. Die Schlaufe wurde weites noch mit der Anschlussbewehrung umfasst, damit es nicht zu einem Ausreißen eines Betonkeils kommt. Für die Prüfung der Probekörper wurde dieser im aufgestellten Zustand, also mit der Stahlplatte nach unten, in die Prüfmaschine eingebaut. Durch das Anziehen der Schlaufe und dem Zurückhalten der Stahlplatte ist es möglich, eine Zugkraft auf den Versuchskörper aufzubringen, um so zu versuchen, die GFK-Schlaufe aus dem Normalbeton herauszuziehen. Die Größe des Auszuges der GFK-Schlaufe ist von der Verbundwirkung und sobald dieser überwunden wurde, von der Reibung zwischen den beiden Werkstoffen abhängig.

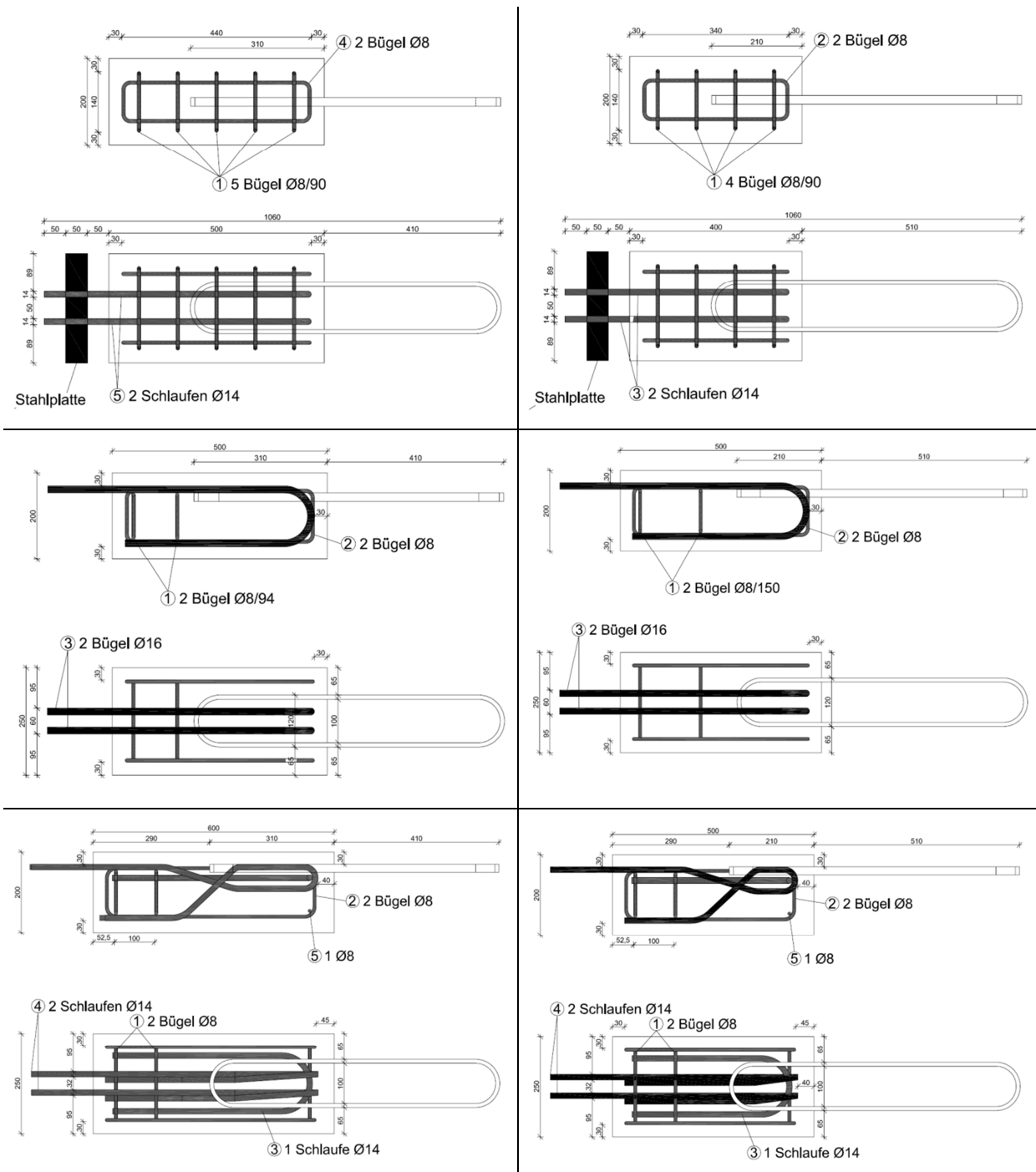


ABBILDUNG 6: VERSUCHSKÖRPER FÜR AUSZIEHVERSUCH DER GFK-SCHLAUFE [2]

Wie Abbildung 7 zeigt, wurde die Kraft solange gesteigert, bis es zum Bruch der GFK-Schlaufe kam. Des Weiteren ist zu erkennen, dass es an der Stirnfläche des Blockes im Bereich der Einbettung der Schlaufe zu Abplatzungen vom Beton kam. Diese Abplatzungen lassen auf ein mögliches Ausziehen der Schlaufe schließen.



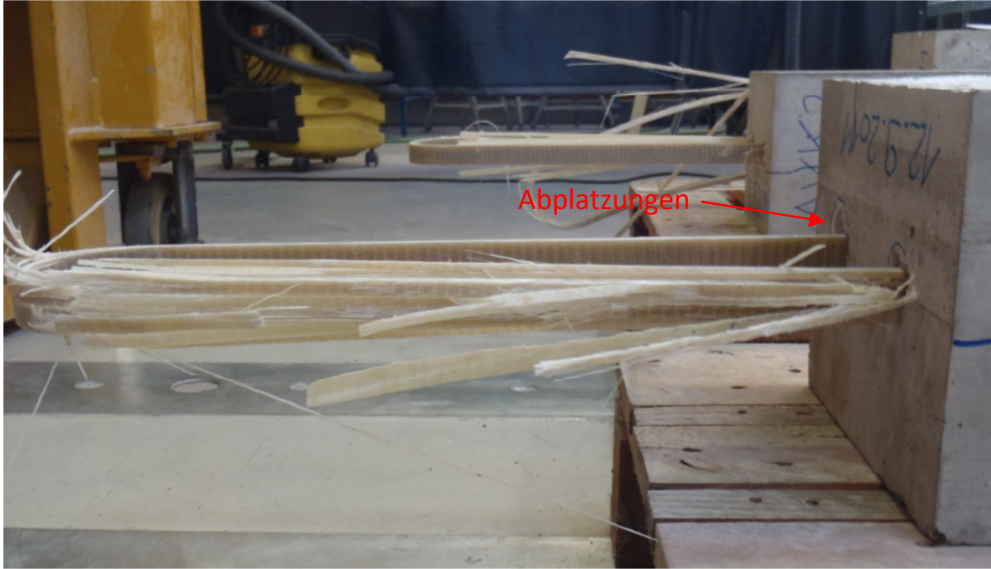


ABBILDUNG 7: PROBEKÖRPER NACH VERSUCH

## 5 VERSUCHE AM BAUTEIL

---

Aufbauend auf den Versuchen an den Einzelementen und den Druck- und Auszugsversuchen, konzentriert sich das folgende Kapitel im Detail auf das Biegeverhalten am realen System. Konkret geht es um die Beschreibung der Versuchsdurchführung, die Ausarbeitung sowie die Darstellung der Ergebnisse.

### 5.1 VERSUCHSAUFBAU

---

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde eine passende Konfiguration für die Prüfung der Thermo-elemente unter realen Bedingungen gesucht. Für diese Biegeversuchsreihe fertigte das LKI<sup>1</sup>, Versuchskörper an. Diese Probekörper sollen das Verhalten des Thermoelementes unter realen Bedingungen widerspiegeln. Abbildung 8 zeigt auszugsweise ein Exemplar der Serie 2. Damit genügend Daten für die Bemessung des Thermoelementes gesammelt werden können, wurden im Rahmen dieser Versuchsreihe verschiedene Probekörper hergestellt, die sich durch die Variation einiger Parameter voneinander abweichen. Die verschiedenen Varianten unterscheiden sich durch:

- Momenten-Querkraft-Verhältnisse (M/V)
- Verschiedene Plattenhöhen
- Anzahl der Elemente pro Versuchskörper
- Abstand der Element zueinander
- Länge der GFK-Schlaufe

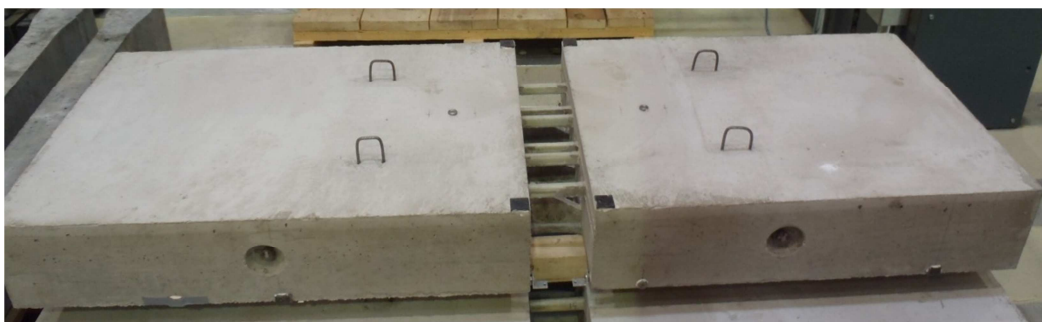


ABBILDUNG 8: VERSUCHSKÖRPER (MV2-1s)

Damit das reale Tragverhalten der Balkonplatte abgebildet werden kann, muss während der Versuchsdurchführung des Versuches im UHPC-Formteil eine Druckspannung und in der GFK-Schlaufe eine Zugspannung herrschen. Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, wird mit Hilfe eines Drei-Punkt-Biegeversuchs, diese Spannungen erzeugt. Den Bereich, an dem die Kraft  $F$  angreift, soll

---

<sup>1</sup> LKI-Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU-Graz

die Mauer darstellen, die in der praktischen Anwendung als Auflager für das Thermoelement dient. Die beiden Auflager an der Unterseite simulieren zum einen die Belastung auf der Auskragsseite (links) und zum anderen das Eigengewicht der Decke (rechts). Darüber hinaus kann anhand der Abstände  $a$  und  $b$ , zum Kraftangriffspunkt  $F$ , das oben erwähnte  $M/V$ -Verhältnis verändert werden. Dieses Verhältnis ergibt sich aus der Division des Momentes  $M$  mit der Querkraft  $V$ , für einen Kragträger mit einer konstanten Gleichlast, zu  $M/V = l/2$ . Mit  $l$  ist die Länge der Auskragsung des Systems, die während der Versuchsdurchführung simuliert wird, definiert.

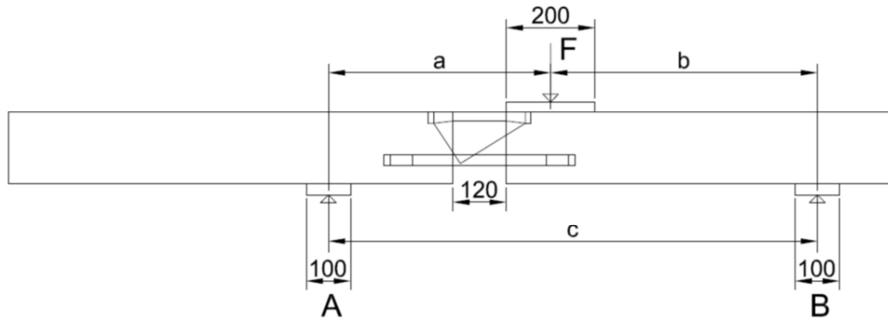


ABBILDUNG 9: VERSUCHSKONFIGURATION

Ein weiterer Punkt, der im Vorfeld noch erläutert werden muss, ist die Schnittebene, die für die Auswertung der gemessenen Daten herangezogen wird. Die Momenten-Krümmungs-, oder Winkelöffnungs-Beziehung, wird auf den Schnitt 2-2, also die Mitte der Dämmebene, bezogen. In Abbildung 10 sind die verschiedenen Schnittebenen grafisch dargestellt. Die oben erwähnten Momenten-Querkraft-Verhältnisse sind immer auf den Schnitt 4-4 bezogen. Für die Nachrechnung der Winkelöffnungs-Beziehung, werden die Kräfte aus den Schnitten 1 und 3 herangezogen.

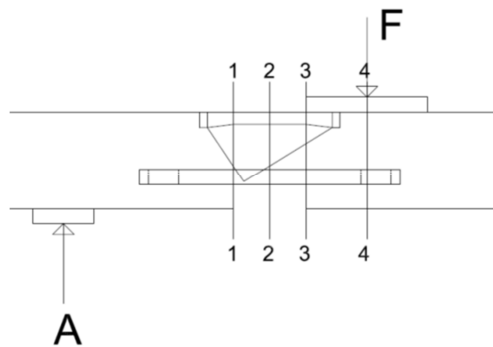


ABBILDUNG 10: SCHNITTEBENEN FÜR AUSWERTUNG

## 5.2 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

In diesem Kapitel werden die einzelnen Versuche die Rahmen der Biegeversuchsserie durchgeführt wurden näher erklärt. Hierbei kam es zu insgesamt 17 Bauteilprüfungen. In Tabelle 3 sind alle Versuchskörper dieser Serie mit ihren Bezeichnungen, M/V-Verhältnissen, Anzahl der Elemente  $n$ , sowie der Plattenhöhe  $h$  angeführt.

TABELLE 3: BIEGEVERSUCHSSERIE 1/2/3

Bez.	M/V	n	h[cm]	Bez.	M/V	n	h[cm]	Bez.	M/V	n	h[cm]
MV1-1	0,5	1	16	MV2-1	0,5	1	16	MV3-1	0,7	2	24
MV1-2	0,5	1	16	MV2-2	0,5	1	16	MV3-2	0,4	2	24
MV1-3	0,9	1	16	MV2-1s	0,9	3	20	MV3-3	0,7	2	20
MV1-4	0,9	1	16	MV2-2s	0,9	3	20	MV3-4	0,7	2	20
VV1-1	0,32	1	16	MV2-1b	0,9	3	20				
VV1-2	0,32	1	16	MV2-2b	0,9	3	20				
VV1-3	0,32	1	16								

### 5.2.1 VERSUCHSSERIE 1

Die Probekörper für die Biegeversuchsserie 1 wurden mit einer Plattenhöhe von 16 [cm] hergestellt. Die Abmessung der Breite beträgt für die Biegeversuchskörper 20 [cm], für die Gesamtlänge der verwendeten GFK-Schlaufe 75 [cm]. In Abbildung 11 sind ein Längs- und Querschnitt, sowie eine Draufsicht dargestellt. Bei den Biegeversuchen wurden pro M/V-Verhältnis immer zwei identische Probekörper geprüft.

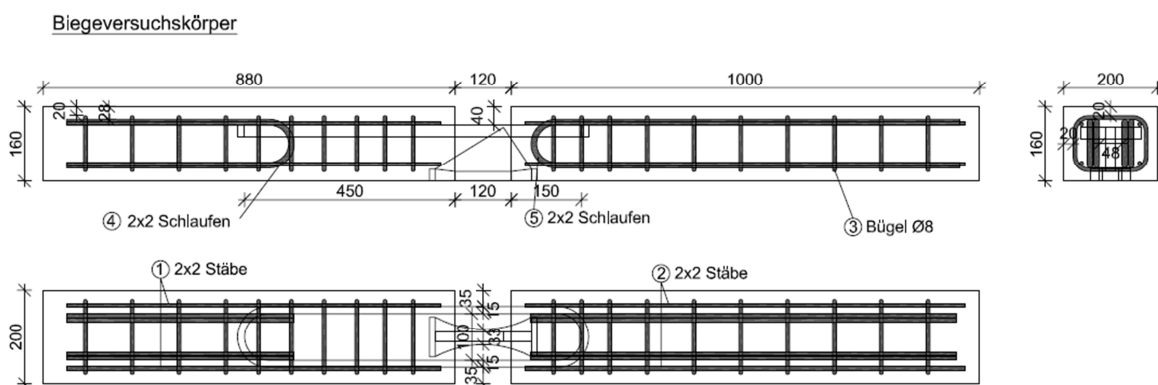


ABBILDUNG 11: BIEGEVERSUCHSKÖRPER SERIE 1

Im Rahmen der Biegeserie 1 wurden des Weiteren drei identische Schubversuchskörper hergestellt, welche in Abbildung 12 im Detail zu sehen sind. Die Plattenhöhe betrug ebenfalls 16 [cm], jedoch die Breite wurde durch die veränderte Anordnung der Bewehrung auf 25 [cm] vergrößert. Wie schon bei den Biegeversuchskörpern wurde bei den Schubversuchen dieselben GFK-Schlaufen eingebaut.

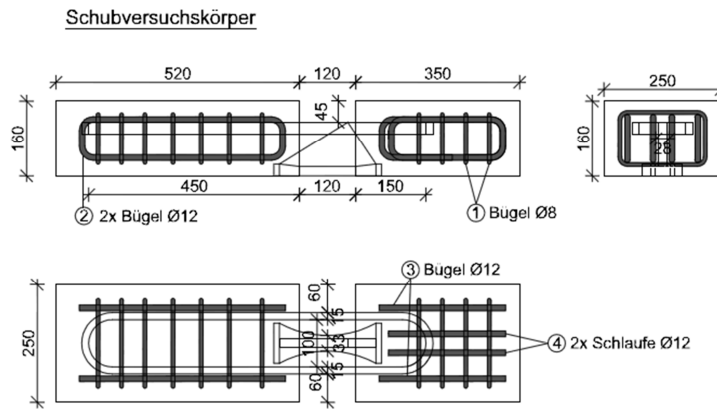


ABBILDUNG 12: SCHUBVERSUCHSKÖRPER SERIE 1

Geprüft wurden im Rahmen der Biegeversuche die Momenten-Querkraft-Verhältnisse 0,5 und 0,9, wobei ersteres einer Auskrügelungslänge von  $l = 1,0$  [m] und zweiteres einem  $l = 1,80$  [m] entspricht. Die Probekörper für die Schubversuche hatten ein M/V-Verhältnis von 0,32, dies ergibt ein  $l$  von 0,64 [m]. Des Weiteren unterschied sich auch die Bewehrungsführung der Biege- von den Schubversuchskörpern. Die Abmessung der einzelnen Abstände, wie sie in Abbildung 9 eingezeichnet sind, können aus Tabelle 4 entnommen werden. Mit Hilfe der Schubversuche soll das Verhalten bei übermäßiger Querkraftbeanspruchung simuliert werden, wie dies z.B. bei Konsolen der Fall ist.

TABELLE 4: ABMESSUNGEN FÜR M/V-VERHÄLTNISSE SERIE 1 UND 2

M/V	a [cm]	b [cm]	c [cm]
0,32	32	32	64
0,5	50	60	110
0,9	90	60	150

Durch das Anbringen von Messinstrumenten am Versuchskörper werden im Zuge der Prüfung unterschiedliche Daten gemessen. Abbildung 13 zeigt die Anordnung der einzelnen Instrumente, wobei zu erwähnen ist, dass z.B. die Dehnungsaufnehmer mit den blauen Ziffern auf der Vorderseite und jene mit den Roten auf der Hinterseite des Versuchskörpers angebracht sind. Die für die Auswertung relevanten Kanäle, welche einen Aufschluss über das Tragverhalten des Thermoelementes geben können, sind in Tabelle 5 angeführt.

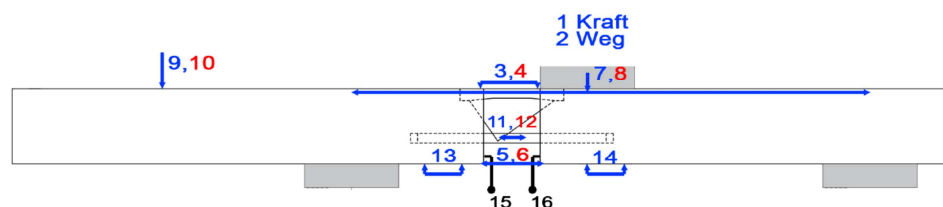


ABBILDUNG 13: KANALPLAN SERIE 1

TABELLE 5: KANALBESCHREIBUNG FÜR AUSWERTUNG SERIE 1 UND 2

Kanal	Bezeichnung	Messung	Einheit
1	Kraft	Pressenkraft	[kN]
3/4	DD1 Dehnungsaufnehmer	Normalbeton-Druck	[%o]
5/6	DD1 Dehnungsaufnehmer	Normalbeton Zug	[%o]
11/12	DD1 Dehnungsaufnehmer	GFK-Schlaufe	[%o]

### 5.2.2 VERSUCHSSERIE 2

Im Rahmen der Biegeversuchsserie 2 wurden drei verschiedenen Arten von Versuchskörpern hergestellt. Hierbei kam es zu einigen Veränderung gegenüber der Biegeserie 1. Eine wesentliche Veränderung ist der Einsatz einer kürzeren GFK-Schlaufe. Die Gesamtlänge  $l_{GFK}$  der neuen Schlaufe wurde von 75 [cm] auf 40 [cm] verkürzt, was zu einem Anstieg der Steifigkeit des Thermoelementes führen sollte. Außerdem wurde der Fasergehalt der Schlaufe erhöht, um eine höhere Tragfähigkeit zu erzielen. Die Höhe der zu prüfenden Platten wurde bei vier Versuchskörpern von 16 auf 20 [cm] erhöht.

Die Versuchskörper MV2-1 und MV2-2 blieben bis auf die kurze Schlaufe von den Abmessungen und der Bauart gleich wie jene der Biegeserie 1. Abbildung 14 zeigt den Bewehrungsplan der beiden Prüfkörper. Mit Hilfe dieser Probekörper soll der bereits erwähnte Zuwachs der Steifigkeit untersucht werden. Durch die Verkürzung der Schlaufe wurde auch die Einbindelänge um 1 [cm] verkürzt, dies sollte jedoch keine Auswirkungen auf das Tragverhalten des Thermoelementes haben sollte. Außerdem ist die GFK-Schlaufe auf beiden Seiten gleich tief in den Normalbeton eingebunden. Geprüft werden die zwei Versuchskörper mit einem M/V-Verhältnis von 0,5, wie bereits die Prüfkörper MV1-1 und MV1-2, damit ein Vergleich der beiden Varianten möglich ist. Die restlichen Prüfkörper dieser Versuchsserie 2 wurden mit einem M/V = 0,9 geprüft. Die Abstände der beiden Auflager A und B, für die Prüfkonfigurationen der einzelnen Verhältnisse sind Tabelle 4 zu entnehmen.

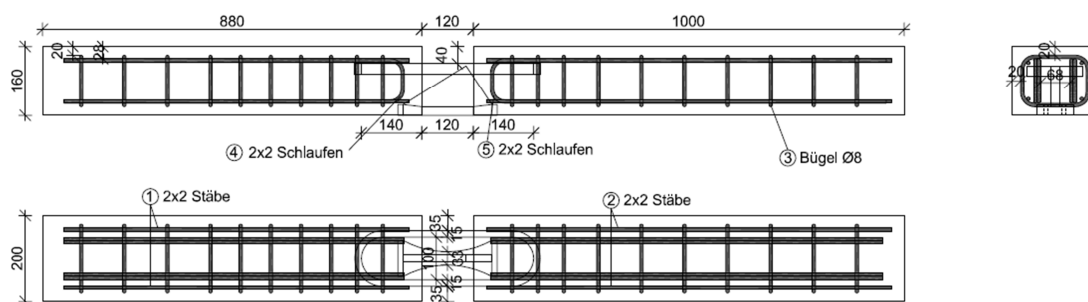


ABBILDUNG 14: BIEGEVERSUCHSKÖRPER MV2-1 / MV2-2

Die Herstellung der Versuchskörper MV2-1s und MV2-2s sowie MV2-1b und MV2-2b erfolgte mit einer Plattenhöhe von 20 [cm]. Der wesentliche Unterschied zu den vorigen Prüfkörpern ist, dass die Anzahl der Thermoelemente pro Versuchskörper von einem auf drei Elemente erhöht wurde. In Abbildung 15 sind diese Versuchskörper MV2-1s und MV2-2s dargestellt. Der Zusatz "s" in der

Beschriftung bezieht sich auf die Breite der Platte, die für diese Körper 70 [cm] beträgt. Durch die Anordnung der Elemente mit einem Schlaufenabstand von 2 [cm] zueinander, soll die Ausführung von 5 bis 6 Thermoelementen pro Meter simulieren. Das Hauptaugenmerk liegt während der Prüfung darauf, ob Risse in den Zwischenräumen entstehen, die durch eine Überlagerung der Spannungen der einzelnen Elemente hervorgerufen werden können. Damit bei der Messung der Stauchungen des Normalbetons keine zusätzlichen Einflüsse mit gemessen werden, wurde der Abstand vom Rand bis zum ersten Thermoelement mit 13,5 [cm] dimensioniert. Bei diesen Einflüssen, handelt es sich um zusätzliche Stauchungen auf der Druckseite, welche durch den UHPC-Druckteil hervorgerufen wurden, was auf den zu geringen Randabstand bei den Versuchskörpern mit nur einem Element, zurückzuführen ist.

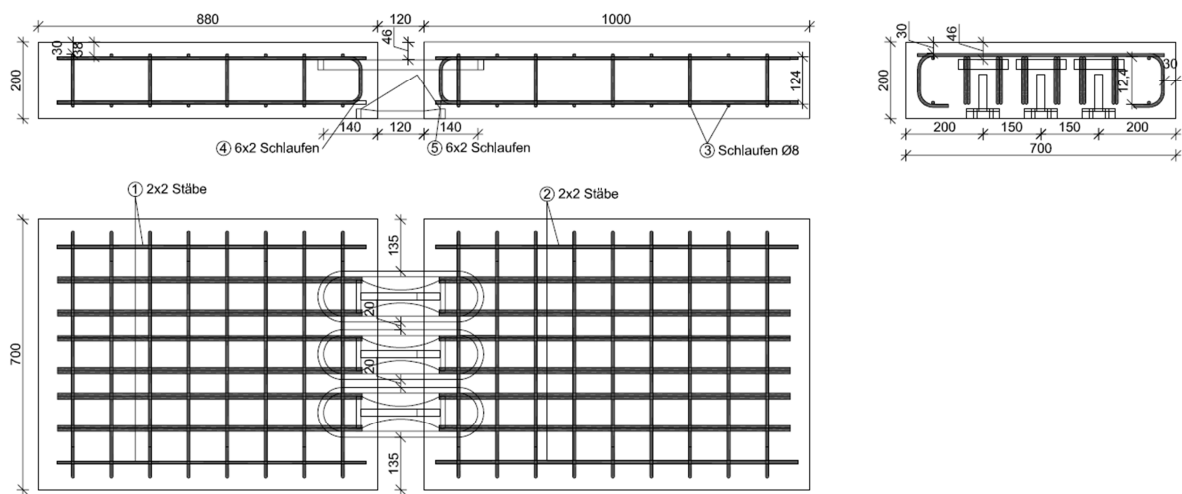


ABBILDUNG 15: BIEGEVERSUCHSKÖRPER MV2-1s / MV2-2s

Abbildung 14 zeigt die dritte Variante der Versuchskörper MV2-1b und MV2-2b die im Laufe der Biegeserie 2 geprüft wurden. Diese fokussiert einerseits die Plattenbreite und andererseits die Abstände der Elemente zueinander, was den Beschriftungszusatz "b" begründet. Durch die Erweiterung der zu prüfenden Plattenbreite von 70 [cm] auf 100 [cm] ist auch eine Vergrößerung des Abstandes der Elemente realisierbar. Der Schlaufenabstand beträgt bei diesem Probekörper 17 [cm] und ermöglicht ein Tragverhalten einer Balkonplatte mit drei oder vier Thermoelementen pro Meter. Auf Grund des großen Zwischenabstands, kann es zu keiner Überlagerung der Spannungen der einzelnen Elemente untereinander kommen.

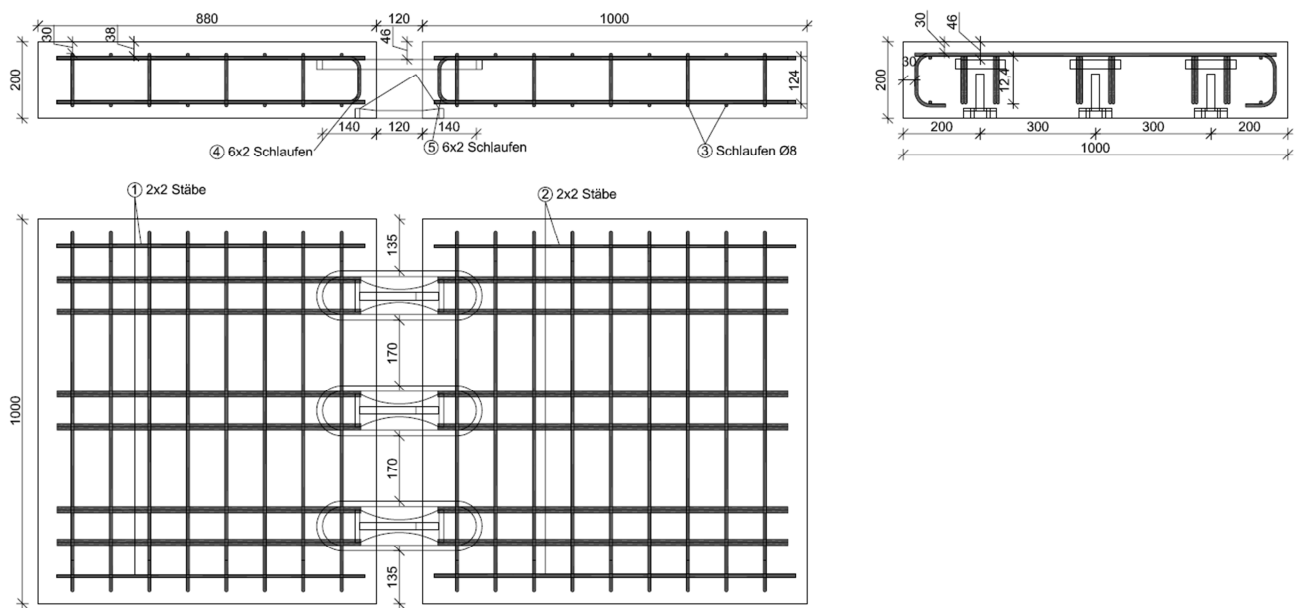


ABBILDUNG 16: BIEGEVERSUCHSKÖRPER MV2-1b / MV2-2b

Zur Versuchsdurchführung der Prüfkörper mit drei Thermoelementen ist noch zu erwähnen, dass die Pressenkraft zu gleichen Teilen in die einzelnen Thermoelemente eingeleitet wird. Dies wird mit Hilfe eines I-Profiles, mit drei Steifen realisiert. Für den Versuch muss das Profil so positioniert werden, dass sich die Steifen direkt über den Elementen befinden, wie in Abbildung 17 zu erkennen ist. Die Anordnung der Messinstrumente wurde analog der Biegeserie 1 ausgeführt, wie in Abbildung 13 gezeigt wird. Bei den Versuchskörpern mit den drei Elementen wurden die Dehnungsaufnehmer DD1 mit der Nummer 11 und 12, an der mittleren Schlaufe angebracht.



ABBILDUNG 17: LASTEINLEITUNG BEI 3 ELEMENTEN



### 5.2.3 VERSUCHSSERIE 3

Nach Beendigung der Biegeversuchsserie 1 und 2, in der die unterschiedlichsten Varianten in Bezug auf die Anzahl der Elemente sowie deren Plattenhöhen und der für die Versuchsdurchführung gewählten Momenten-Querkraft-Verhältnisse, wurde noch eine dritte Biegeversuchsserie geplant. Im Rahmen dieser dritten Versuchsserie wurden zwei Sonderformen der Anwendung des Thermoelementes geprüft. Bei diesen handelt es sich um einen Höhengsprung, und um eine indirekte Lagerung.

In Abbildung 18 ist der Bewehrungsplan für die Versuchskörper des Höhengsprunges dargestellt. Durch die Höhe des Sprunges von 60 [cm] gehört diese Variante schon zu den Sonderformen was die Ausführbarkeit betrifft. Aus diesem Grund wurde auch die Plattenhöhe bei diesen Versuchskörpern mit 24 [cm] ausgeführt, um genügend Widerstand durch den inneren Hebelarm zu erzeugen. Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, wurde die Anschlussbewehrung (3 $\varnothing$ 12 Bügel), auf der Sprungseite, mit zusätzlichen Haken  $\varnothing$ 8 stabilisiert. Eine weitere Besonderheit der Bewehrungsführung ist, dass die eben angesprochene Anschlussbewehrung nicht in die Schlaufen eingehängt wurde. Dadurch soll geprüft werden, ob die Kräfte die von der GFK-Schlaufe in den Normalbeton eingeleitet werden, auch über Druckstreben in die Bügel übertragen werden können. Des Weiteren ist die Anzahl der Thermoelemente wieder auf zwei pro Prüfkörper reduziert worden. Der Abstand der einzelnen Elemente zueinander ist gleich wie bei den Versuchskörpern MV2-1s und MV2-2s.

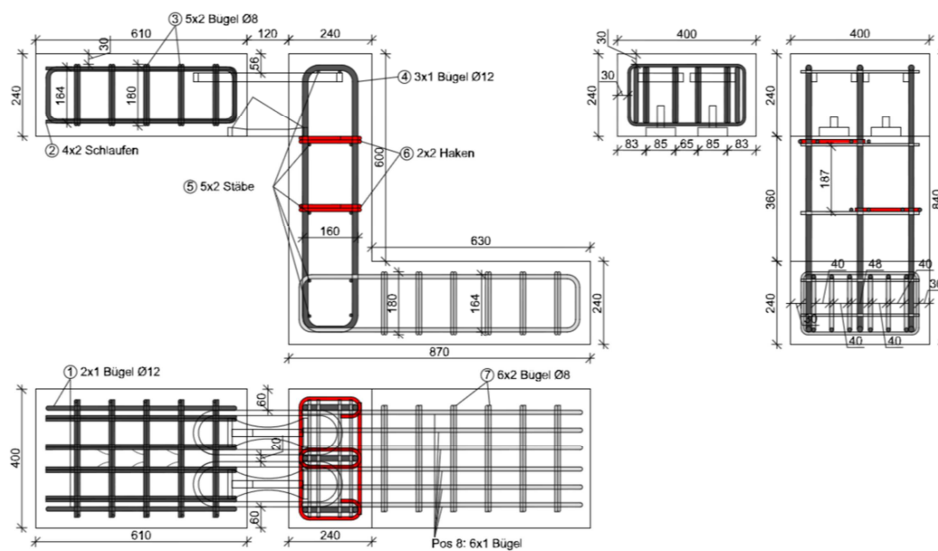


ABBILDUNG 18: BIEGEVERSUCHSKÖRPER MV3-1 UND MV3-2

Bei der indirekten Lagerung handelt es sich um einen Variante, wo sich die thermische Trennung nicht im Bereich der Aufmauerung, sondern in der Auskragung befindet. Abbildung 19 veranschaulicht diese Ausführung anhand der Bewehrungspläne. Um das Prinzip der indirekten Lagerung besser zu veranschaulichen, wurden die Auflagerpunkte (A und B) mit eingezeichnet. Die Schwierigkeit bei dieser Variante ist, dass die Kräfte die ansonsten von der direkten Auflagerung (Mauerwerk) übernommen werden, in diesem Fall mittels Bewehrung bis in den Auflagerbereich gebracht werden müssen. Für die Versuchsdurchführung wurde der Lasteinleitungspunkt um

10 [cm] nach hinten verschoben. Aufgrund des geringen Abstandes zur Lastplatte, wurde auf die Bewehrung für die Lastweiterleitung verzichtet.

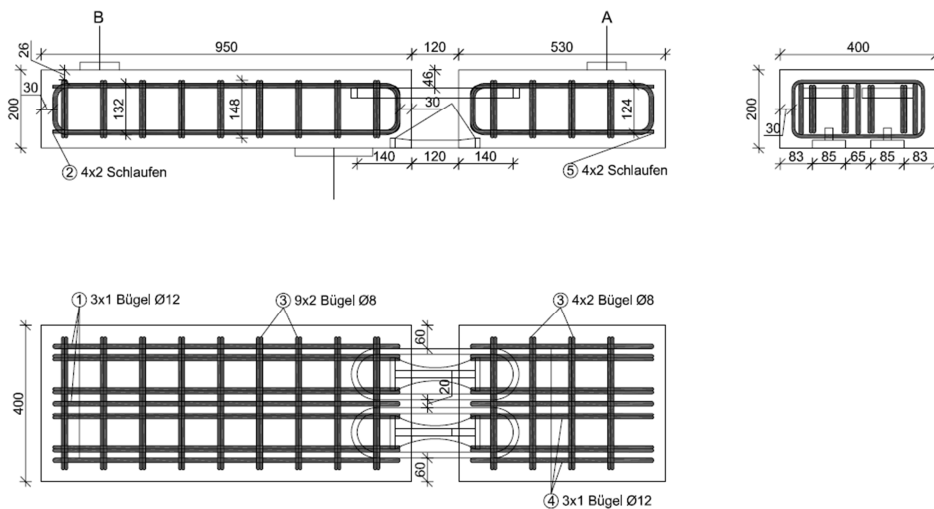


ABBILDUNG 19: BIEGEVERSUCHSKÖRPER MV3-3 UND MV3-4

Die Prüfkongfiguration in Bezug auf das Momenten-Querkraft-Verteilung sieht ein Verhältnis von  $M/V = 0,7$  vor. Lediglich für den Prüfkörper MV3-2 wurde das  $M/V$  Verhältnis auf  $0,4$  geändert. Auf den Grund dieser Maßnahme wird in Kapitel 5.3.3 noch genauer eingegangen. Die sich dadurch ergebenden Abstände der einzelnen Auflagerpunkte zueinander sind aus Tabelle 6 zu entnehmen.

TABELLE 6: ABMESSUNGEN FÜR  $M/V$ -VERHÄLTNISSE SERIE 3

$M/V$	a [cm]	b [cm]	c [cm]
0,4	40	40	80
0,7	70	60	130

Für die Biegeserie 3 wurden die Kanäle der einzelnen Messinstrumente geändert und zusätzliche Dehnungsaufnehmer angebracht (Abbildung 20). Zusätzlich zu den Werten die bereits in der Serie 1 und 2 gemessen wurden, werden hier noch Dehnungsmessungen an beiden UHPC-Druckteilen sowie an beiden GFK-Schlaufen durchgeführt. Außerdem wurden für diese Serie noch Dehnungsmessstreifen (DMS) an den UHPC-Schubkeilen angebracht, welche die Dehnungen in den drei Hauptrichtungen messen. Damit die Verzerrungen der DMS ohne störende Einflüsse gemessen werden können, dürfen im Laufe der Versuchsdurchführung an dieser Stelle keine Risse entstehen. Die eben erwähnte Dehnungsrosette wurde jedoch nur beim Prüfkörper MV3-1 auf beiden UHPC-Formteilen angebracht. Für die restlichen Versuchskörper kamen die Kanäle 31, 32 und 33 zum Einsatz. Die Beschreibungen der einzelnen Kanäle sind in Tabelle 7 angeführt.

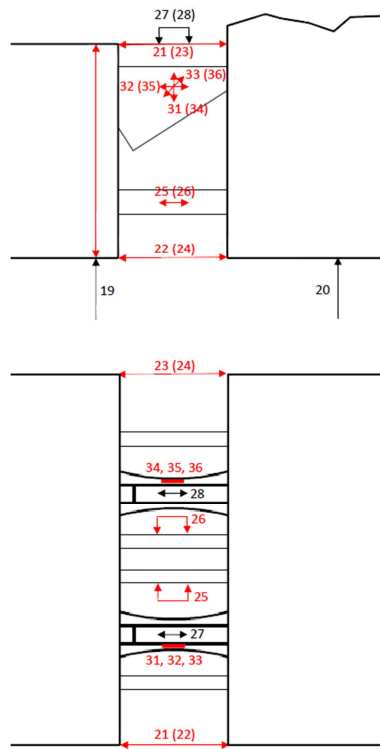


ABBILDUNG 20: KANALPLAN SERIE 3

TABELLE 7: KANALBESCHREIBUNG FÜR AUSWERTUNG SERIE 3

Kanal	Bezeichnung	Messung	Einheit
	Kraft	Pressenkraft	[kN]
21/23	DD1 Dehnungsaufnehmer	Normalbeton-Druck	[‰]
22/24	DD1 Dehnungsaufnehmer	Normalbeton Zug	[‰]
25/26	DD1 Dehnungsaufnehmer	GFK-Schlaufe	[‰]
27/28	DD1 Dehnungsaufnehmer	UHPC-Druckteil	[‰]
31/34	DMS Dehnungsmessstreifen	vertikal Dehnung UHPC	[‰]
32/35	DMS Dehnungsmessstreifen	horizontal Dehnung UHPC	[‰]
33/36	DMS Dehnungsmessstreifen	45° Dehnung UHPC	[‰]

## 5.3 VERSUCHSAUSWERTUNG

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Darstellung der einzelnen Biegeversuchsserien nach der Versuchsdurchführung. Hierbei wird auf das Bruchverhalten der einzelnen Prüfkörper genauer eingegangen.

### 5.3.1 VERSUCHSSERIE 1

In Tabelle 8 sind für die einzelnen Versuchskörper die Bruchlasten  $F_{U,V}$  sowie die dazugehörigen Momente  $M_U$  und Querkräfte  $V_U$  für die Versuchsserie 1 angegeben. Außerdem ist die Art und Weise, wie jeder einzelne Probekörper versagte, angeführt.

TABELLE 8: ERGEBNISSE SERIE 1

Bezeichnung	$M/V_{3-3}$	n [Stk]	$F_{U,V}$ [kN]	$M_{U,3-3}$ [kNm]	$V_{U,3-3}$ [kN]	Versagensart
MV1-1	0,4	1	46,3	10,1	25,3	Lasteinleitung NB
MV1-2	0,4	1	44,8	9,8	24,4	Lasteinleitung NB
MV1-3	0,8	1	24,4	7,8	9,76	UHPC Druckteil
MV1-4	0,8	1	25,8	8,3	10,32	UHPC Druckteil
VV1-1	0,22	1	86,3	9,5	43,2	UHPC-Schubkeil
VV1-2	0,22	1	97,5	10,7	48,8	Schub Einleitung UHPC
VV1-3	0,22	1	96,6	10,6	48,3	UHPC-Schubkeil

Damit das Trag- und Bruchverhalten des Thermoelementes unter realen Bedingungen geprüft werden kann, wurden die Versuchskörper so konzipiert, dass es zu einem Versagen des UHPC-Formteils kommt. Abbildung 21 veranschaulicht das Versagen der Prüfkörper MV1-1 und MV1-2 an der Lasteinleitungsstelle der Presse, die zugehörigen Ergebniswerte sind in Tabelle 8 ersichtlich.

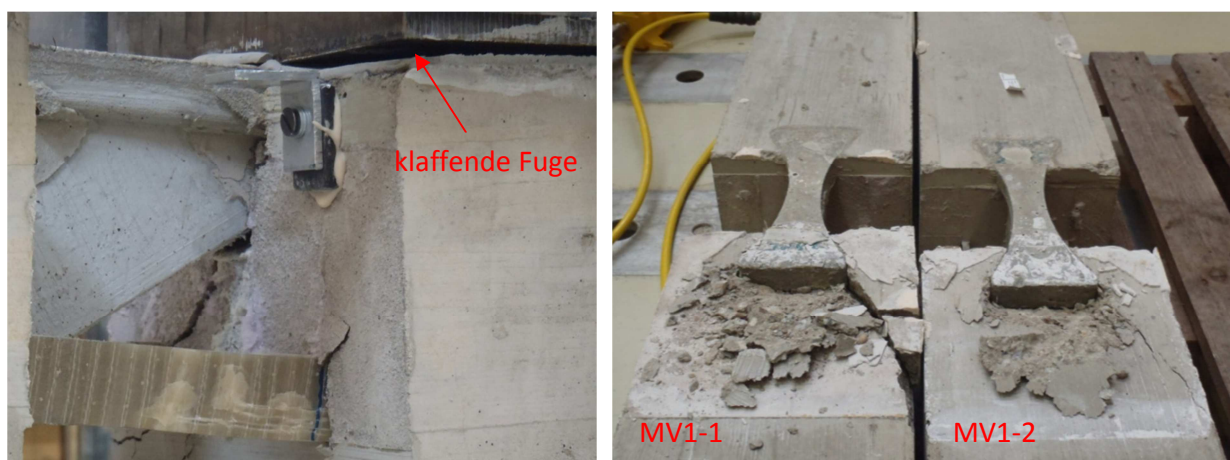


ABBILDUNG 21: VERSAGENSBIID MV1-1 UND MV1-2

Das Versagen von MV1-1 und MV1-2 ist darauf zurückzuführen, dass sich durch das Aufbringen der Pressenkraft an der Stelle der Lastplatte, eine klaffende Fuge öffnete. Diese hatte zur Folge, dass sich das UHPC-Formteil aus dem Normalbeton schieben konnte, indem ein Normalbetonkeil an der Lasteinleitungsfläche hinaus gedrückt wurde. Dieses Verhalten begründet sich darin, dass durch das Fehlen der Auflagerfläche kein mehraxialer Spannungszustand aufgebaut werden und der Normalbeton diese zusätzlichen Spannungen, nicht aufnehmen konnte und daher in diesem Bereich versagte. Abbildung 22 zeigt das Versagensbild der Versuchskörper MV1-3 und MV1-4, wenn es zu keiner Fugenbildung im Bereich der Krafteinleitung kommt. Es ist deutlich das Versagen am UHPC-Druckteil erkennbar.



ABBILDUNG 22: VERSAGENSBIKD MV1-3 (LI) UND MV1-4 (RE)

### 5.3.2 VERSUCHSSERIE 2

Die Ergebnisse die sich anhand der Versuchsdurchführung der Biegeserie 2 ergeben haben, sind der Tabelle 9 zu entnehmen. Da es in dieser Serie unterschiedliche Elementanzahlen gegeben hat, beziehen sich die Werte immer auf ein Element. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass bis auf den Versuchskörper MV2-1, alle auf Druck im UHPC-Druckteil versagten. Bei Prüfkörper MV2-1 kam es zu einem Ausschleiben des UHPC-Formteils an der Stelle an dem die Pressenkraft angelegt wurde, identisch wie bei den Versuchskörpern MV1-1 und MV1-2 aus Serie 1.

TABELLE 9: ERGEBNISSE BIEGESERIE 2

Bezeichnung	$M/V_{3-3}$	n [Stk]	$F_{U,V}$ [kN]	$M_{U,3-3}$ [kNm]	$V_{U,3-3}$ [kN]	Versagensart
MV2-1	0,4	1	63,7	10,1	25,3	Lasteinleitung NB
MV2-2	0,4	1	60,0	9,8	24,4	UHPC Druckteil
MV2-1s	0,8	3	62,5	19,9	24,9	UHPC Druckteil
MV2-2s	0,8	3	64,8	20,7	25,9	UHPC Druckteil
MV2-1b	0,8	3	58,3	18,6	23,3	UHPC Druckteil
MV2-2b	0,8	3	61,2	19,6	24,5	UHPC Druckteil

Abbildung 23 zeigt die Versuchskörper MV2-1 und MV2-2 nach der Versuchsdurchführung, und die dadurch entstandenen Versagensbilder. Anhand von Prüfkörper MV2-2 ist zu erkennen, dass

es direkt in der Mitte des UHPC-Druckteils versagte. Hingegen stellte sich bei Mv2-1s wieder eine klaffende Fuge zwischen dem Versuchskörper und der Lastplatte ein.

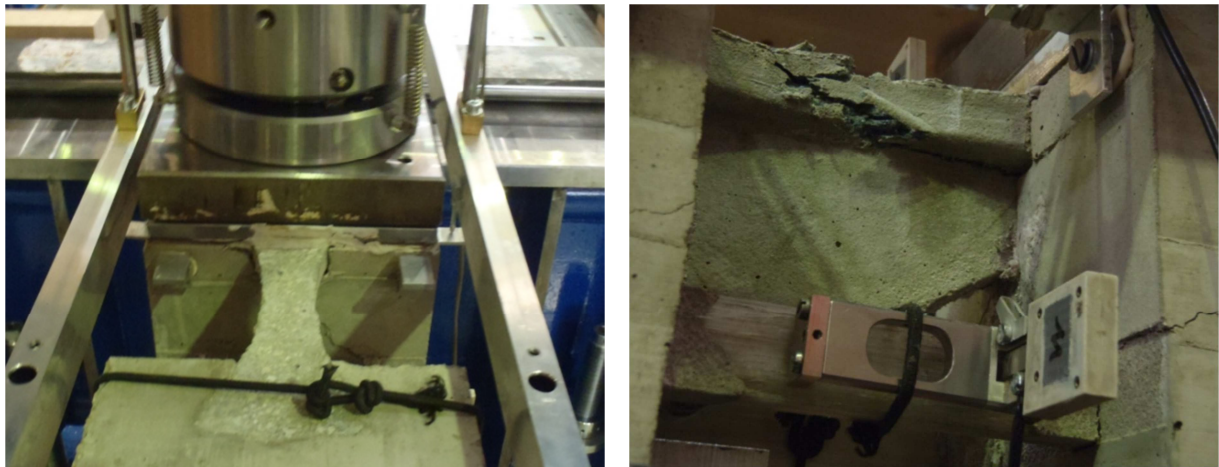


ABBILDUNG 23: VERSAGENSBLDER MV2-1 (LI) UND MV2-2 (RE)

In Abbildung 24 sind die Prüfkörper MV2-1s und MV2-2s nach der Versuchsdurchführung dargestellt, dabei ist zu erkennen, dass bei beiden Körpern das Versagen bei allen drei Elementen im Druckbereich des UHPCs erfolgte. Es waren auch keine Auswirkung im Laufe des Versuchs zuerkennen, auf Grund der geringen Abstände der Elemente zueinander.

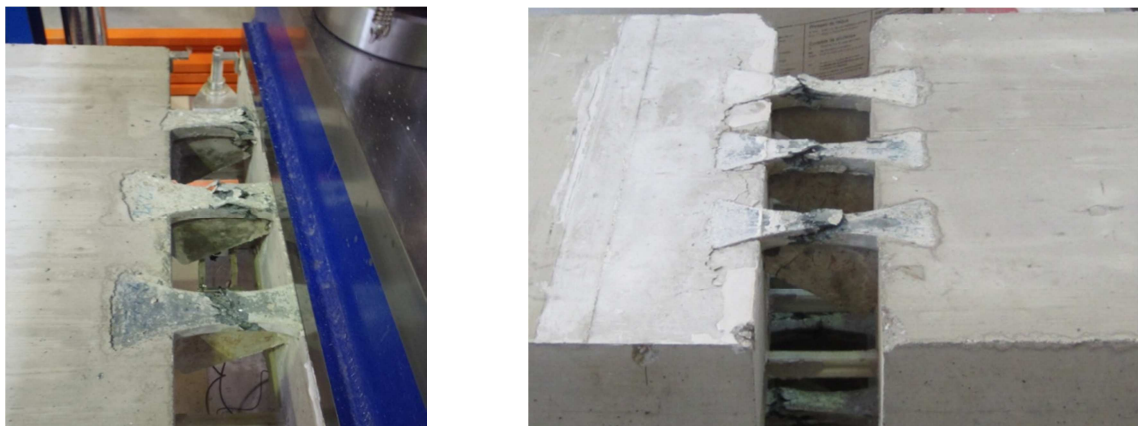


ABBILDUNG 24: VERSAGENSBLD MV2-1s (LI) UND MV2-2s (RE)

Bei den Versuchskörpern MV2-1b und MV2-2b stellte sich nach Erreichen der maximalen Pressenkraft ebenfalls ein Versagen in der Druckzone des UHPCs ein, wie bei allen anderen Prüfkörpern die mit drei Elementen ausgeführt wurden. Abbildung 25 zeigt den Prüfkörper MV2-1b nach dem Versagen. Anhand des Risses im UHPC-Schubkeil ist die Neigung der Druckstrebe, welche sich im Tragzustand mit ungefähr 25 [°] einstellt, erkennbar.

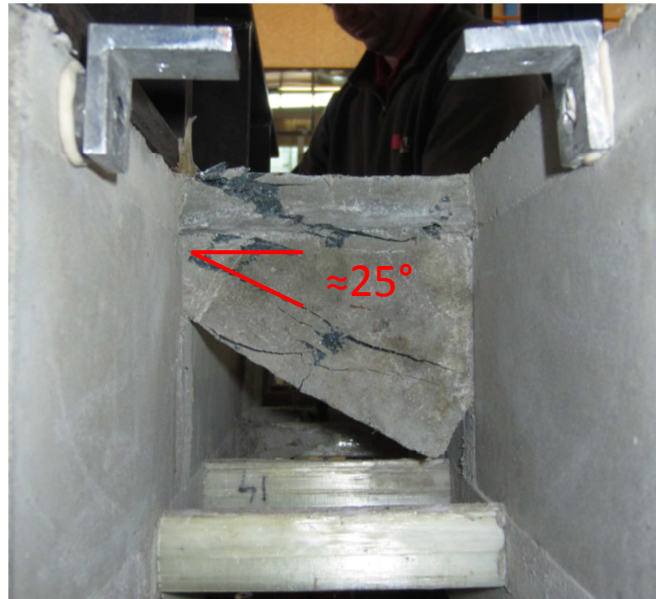


ABBILDUNG 25: DRUCKSTREBENWINKEL MV2-1b

### 5.3.3 VERSUCHSSERIE 3

Wie bereits bei den vorherigen Biegeserien, sind auch bei dieser Serie die Ergebnisse, welche in Tabelle 10 angeführt sind, pro Element angegeben. Diese Maßnahme dient der besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsserien untereinander.

TABELLE 10: ERGEBNISSE BIEGESERIE 3

Bezeichnung	M/V	n [Stk]	$F_{U,V}$ [kN]	$M_{U,2-2}$ [kNm]	$V_{U,2-2}$ [kN]	Versagensart
MV3-1	0,7	2	50,0	12,1	23,1	Auszug d. GFK-Schlaufe
MV3-2	0,4	2	71,3	7,9	35,7	UHPC Schubkeil
MV3-3	0,7	2	36,0	8,6	16,6	Lasteinleitung NB
MV3-4	0,7	2	30,3	7,2	13,9	Lasteinleitung NB

Abbildung 26 zeigt die beiden Versuchskörper MV3-1 und MV3-2 nach der Versuchsdurchführung. Der Prüfkörper MV3-1 versagte durch den Ausbruch eines Betonkeils, wie am linken Bild zu erkennen ist. Dies ist auf die Tatsache zurück zu führen, dass die bereits angesprochen Anschlussbewehrung nicht in die GFK-Schlaufe eingehängt wurde. Ein weiterer Grund war das hohe M/V-Verhältnis von 0,7. Damit ist gemeint, dass der Anteil des Momentes für diese Versuchsaufbau zu hoch gewesen ist, den allgemein kann gesagt werden, dass bei reiner Biegung das M/V gegen unendlich und bei reinem Schub gegen null geht. Die Druckstreben, welche die Kräfte im Normalbeton an die Bewehrung weiterleiten sollten, wurden nicht aktiviert. Daher kam es in diesem Bereich zu einer Überbeanspruchung des Normalbetons. Auf Grund dessen, wurde für den zweiten Versuchskörper MV3-2 das M/V-Verhältnis von 0,7 auf 0,4 reduziert. Dieses M/V-Verhältnisses reduzierte den Anteil des Biegemomentes und erhöhte den der Querkraft. Durch diese Maßnahmen kam es beim zweiten Versuchskörper nicht zum selben Versagen kommt, wie

bei MV3-1, sondern zu einem Bruch am UHPC-Schubkeil, wie am rechten Bild in Abbildung 26 zu erkennen ist. Der Grund des Versagens ist auf die zuvor erwähnte Erhöhung der Querkraft zurückzuführen. Aus dieser Versuchsvariante geht also hervor, dass es zwingend notwendig ist die Anschlussbewehrung in die GFK-Schlaufe einzuhängen, um das Ausziehen der Schlaufe zu verhindern. Die Auswertung der Neigung des Bruches durch den UHPC ergab einen Winkel  $\theta$  von rund 30 [°].



ABBILDUNG 26: VERSAGENSBIKD MV3-1 (LI) UND MV3-2 (RE)

Anhand der Abbildung 27 ist ein identes Bruchbild der beiden Prüfkörper MV3-3 und MV3-4 mit der indirekten Lagerung zu erkennen. Durch das Fehlen der Auflagerbank ist es nicht möglich die gesamten Kräfte in den Normalbeton einzuleiten. Aufgrund der Überbelastung an der Lasteinleitungsfläche zwischen dem UHPC und dem Normalbeton kommt es zu einer Abplatzung des Normalbetons, wodurch es dem UHPC-Formteil ermöglicht wurde, sich hinauszuschieben. Um dies zu vermeiden, müssen bei einer indirekten Lagerung Bügel angeordnet werden, die das UHPC-Formteil umfassen und somit die ankommende Querkraft in die Platte einleiten. Eine mögliche Ausführungsvariante ist in Kapitel 8.4 genauer dargestellt.



ABBILDUNG 27: VERSAGENSBIKD MV3-3 UND MV3-4



## 6 TRAGMODELL / LAST-KRAFT-FLUSS

---

Das statische System einer Balkonplatte kann mit Hilfe eines Kragträgers mit einer Einspannung im Auflagerbereich beschrieben werden. Die Schnittgrößen, die bei einwirkender Gleichlast auftreten sind ein Moment und eine Querkraft. Bei langen Balkonplatten ist der maßgebende Bemessungslastfall  $M_{\max} + V_{\text{zug}}$  und bei kurzen Platten, wie z.B. Konsolen ist es  $V_{\max}$  und  $M_{\text{zug}}$ . Die auftretenden Schnittgrößen müssen vom Thermoelement über die Dämmebene sicher in das Bauwerk eingeleitet werden.

### 6.1 KRAFTAUFTeilUNG

---

Im folgenden Kapitel wird der Kraftfluss im Thermoelemente näher beschrieben, da dieser bei der Bemessung von besonderer Bedeutung ist. Die durch Belastung der Kragplatte entstehenden Kräfte werden über Druck- und Zugstreben von den außen liegenden Konstruktionsteilen in die innen liegenden Bauteile geleitet. In Abbildung 28 ist die Aufteilung der einwirkenden Kräfte anhand der Bauteilgeometrie, der Anordnung der Schlaufe und des UHPC-Elementes zu sehen. Das Moment  $M$  wird dabei in ein Kräftepaar zerlegt. Die Zugkraft  $T_1$  wird dabei über die Schlaufe und die Druckkraft  $C_2$  über das UHPC-Formteil übertragen. Die Größe der zu übertragenden Normalkräfte ergibt sich aus der Größe des Momentes und dem zugrundeliegenden Hebelarm  $z$ . Die Querkraft  $V$  wird über den UHPC-Schubkeil übertragen. Die Strebenkraft  $V/\sin(\theta)$  ist abhängig von der einwirkenden Querkraft und dem sich einstellenden Druckstreben-Neigungswinkel  $\theta$ . Dieser Winkel ist von der Höhe der Balkonplatte abhängig und kann geometriebedingt maximal einen Wert von  $32^\circ$  annehmen (Abbildung 28). Mit zunehmender Höhe der Balkonplatte, und einhergehender Vergrößerung des inneren Hebelarm  $z$ , wird der Druckstrebenneigungswinkel  $\theta$  immer größer.

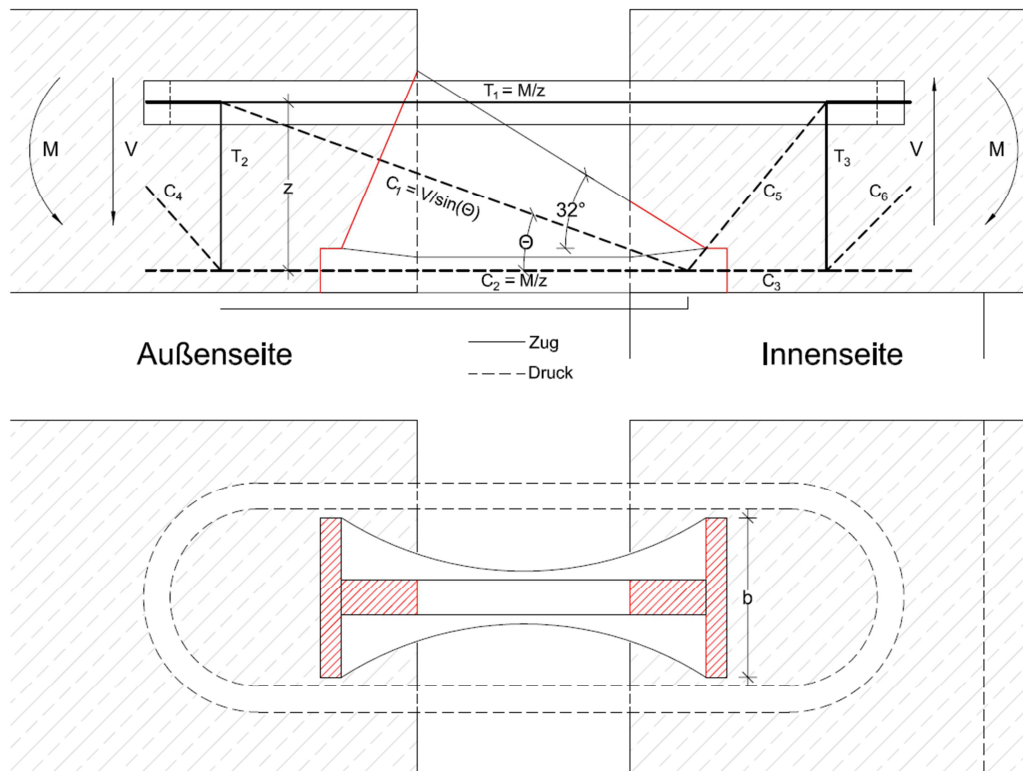


ABBILDUNG 28: BAUTEILGEOMETRIE, AUFRISS OBEN, GRUNDRISS UNTEN

## 6.2 KRAFTEINLEITUNG IN NORMALBETON

Die Übergabe der inneren Kräfte der Kragplatte in die tragenden Elemente des Thermokorbes, sowie die Weiterleitung der Kräfte in die anschließende Konstruktion, sind von wesentlicher Bedeutung. Die Druckkräfte werden in erster Linie über die Berührungsflächen des UHPC-Druck-Schubteils mit dem angrenzenden Normalbeton weitergeleitet. Die Zugkraft in der GFK-Schleife wird über Druckstreben an die Bewehrungsstäbe, welche die GFK-Schleife umschließen, eingeleitet.

### 6.2.1 UHPC-FORMTEIL-NORMALBETON

Abbildung 29 zeigt die unterschiedlichen Flächen, mit denen der UHPC-Druck-Schubteil an der Innenseite mit dem Normalbeton in Verbindung steht. Die zu übertragende Normalspannung setzt sich einerseits aus dem Anteil des Momentes und andererseits aus jenem der Querkraft zusammen, und wird über die Stirnfläche des UHPC in den Normalbeton übertragen.

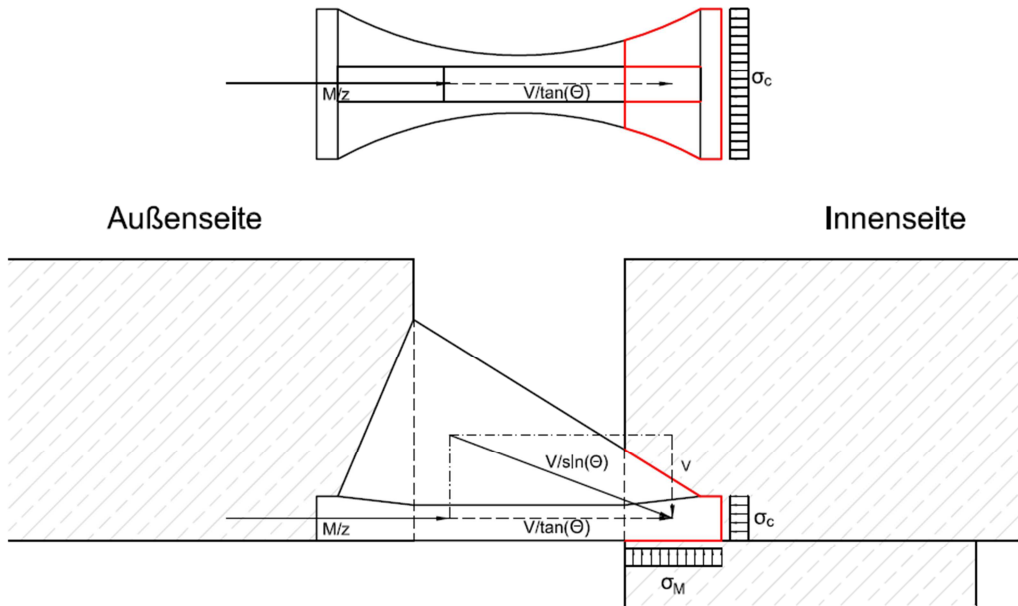


ABBILDUNG 29: KRAFTEINLEITUNG-NORMALBETON

In Abbildung 30 sind die einzelnen Anteile, welche sich aus den Einwirkungen ergeben dargestellt. Hierbei erkennt man, dass ein Teil der Schubkraft direkt über die Berührungsfläche des einbetonierten Schubkeils in den Normalbeton übertragen wird. Der Anteil des Biegemomentes, in der Abbildung mit den roten Linien dargestellt, gelangt ausschließlich über den UHPC-Druckteil in den Normalbeton. Die blauen Linien zeigen die Querkraft, welche über den UHPC-Schubkeil in den UHPC-Druckteil geleitet werden. Die grün gezeigte Kraft resultiert aus den Normalkraftanteil der Querkraft und dem Moment.

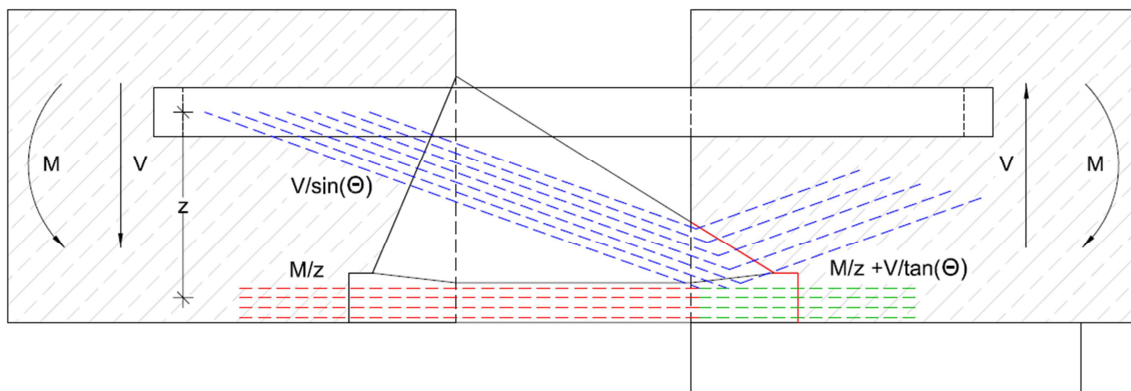


ABBILDUNG 30: KRAFTAUFTeilUNG

## 6.2.2 SCHLAUFE-NORMALBETON

Von der GFK-Schleife werden die Zugkomponenten der auftretenden Schnittgrößen in den Normalbeton eingeleitet. Wie in Abbildung 31 zu sehen ist, greift der Horizontalanteil der Querkraft im Schwerpunkt des Schlaufenradius an. Abgegeben werden die Kräfte, wie auch schon beim UHPC, über Flächenpressung zwischen der GFK-Schleife und dem Normalbeton. Bereits bei einer geringen Laststufe geht die Haftreibung zwischen der GFK-Schleife und dem Normalbeton verloren und geht in einen Reibverbund über, welcher in der Bemessung vernachlässigt wird. Der Übergang zwischen Haft- und Reibverbund hat einen direkten Einfluss auf die Biegesteifigkeit. Dies ist in Abbildung 35 zuerkennen.

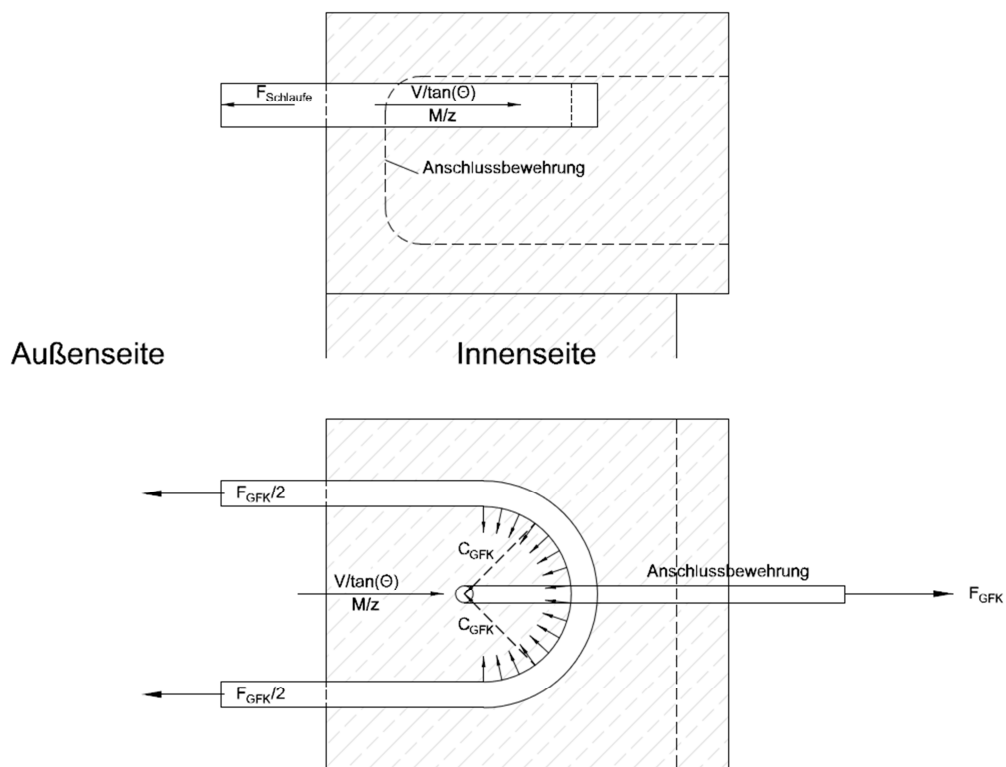


ABBILDUNG 31: KRAFTEINLEITUNG DER SCHLAUFE

Durch die Umlenkräfte entstehen Betonspannungen, die vom der Größe des Schlaufenradius abhängig sind. Aufgrund dieser Spannung wird im Beton eine Druckstrebe  $C_{GFK}$  aktiviert, welche die entstehenden Kräfte an die Anschlussbewehrung übergibt. Mit Hilfe der Bewehrung werden die auftretenden Zugkräfte in den Normalbeton weitergeleitet. Damit diese Krafteinleitung sichergestellt werden kann, muss die Anschlussbewehrung die GFK-Schleife umfassen.

### 6.3 KINEMATISCHE REAKTIONSGRÖßEN IM THERMOELEMENT

Um bei der Bemessung auch die Verformungen, hervorgerufen durch die zusätzliche Starrkörperverdrehung, und die damit erforderliche Überhöhung berechnen zu können, muss im Vorfeld das kinematische Verhalten des Thermoelementes genauer betrachtet werden. Die Krümmung in einem Schnitt kann allgemein mit

$$\kappa = \frac{|\epsilon_T| + |\epsilon_C|}{z} \quad (1)$$

angegeben werden. Die Dehnungen  $\epsilon_T$  auf der Zugseite, addiert mit den Stauchungen  $\epsilon_C$  auf der Druckseite, bezogen auf den inneren Hebelarm  $z$ , ergibt die mittlere Krümmung  $\kappa$ , wie in Abbildung 32 zu erkennen ist.

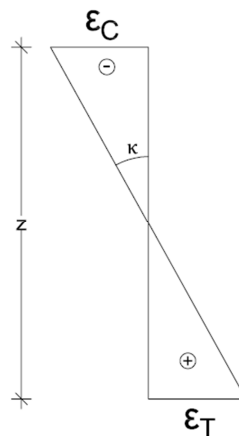


ABBILDUNG 32: DEHNUNGSZUSTAND MIT GEZEIGTER KRÜMMUNG

Bei der Bemessung des Thermoelementes ist die mittlere Krümmung des Bauteils von entscheidender Bedeutung. Diese setzt sich aus der Wirkung von Moment und Querkraft auf den Normalbeton und dem ultrahochfesten Beton zusammen. Die Verschiebung der Normalbetonstirnflächen der Dämmebene ergibt sich zum einen aus der Stauchung des UHPCs, und zum anderen aus der Stauchung infolge des "Eindrückens" der UHPC-Formteile in den Normalbeton. Werden all diese Effekte pauschal der Dämmebene zugewiesen, ergibt sich die mittlere Stauchung  $\epsilon_{TEMc}$  zu:

$$\epsilon_{TEMc} = \frac{N_M}{A_2 * E_{UHPC}} + \frac{N_M}{A_4 * E_{NC}} + \frac{N_{V,H}}{A_4 * E_{NC}} \quad (2)$$

$\epsilon_{UHPC}$	Dehnung des Betons an der Druckseite [‰]
$N_M$	Normalkraftanteil zufolge Moment [kN]
$N_{V,H}$	Normalkraftanteil zufolge Querkraft [kN]
$A_2$	mittlere Fläche des UHPC-Druckteils [m <sup>2</sup> ]
$A_{3a}$	Fläche bei dem der UHPC in den Normalbeton eindringt

$A_{3b}$	Fläche bei dem der UHPC-Schubkeil in den Normalbeton eindringt
$E_{UHPC}$	E-Modul ultrahochfester Beton [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_{NC}$	E-Modul Normalbeton [N/mm <sup>2</sup> ]

In Abbildung 33 sind die in Formel (2) verwendeten Flächen grafisch dargestellt.

Die mittlere Dehnung  $\varepsilon_{TEMT}$  wird wie folgt ermittelt:

$$\varepsilon_{TEMT} = \frac{N_M + N_{V,H}}{EA_{GFK}} \cdot \frac{l_{GFK,red}}{d_{Te}} \quad (3)$$

$\varepsilon_{GFK}$	Dehnung der Schlaufe an der Zugseite [%]
$EA_{GFK}$	Dehnsteifigkeit der GFK-Schlaufe [kN]
$l_{GFK,red}$	reduzierte Schlaufenlänge [mm] (siehe Abbildung 34 )
$d_{De}$	Dicke der Dämmebene [mm]

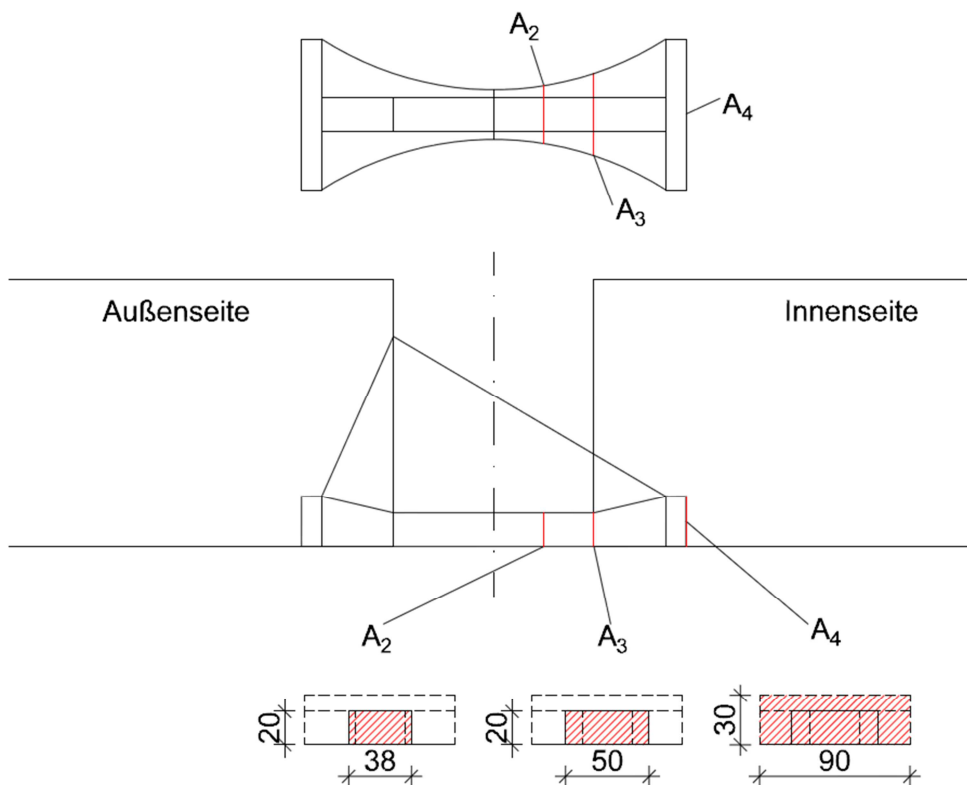


ABBILDUNG 33: BESCHREIBUNG DER FLÄCHEN

Im Gegensatz zur Schlaufe ist für den UHPC-Bauteil als Bezugslänge immer die Dicke der Dämmebene ausschlaggebend. Der Grund hierfür ist, dass das mittlere Verhalten des Thermoelements für die Ermittlung der Starrkörperverdrehung von Interesse ist. Die Bezugslänge der Schlaufe hingegen ändert sich je nach Art des Verbundes, der sich zwischen der GFK-Schlaufe und dem Normalbeton einstellt. Befindet sich die Schlaufe noch im Haftverbund, so kann sie sich ebenfalls

nur auf die Dicke der Dämmebene  $d_{De}$  dehnen. Sobald nur mehr der Reibverbund wirkt, der im allgemeinen sehr klein ist, dehnt sie sich auf die reduzierte Schlaufenlänge  $l_{GFK,red}$ , wie aus Abbildung 34 zu entnehmen ist. Mit Hilfe der Formeln (2) und (3) soll die Richtigkeit, in Bezug auf den Kraftfluss, der sich im Thermoelement einstellt, kontrolliert werden.

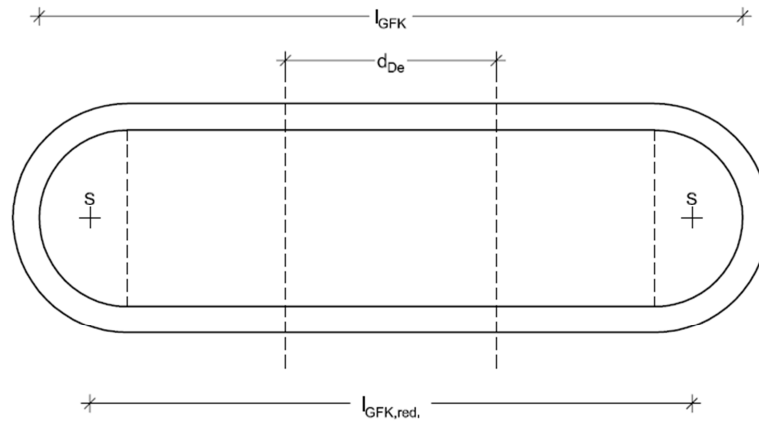


ABBILDUNG 34: SCHLAUFENABMESSUNGEN

## 6.4 VERSUCHSERGEBNISSE

Die Ergebnisse die in diesem Kapitel gezeigt werden, stützen sich auf die gemessenen Daten der einzelnen Bauteilprüfungen. Gezeigt werden für die verschiedenen Versuchsserien die Momenten-Krümmungs-Beziehung des Thermoelementes und die Kraft-Schlupf-Beziehung der GFK-Schleife. Die Krümmungen die in diesem Kapitel dargestellt werden, ergeben sich aus den Anteilen, die in den Formeln (2) und (3) angeführt sind. Diese einzelnen Anteile wurden im Zuge der Prüfung (siehe Kapitel 5.2) gemessen. Mit Hilfe dieser beiden Beziehungen lassen sich Aussagen über die Steifigkeit des Thermoelementes treffen. Hier ist bei allen drei Versuchsserien bei geringem Lastniveau ein Haftverbund zwischen der GFK-Schleife und dem Normalbeton zu erkennen, was mit zunehmender Laststeigerung in einen Reibverbund übergeht.

### 6.4.1 VERSUCHSSERIE 1

Abbildung 35 zeigt die Momenten-Krümmungs-Beziehung für die Biegeversuchsserie 1. Anhand dieser Auswertung der gemessenen Daten ist ein konstantes Verhalten der einzelnen Prüfkörper zu erkennen. Außerdem ist zu sehen, dass die Biegeversuchskörper MV eine höhere Steifigkeit haben, als die Schubversuchskörper VV. Anhand der beiden roten Linien sind die beiden Verbundzustände, welche sich zwischen der GFK-Schleife und dem Normalbeton einstellen, dargestellt.

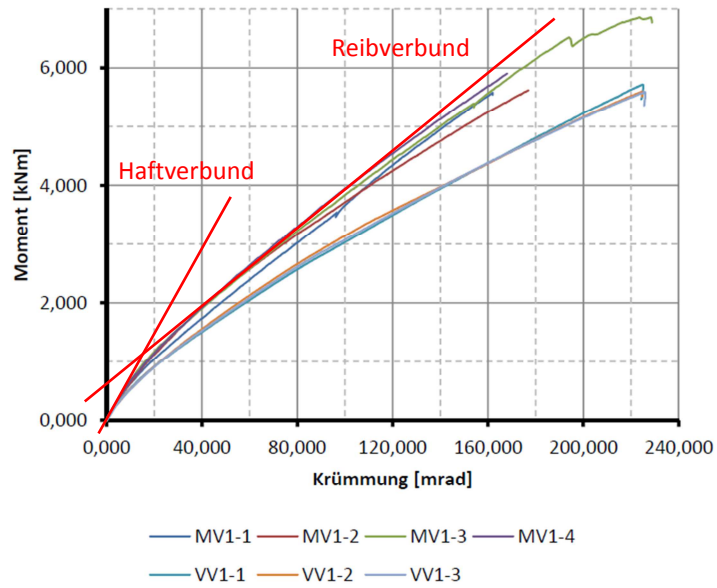


ABBILDUNG 35: MOMENTEN-KRÜMMUNGS-BEZIEHUNG SERIE 1

Die Kraft-Schlupf-Beziehung der Versuchsserie 1, welche in Abbildung 36 dargestellt ist, zeigt ebenfalls ein gleichmäßiges Verhalten der einzelnen Prüfkörper.

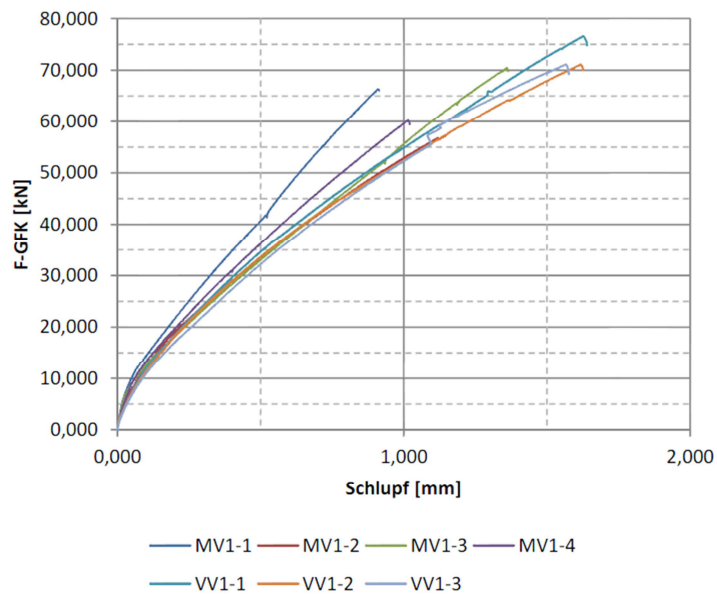


ABBILDUNG 36: KRAFT-SCHLUPF-BEZIEHUNG SERIE 1



## 6.4.2 VERSUCHSSERIE 2

Für die Biegeversuchsserie 2 wurden die Daten der Prüfkörper mit drei Elementen auf ein Element zurück gerechnet, damit ein Vergleich mit Serie 1 möglich ist. Der Vergleich der unterschiedlichen Bauweisen der Versuchskörper ist dahin gehend wichtig, um den Unterschied der Steifigkeiten, wie in Abbildung 37 zu erkennen ist, zu zeigen. Die Differenz der beiden Steifigkeiten ergibt sich aus den unterschiedlichen Plattenhöhen der Prüfkörper, die im Rahmen der Serie 2 geprüft wurden.

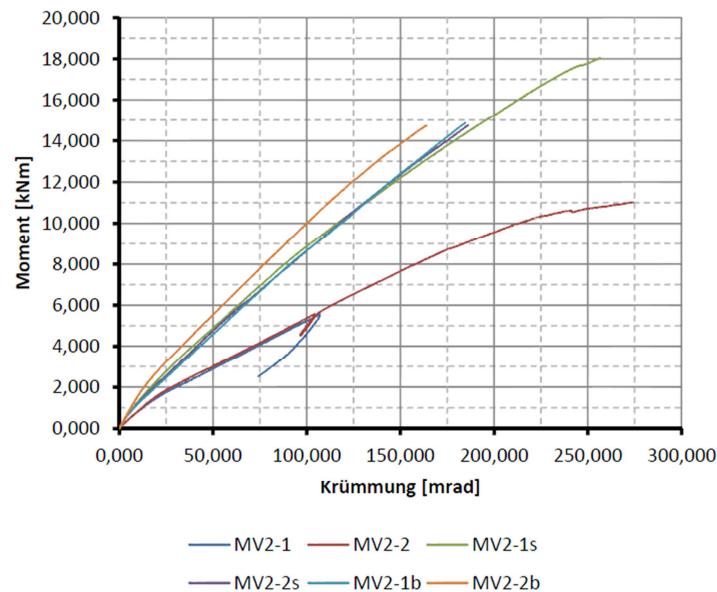


ABBILDUNG 37: MOMENTEN-KRÜMMUNGS-BEZIEHUNG SERIE 2

Bei der Kraft-Schlupf Beziehung hingegen wurden keine Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchskörpern festgestellt, wie aus Abbildung 38 zu entnehmen ist. Lediglich der Prüfkörper MV2-1b unterscheidet sich von den restlichen, was auf einen geringen Haftverbund zwischen der GFK-Schlaufe und dem Normalbeton zurückzuführen ist.

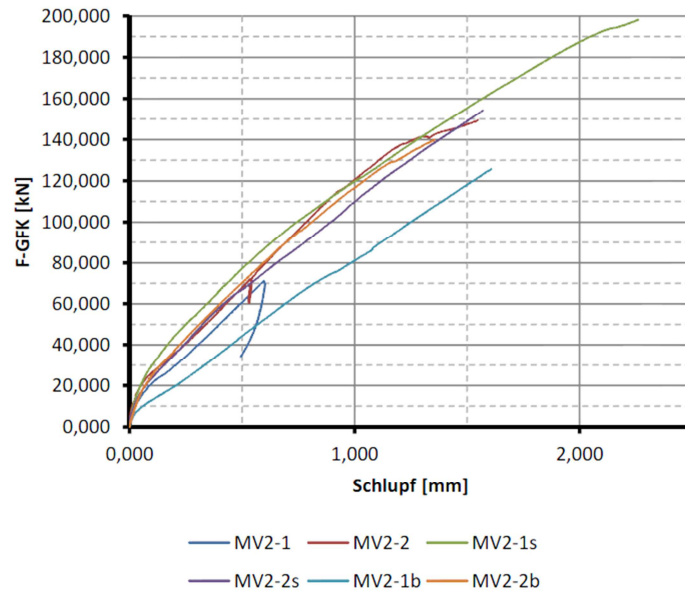


ABBILDUNG 38: KRAFT-SCHLUPF-BEZIEHUNG SERIE 2

### 6.4.3 VERSUCHSSERIE 3

Wie schon zuvor bei Serie 2, sieht man auch bei Biegeserie 3 den Einfluss unterschiedlicher Plattenhöhen auf die Steifigkeit, wie Abbildung 39 zeigt.

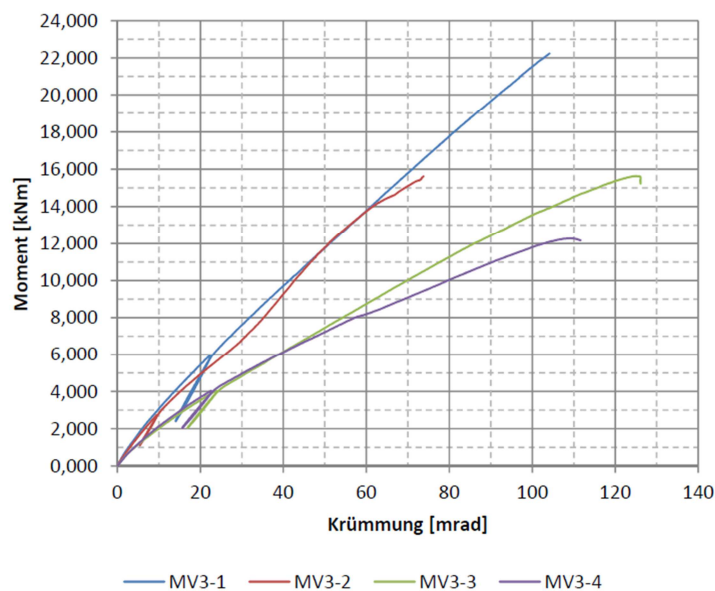


ABBILDUNG 39: MOMENTEN-KRÜMMUNGS-BEZIEHUNG SERIE 3

Die Kraft-Schlupf-Beziehung der Biegeversuchsserie 3 zeigt keinerlei Auffälligkeiten. Die vorigen Versuchsserien führten zum selben Ergebnis.

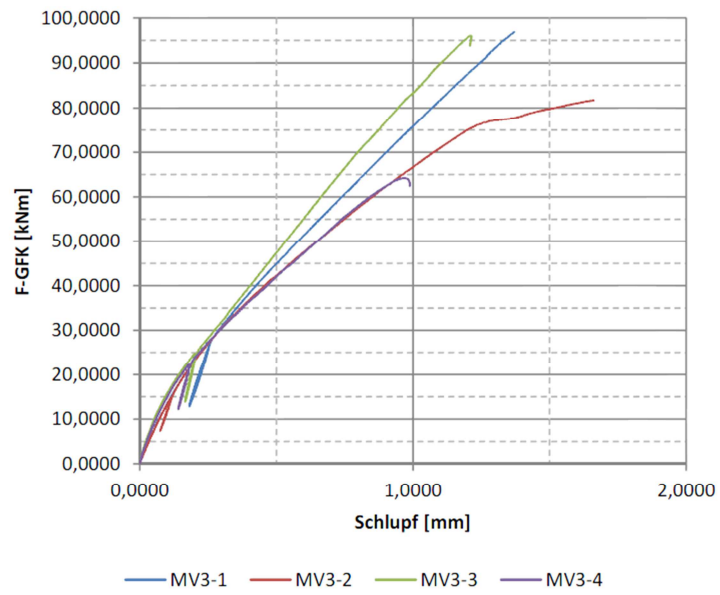


ABBILDUNG 40: KRAFT-SCHLUPF-BEZIEHUNG SERIE 3

#### 6.4.4 GEGENÜBERSTELLUNG DER VERSUCHSSERIEN

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Bruchlasten  $F_{U,V}$ , die sich im Zuge der Versuchsdurchführung und der Nachrechnung  $F_{U,R}$  ergeben haben, und zwar für sämtliche Versuchsserien. Die Vergleichsrechnung der Bruchlasten, wurden im Schnitt 1-1 durchgeführt.

TABELLE 11: BRUCHLASTEN-VERSUCH/NACHRECHNUNG

Biegeversuchsserie 1		
Bezeichnung	$F_{U,V}$ [kN]	$F_{U,R}$ [kN]
MV1-1	46,3	52,6
MV1-2	44,8	52,6
MV1-3	24,4	29,5
MV1-4	25,8	29,5
VV1-1	86,3	85,7
VV1-2	97,5	85,7
VV1-3	96,6	85,7
Biegeversuchsserie 2		
Bezeichnung	$F_{U,V}$ [kN]	$F_{U,R}$ [kN]
MV2-1	63,7	52,6
MV2-2	60,0	52,6
MV2-1s	62,5	55,7
MV2-2s	64,8	55,7
MV2-1b	58,3	55,7
MV2-2b	61,2	55,7
Biegeversuchsserie 3		
Bezeichnung	$F_{U,V}$ [kN]	$F_{U,R}$ [kN]
MV3-1	50,0	80,9
MV3-2	71,3	129,4
MV3-3	36,0	70,8
MV3-4	30,3	70,8

Die theoretische Bruchlast  $F_{U,R}$  lässt sich über die Bruchnormalkraft  $N_{U,UHPC}$  im UHPC ermitteln. Dabei wird mit einer Festigkeit des UHPCs von  $160[\text{N}/\text{mm}^2]$  bezogen auf die Fläche  $A_2$  gerechnet. Diese Normalkraft wird dann den Einwirkungen gegenübergestellt und mit Hilfe des jeweiligen Momenten-Querkraft-Verhältnisses, mit den folgenden Formeln berechnet.

$$N_{U,UHPC} = \frac{M_{1-1}}{z} + \frac{V_{1-1}}{\tan(\theta)} \quad (4)$$

mit

$$V_{1-1} = \frac{M_{1-1}}{f_{M/V}} \quad (5)$$

Daraus ergibt sich die rechnerische Bruchlast zu:

$$F_{U,R} = \frac{M_{1-1}}{f_{M/V} \cdot f_{fakt}} \quad (6)$$

$f_{M/V}$  Momenten-Querkraft-Verhältnis im Schnitt 1-1  
 $f_{fakt}$  Faktor für Kraftaufteilung, ergibt sich aus a/b (Abbildung 9)

In Abbildung 41 sind die Momente-Krümmungs-Beziehung der Biegeversuchsserie 1 und 2 dargestellt. Es zeigt sicher der bereits zuvor erwähnte Zuwachs der Steifigkeit, durch den Einsatz der kürzeren GFK-Schlaufen.

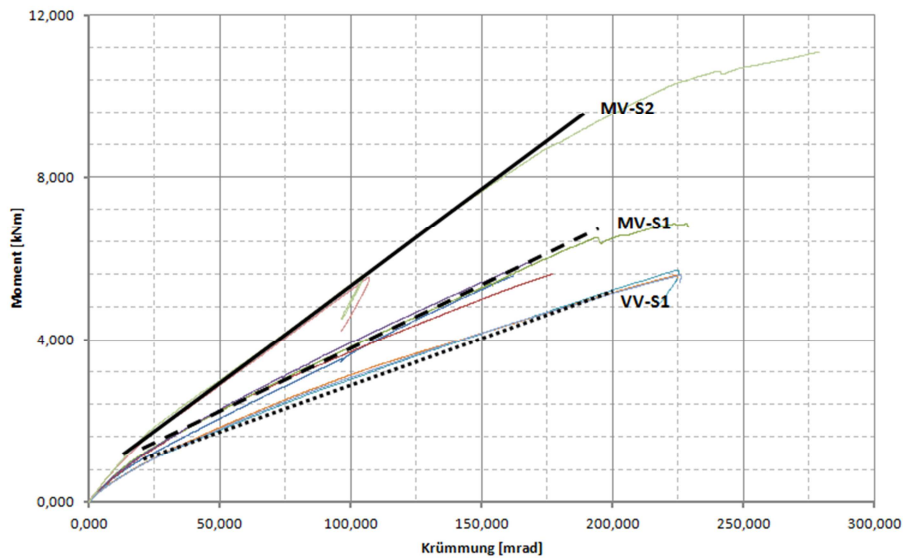


ABBILDUNG 41: MOMENTEN-KRÜMMUNGS-BEZIEHUNG SERIE 1 UND 2

Des Weiteren ist hier nochmal die Momenten-Krümmungs-Beziehung für die Biegeversuchsserie 2 in Abbildung 42 gezeigt. Sie soll den Unterschied der Steifigkeit bei verschiedenen Plattenhöhen verdeutlichen.

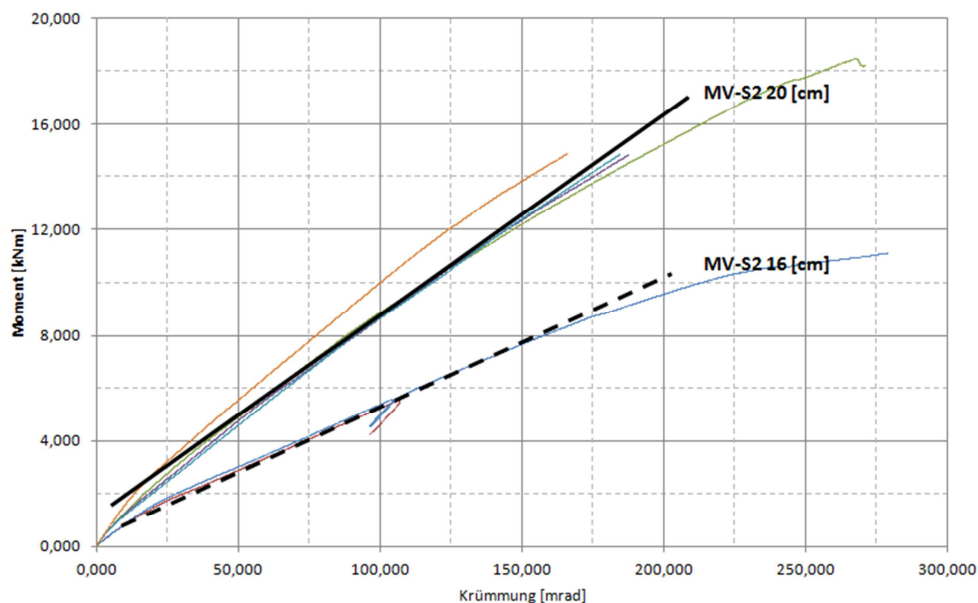


ABBILDUNG 42: GEGENÜBERSTELLUNG MV2 MIT 20[CM] / 16 [CM]

## 6.5 VERSUCHSNACHRECHNUNG

---

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie gut sich der im vorigen Kapitel erklärte theoretische Ansatz an die Versuche annähert. Bei den durchgeführten Vergleichsrechnungen handelt es sich um Momenten-Winkelöffnungs-Beziehung, die zum einen aus den Versuchsdaten und zum anderen aus den in diesem Kapitel gezeigten Formeln ermittelt wurden. Im Gegensatz zur Krümmung wird für die Winkelöffnung die sich einstellende Längenänderung herangezogen.

Für die Berechnung der einzelnen Längenänderungen, werden zuerst die Normalkräfte ermittelt, welches sich aus den Schnittgrößen (Schnitt 1-1) ergeben.

$$N_M = \frac{M_{1-1}}{n \cdot z} \quad (7)$$

$$N_V = \frac{V_{1-1}}{n \cdot \tan(\theta)} \quad (8)$$

Mit Hilfe der Normalkräfte, können nun die erforderlichen Längenänderungen, welche für die Berechnung des Öffnungswinkels  $\alpha_{TE}$  nötig sind, ermittelt werden. Anhand von Formel (9) wird die Stauchung des UHPC-Druckteils für das Moment  $M_{1-1}$  ermittelt:

$$\Delta l_{UHPC} = \frac{N_M \cdot d_{De}}{E_{UHPC} \cdot A_2} \quad (9)$$

Für die Berechnung der Längenänderung des Normalbetons werden, wie die Formeln (10) und (11) zeigen, verschiedene Schnitte herangezogen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich im Schnitt 1-1 der Normalbeton nur infolge des Momentes staucht. Hingegen kommt es im Schnitt 3-3 zu einer zusammen Wirkung von Moment und Querkraft.

$$\Delta l_{NB_{1-1}} = \frac{N_M \cdot l_{NB}}{E_{NB} \cdot A_4} \quad (10)$$

$$\Delta l_{NB_{3-3}} = \frac{(N_M + N_V) \cdot l_{NB}}{E_{NB} \cdot A_4} \quad (11)$$

$l_{NB}$                       Bezugslänge für Normalbeton

Die Dehnung der GFK-Schleife  $\Delta l_{GFK}$  ergibt sich ebenfalls aus beiden Normalkraftanteilen. Näherungsweise werden übertragbare Verbundspannungen infolge Haft- und Reibungsverbund außer Acht gelassen.

$$\Delta l_{GFK} = \frac{(N_M + N_V) \cdot l_{GFK,red}}{EA_{GFK}} \quad (12)$$

Die Winkelöffnung  $\alpha_{TE}$  ergibt sich wie folgt:

$$\alpha_{TE} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta l_{UHPC} + \Delta l_{NB_{1-1}} + \Delta l_{NB_{3-3}} + \Delta l_{GFK}}{z}\right) \quad (13)$$

Anhand der oben aufgestellten Formeln erfolgte die Nachrechnung der Momenten-Winkelöffnungs-Beziehung für die einzelnen Biegeversuchsserien. In diesem Kapitel wird jedoch nur der Vergleich der Versuchsdaten mit den gerechneten Werten der Versuchsserie 2 gezeigt. Die restlichen Vergleiche sind dem Anhang zu entnehmen. Die Eingangswerte, welche für die Nachrechnung der Momenten-Winkelöffnungs-Beziehung herangezogen wurden, sind in Tabelle 12 angeführt. Der Vergleich der Versuchsdaten mit den Nachrechnungen erfolgt in Abhängigkeit der verschiedenen M/V-Verhältnisse. Damit eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsserien möglich ist, werden die Versuchs- und Rechenwerte immer auf ein Element bezogen.

TABELLE 12: EINGANGSWERTE FÜR NACHRECHNUNG SERIE 2

	M/V 0,5	M/V 0,9		M/V 0,5-0,9
$h_{\text{Platte}}$ [cm]	16,00	20,00	$A_2$ [[cm] <sup>2</sup> ]	8,00
$z_{\text{Hebel}}$ [cm]	9,75	13,15	$A_4$ [[cm] <sup>2</sup> ]	27,00
$\theta_{\text{Strebe}}$ [°]	20,27	26,5	$E_{NC}$ [Mpa]	27.700
$d_{Te}$ [cm]	12,00	12,00	$E_{UHPC}$ [Mpa]	46.000
$l_{GFK}$ [cm]	342,44	342,44	$EA_{GFK}$ [kN]	32.560
$l_{NB}$ [cm]	16,0	20,0	Elem/m	1/3

Anhand der Versuchskurven in Abbildung 43 ist der Effekt der unterschiedlichen Verbundzustände zwischen der GFK-Schlaufe und dem Normalbeton ersichtlich. Zu Beginn der Belastung zeigt sich eine höhere Steifigkeit des Thermoelementes, welche anhand der höheren Anfangssteigung der Versuchskurven zu sehen ist. Beim Übergang zwischen dem Haft- und Reibungsverbund ist ein Knick im Verlauf der Versuchskurven zu erkennen, was einen Abfall der Steifigkeit des Elementes induziert. Bei der Nachrechnung hingegen, wurde im Zustand II der GFK-Schlaufe gerechnet, was bedeutet, dass sich die Schlaufe auf ihre ganze Länge dehnen kann. Der Grund für diese Vorgehensweise ist, dass die Daten mit denen die Versuchskurven erstellt wurden Streuungen unterworfen sind. Daher wird für die Nachrechnung vorgeschlagen, dass der Haftverbund zwischen der Schlaufe und dem Normalbeton bei geringen Kräften nicht in Rechnung gestellt wird. Der Kurvenverlauf der Nachrechnung zeigt, dass die Versuchskurve nach dem Überwinden des Haftverbundes, parallel dazu verläuft (siehe Abbildung 44).

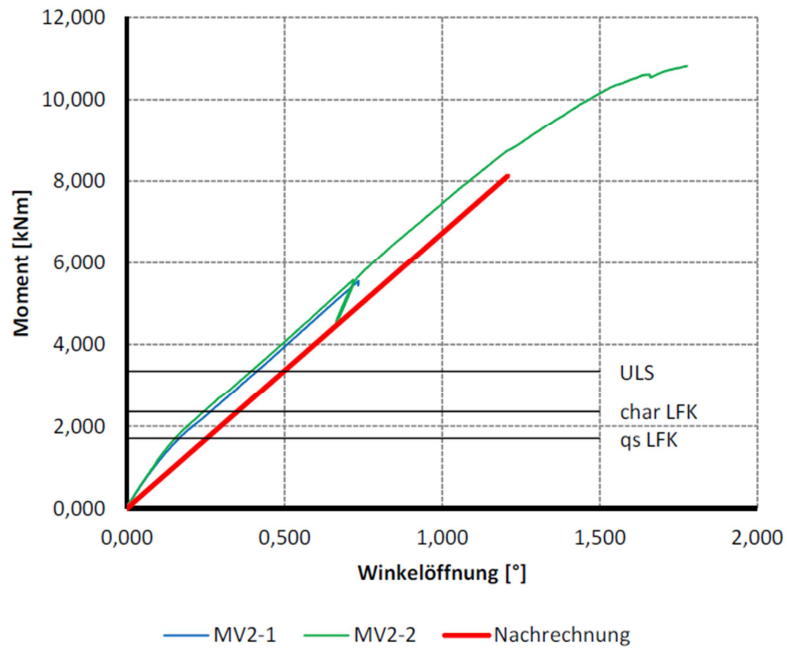


ABBILDUNG 43: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 2 ( $M/V=0,5$ )

In Abbildung 44 ist der Vergleich des  $M/V$ -Verhältnisses 0,9 dargestellt. Diese Nachrechnung zeigt bis zum mittleren Lastniveau eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsdaten. Durch das Ansteigen der Belastung im Versuch, verschlechterte sich auch der Reibverbund zwischen der Schlaufe und dem Beton, sodass es wieder zu einem Abfall der Steifigkeit gekommen ist. Lediglich bei Versuchskörper MV2-2b kam es erst kurz vor dem Bruch zu einem Abfall der Steifigkeit. Dieser Umstand ist auf die zuvor angesprochenen Streuungen der Versuchsdaten zurückzuführen.

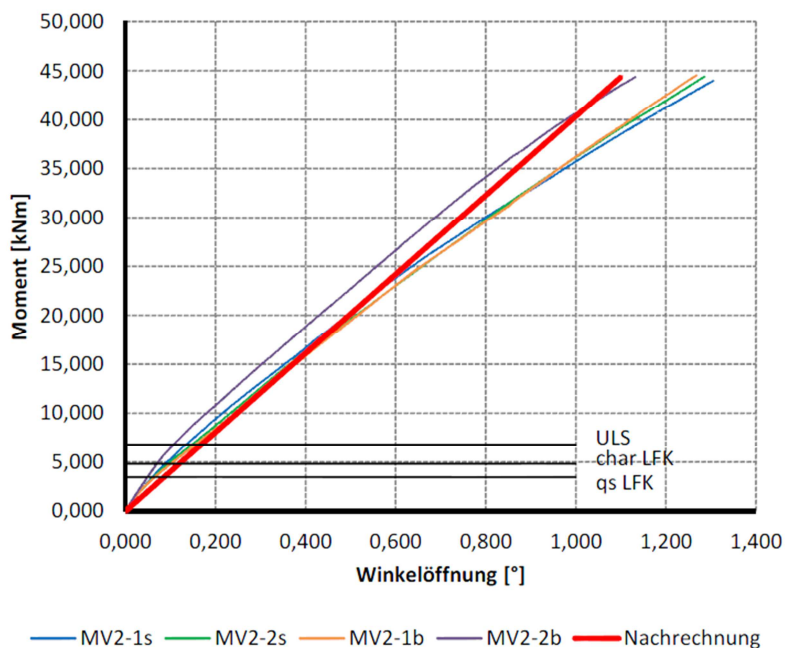


ABBILDUNG 44: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 2 ( $M/V=0,9$ )



Die guten Übereinstimmungen der Vergleiche zwischen den Versuchen und den Nachrechnungen haben gezeigt, dass sich mit dem oben aufgestellten Rechenmodell die Winkelöffnung  $\alpha_{TE}$  gut abbilden lässt. Aus diesem Grund, können die Formeln (7) bis (13) für die Ermittlung der Starrkörperverdrehungen in der Bemessung herangezogen werden.

## 7 BEMESSUNGSMODELL

---

In diesem Kapitel wird auf die Bemessung einer auskragenden Betonplatte unter Verwendung des Thermoelementes eingegangen. Mit Hilfe der gesammelten Daten aus den Versuchen in Bezug auf die Lastabtragung im Inneren des Thermoelementes sowie dem Tragverhalten kann ein ausreichendes Konzept erstellt werden.

### 7.1 ALLGEMEINES

---

#### 7.1.1 BAUTEILBEZEICHNUNGEN UND ABMESSUNGEN

---

Bevor auf das Bemessungskonzept des Thermoelementes genauer eingegangen wird, werden die Bezeichnung der einzelnen Abmessungen und Abstände, welche im folgenden Kapitel vorkommen, aufgezeigt und erklärt. In Abbildung 45 sind die wichtigsten Abmessungen grafisch dargestellt.

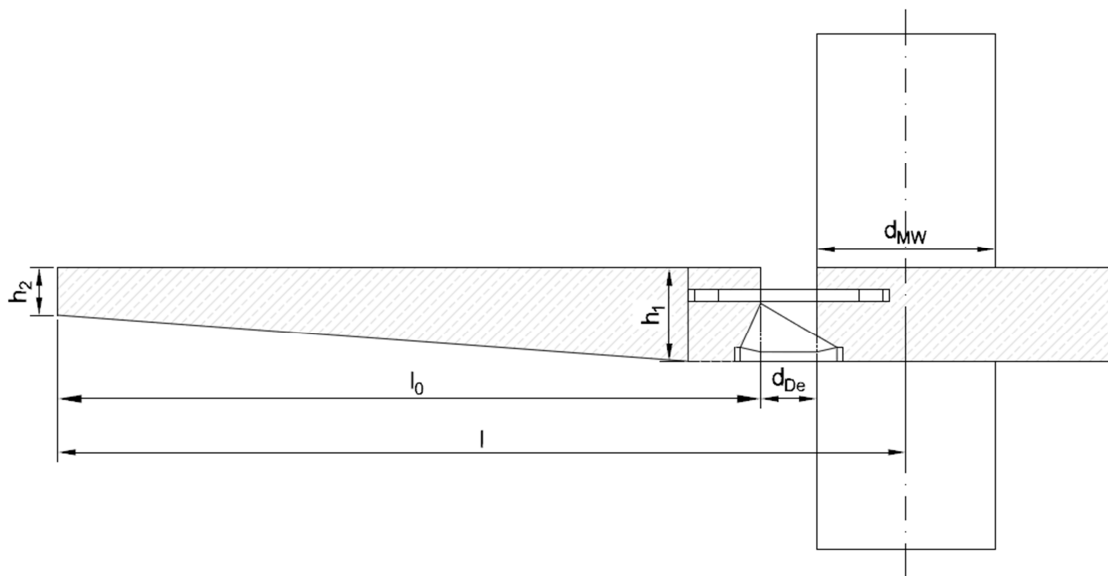


ABBILDUNG 45: BAUTEILBEZEICHNUNGEN

$l_0$	nutzbare Auskragungslänge
$l$	gesamte Auskragungslänge
$h_1$	Höhe der Balkonplatte an der Thermoebene
$h_2$	Höhe der Balkonplatte an der Auskragung
$d_{De}$	Dicke der Dämmebene
$d_{MW}$	Dicke des Mauerwerks

Eine genauere Betrachtung gilt ebenso den Abmessungen des Thermoelementes. Durch diese Abmessungen ergeben sich die Widerstände, die im Fall der Bemessung den Einwirkungen entgegenwirken. Bei diesen Widerständen handelt es sich um den inneren Hebelarm  $z$ , sowie um den Neigungswinkel  $\theta$  der Druckstrebe. Mit Hilfe der Formeln (14) und (15) können für eine beliebige Plattenhöhen die einzelnen Kräfte in die Normalkraftkomponenten umgerechnet werden.

$$z = h_{\text{Platte}} - a_{\text{GFK}} - \frac{h_{\text{GFK}}}{2} - \frac{h_1}{2} \quad (14)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{z}{l_c}\right) \quad (15)$$

$a_{\text{GFK}}$	Randabstand der GFK-Schlaufe
$h_{\text{GFK}}$	Höhe der GFK-Schlaufe
$h_1$	Höhe des UHPC-Druckteil in der Mitte der Dämmebene
$l_c$	Länge der horizontalen Druckstrebe

In Kapitel 5.3.2 konnte durch den Bruch des UHPC-Schubteils bei Versuchskörper MV2-1b der Winkel  $\theta$  für die Druckstrebe gemessen werden, welcher rund 25 [°] ergab. Die Nachrechnung des Winkels  $\theta$  für die Druckstrebe nach Formel (15) für eine Plattenstärke von 20 [cm], welche einen inneren Hebelarm  $z$  von 13,2 [cm] besitzt, ergibt eine Neigung von  $\theta = 26,5$  [°]. Die gute Übereinstimmung der beiden Ergebnisse zeigt, dass die Annahmen in Bezug auf die Geometrie in Formel (15) richtig sind. Der Neigungswinkel  $\theta$  könnte auch bei Versuchskörper MV3-2 gemessen werden, wo sich ein Winkel  $\theta$  von rund 30 [°] einstellte. Aufgrund der Geometrie des UHPC-Schubkeils, kann sich im maximal Fall nur ein Neigung der Druckstrebe von 32[°] bei einer 24 [cm] Platte einstellen. Abbildung 46 zeigt die einzelnen Abmessungen, welche in den oben angeführten Formeln zur Anwendung kommen.

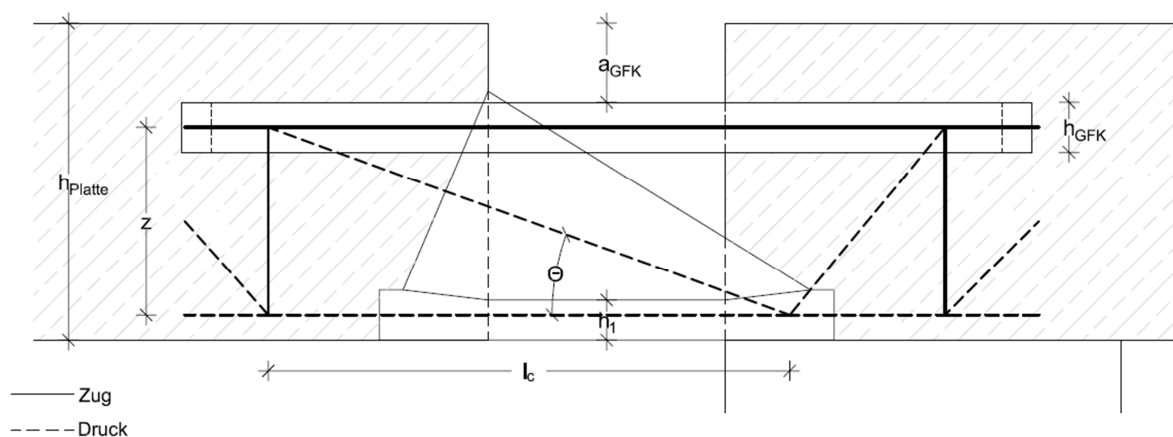


ABBILDUNG 46: ABMESSUNGEN THERMOELEMENT

In Tabelle 13 sind für fünf Plattenhöhen der innere Hebelarm  $z$  und der Winkel  $\theta$  für die Druckstrebe angegeben. Die Ermittlung der Werte erfolgte über die oben angeführten Formeln.

TABELLE 13: BAUTEILABMESSUNGEN

$h_{\text{Platte}}$ [cm]	$z$ [cm]	$\Theta$ [°]
16	9,2	19,1
18	11,2	22,9
20	13,2	26,5
22	15,2	29,8
24	17,2	32,0

### 7.1.2 SCHNITTEBENEN

Für die Bemessung des Thermoelementes ist die Definition verschiedener Schnittebenen notwendig (Abbildung 47). Die Schnittgrößen, die für die Bemessung des Thermoelementes nötig sind, werden im Schnitt 1-1 berechnet. Da in der Dämmebene keine zusätzlichen äußeren Lasten ( $g+q$ ) angreifen. Der Nachweis für das Thermoelement wird aber in Schnitt 3-3 geführt.

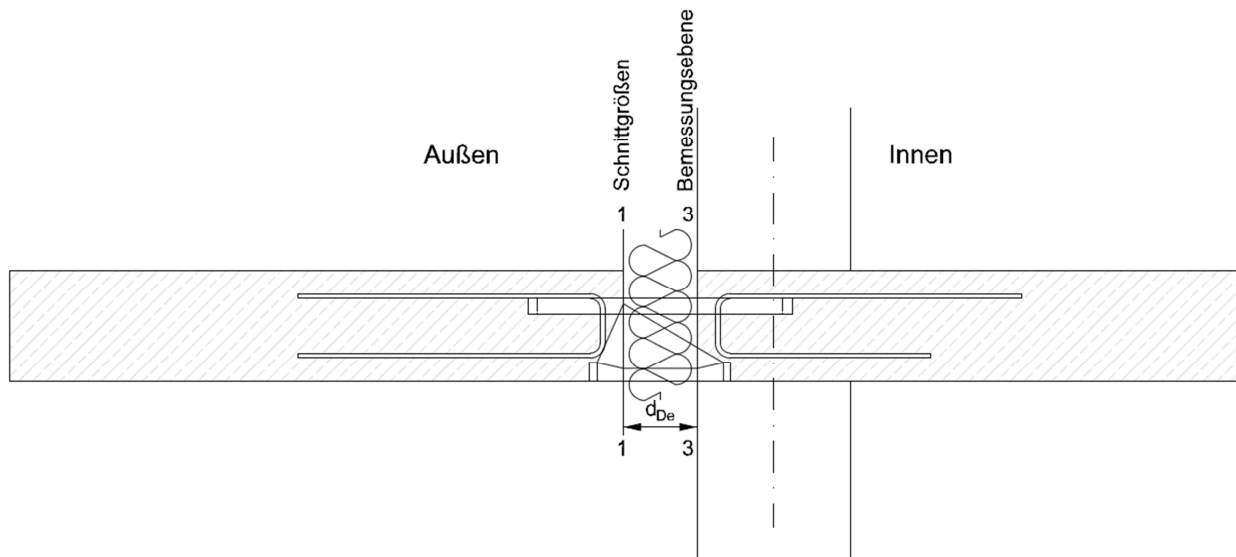


ABBILDUNG 47: SCHNITTEBENEN

### 7.1.3 UHPC-FLÄCHEN

Damit nachvollzogen werden kann, an welcher Stelle des UHPC-Formteils die notwendigen Nachweise geführt werden, müssen noch einige Flächenbezeichnungen definiert werden. In Abbildung 48 sind die für die Bemessung relevanten Flächen dargestellt. Die übrigen Flächen die im Zuge dieser Arbeit herangezogen werden wurden bereits in Abbildung 33 gezeigt.

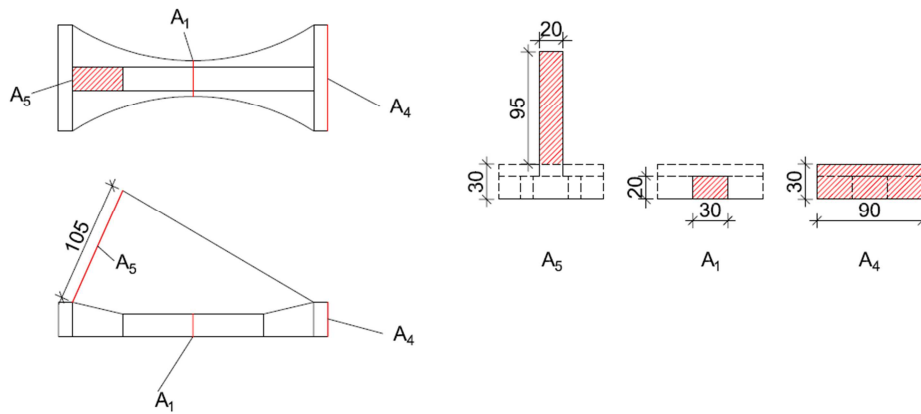


ABBILDUNG 48: FLÄCHENBEZEICHNUNG FÜR BEMESSUNG

## 7.2 NACHWEISFÜHRUNG

Damit ein Versagen des Thermoelementes im Grenzzustand der Tragfähigkeit ULS ausgeschlossen und die Gebrauchstauglichkeit SLS garantiert werden kann, müssen folgende Nachweise erfüllt werden.

- Nachweis der Spannung im Normalbeton ULS
- Nachweis der Betondrucknormalkraft im UHPC ULS
- Nachweis der Spannung im Normalbeton SLS
- Nachweis der Spannung im UHPC SLS
- Nachweis der Stahlspannung der Anschlussbewehrung SLS
- Nachweis der Verformung im SLS

Im Folgenden wird auf die Nachweise im einzelnen eingegangen.

### 7.2.1 NACHWEIS DER SPANNUNG IM NORMALBETON ULS

Damit die Tragfähigkeit des Thermoelementes sichergestellt werden kann, muss kontrolliert werden, ob die Kraft, die der UHPC-Druckteil aufnehmen kann auch vom Normalbeton aufgenommen werden kann. Aus diesem Grund ist es notwendig, einen Spannungsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu führen. Die Formel für die Berechnung der Spannung an der Übergangsfläche  $A_4$  zwischen UHPC und Normalbeton ergibt sich wie folgt:

$$\sigma_c = \frac{\frac{M}{n \cdot z} + \frac{V}{n \cdot \tan(\theta)}}{A_4} \quad (16)$$

- |   |   |
|---|---|
| M | Moment aus Schnitt <sub>1-1</sub> [kNm]           |
| V | Querkraft aus Schnitt <sub>1-1</sub> [kN]         |
| z | Hebelarm zwischen Schlaufe und UHPC-Druckteil [m] |
| n | Anzahl der Thermoelemente pro Meter               |

- $A_4$  Übergangsfläche zwischen UHPC und Normalbeton [m<sup>2</sup>]  
 $d_{De}$  Dicke der Dämmebene

Als Grenzwert für die Gegenüberstellung der Spannung, wird die Druckfestigkeit  $f_{cd}$  als Designwert des verwendeten Betons herangezogen.

## 7.2.2 NACHWEIS DER BETONDRUCKNORMALKRAFT IM UHPC ULS

Die Begrenzung der Betondrucknormalkraft im UHPC-Formteil dient der Sicherstellung, dass die Betondruckspannung vom UHPC nicht überschritten wird. Dieser Nachweis wird, wie in Abbildung 49 (Betondruckkraft) zu sehen ist, in der Mitte des Druckteils geführt. Im Falle eines ultrahochfesten Betons mit einer Druckfestigkeit  $f_{ck,UHPC}$  von 150 [MPa], einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  von 1,50 [-]  $\gamma'$  und  $\alpha_{cc}$  von 1,00 [-], und einer Betonfläche  $A_1$  von 30 x 20 mm ergibt sich mit nachstehender Formel:

$$N_{rd,max} = \frac{f_{ck,UHPC} \cdot \alpha_{cc}}{\gamma_M \cdot \gamma'} \cdot A_1 \quad (17)$$

eine Betondrucknormalkraft  $N_{rd,max}$  von 60 [kN]. Diese Kraft wird als Obergrenze für die Bemessung herangezogen und den Schnittgrößen der Bemessungsebene gegenübergestellt.

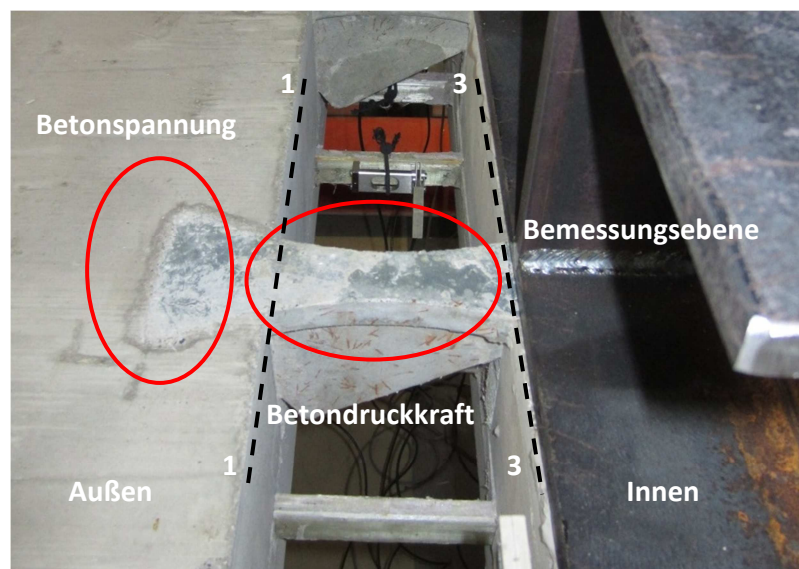


ABBILDUNG 49: NACHWEISFÜHRUNG

### 7.2.3 NACHWEIS DER SPANNUNG IM NORMALBETON SLS

---

Bei diesem Nachweis wird die Betonspannung  $\sigma_c$  an der Kontaktfläche  $A_4$  zwischen dem UHPC-Formteil und dem Normalbeton (Abbildung 49 Betonspannung) begrenzt. Hierbei muss sichergestellt werden, dass der Normalbeton die ankommenden Kräfte, über diese Fläche aufnehmen kann. Laut ÖNORM EN 1992-1-1 [5] ist die Betonspannung beim Übergang unter charakteristischer  $k_1 \cdot f_{ck}$  und quasi-ständiger  $k_2 \cdot f_{ck}$  Lastkombination zu beschränken. Die Beiwerte  $k_1$  und  $k_2$  sind der ÖNORM EN 1992-1-1 [5] oder dem nationalen Anwendungsdokument [6] zu entnehmen. Als empfohlener Wert wird für  $k_1 = 0,60$  und für  $k_2 = 0,45$  eingesetzt. Mit Hilfe der Formel (16) werden die Spannungen in den unterschiedlichen Lastfallkombinationen ermittelt, und diesen Grenzwerten gegenübergestellt. Die Nachweise werden im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit geführt.

### 7.2.4 NACHWEIS DER SPANNUNG IM UHPC SLS

---

Damit die Gebrauchstauglichkeit im UHPC-Formteil gewährleistet werden kann, wird hier ebenfalls der Nachweis der Spannungen in den verschiedenen Lastfallkombinationen durchgeführt. Die Grenzwerte betragen, wie bereits beim Normalbeton, für die charakteristische Lastfallkombination  $0,60 \cdot f_{ck,UHPC}$ , unter der quasi-ständigen Kombination  $0,45 \cdot f_{ck,UHPC}$  [3]. Als Fläche für die Ermittlung der Spannungen im UHPC wird die Fläche  $A_1$  nach Abbildung 48 herangezogen. Diese Fläche wird auch beim Nachweis der Betondrucknormalkraft verwendet. Die Spannungen werden ebenfalls nach Formel (16) ermittelt.

### 7.2.5 NACHWEIS DER STAHLSPANNUNG IN DER ANSCHLUSSBEWEHRUNG SLS

---

Bei diesem Nachweis wird sichergestellt, dass keine Spannungen erreicht werden, welche zu plastischen Verzerrungen führen könnten. Diese Verzerrungen könnten laut [8] zu Dauerhaftigkeitsproblemen verursachen. Daher ist die Spannung in der Bewehrung laut ÖNORM EN 1992-1-1 [5] zu begrenzen. Laut Norm darf in diesem Fall die Zugspannung in der Anschlussbewehrung nicht mehr als  $k_3 \cdot f_{yk}$  betragen. Als empfohlener Wert muss laut [5] für  $k_3 = 0,8$  eingesetzt werden. Die Spannung in der Bewehrung wird analog zur Spannung im Beton ermittelt, jedoch mit dem Unterschied, dass die Fläche jener der Anschlusseisen  $A_5$  entspricht.

## 7.2.6 NACHWEIS DER VERFORMUNGEN IM SLS

Die durch die äußere Lasten hervorgerufenen Verformungen müssen kleiner als die in ÖNORM EN 1992-1-1 [5] festgelegten Werte sein. Die Auskragung muss um die zulässigen Verformungen nicht zu überschreiten, überhöht werden. Es wird jene Überhöhung ermittelt, bei der es zum Zeitpunkt  $t=\infty$  unter dem Eigengewichtsanteil  $g$  zu keinem Durchhang kommt. In Abbildung 50 sind die einzelnen Verformungsanteile, welche in der Norm festgelegt sind dargestellt.

- $w_c$  „Spannungslose Werkstattform“ mit Überhöhung;
- $w_1$  Durchbiegungsanteil aus ständiger Belastung in der Einwirkungskombination nach Gleichung (6.14a) bis (6.16b);
- $w_2$  Durchbiegungszuwachs aus Langzeitwirkung der ständigen Belastung;
- $w_3$  Durchbiegungsanteil infolge veränderlicher Einwirkung in der Einwirkungskombination nach Gleichung (6.14a) bis (6.16b);
- $w_{tot}$  Gesamte Durchbiegung als Summe von  $w_1$ ,  $w_2$  und  $w_3$ ;
- $w_{max}$  Verbleibende Durchbiegung nach der Überhöhung;

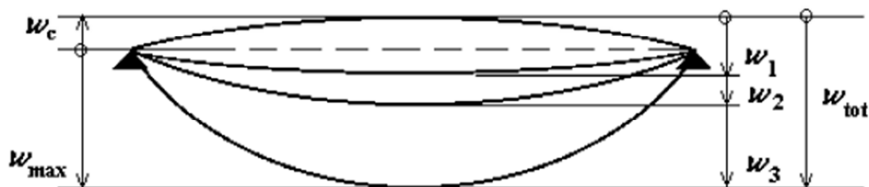


ABBILDUNG 50: DEFINITION DER DURCHBIEGUNGEN [9 S. 45]

Beim Thermoelement setzt sich die Verformung infolge einer Starrkörperverdrehung und dem Durchhang der Betonplatte zusammen. Relevant für das Thermoelement ist jedoch nur die Starrkörperverdrehung. Diese resultiert aus der Winkelöffnung in der Dämmebene. Mit Hilfe dieser Verformung wird im Zuge der Bemessung die Überhöhung unter Eigengewicht der Balkonplatte ermittelt. Des Weiteren wird die Verdrehung des Thermoelementes unter der quasi-ständigen Einwirkungskombination berechnet.

Für die Berechnung der Verformungen wird im ersten Schritt die Biegeschlankheit laut ÖNORM EN 1992-1-1 [5 S. 140] betrachtet. Abbildung 51 zeigt zwei Formeln zur Ermittlung der zulässigen Biegeschlankheit, und zwar einerseits, die eines gering bewehrten Betons  $\rho \leq \rho_0$  und andererseits, die eines hoch bewehrten Betons  $\rho > \rho_0$ .

$$\frac{l}{d} = K \left[ 11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2 \sqrt{f_{ck}} \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{wenn } \rho \leq \rho_0$$

$$\frac{l}{d} = K \left[ 11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{wenn } \rho > \rho_0$$

ABBILDUNG 51: BIEGESCHLANKHEIT LAUT ÖNORM EN 1992-1-1 [5]



Der in den Formeln angeführte Beiwert  $K$  für auskragende Bauteile ist aus Tabelle 14 zu entnehmen. Des Weiteren sind in dieser Tabelle die Grundwerte für die Biegeschlankheit von Stahlbetonbauteilen ohne Normalkraft angeführt.

TABELLE 14: GRUNDWERTE DER BIEGESCHLANKHEIT VON STAHLBETONBAUTEILEN OHNE NORMALKRAFT [5]

Statisches System	$K$	Beton hoch beansprucht	Beton gering beansprucht
		$\rho = 1,5\%$	$\rho = 0,5\%$
frei drehbar gelagerter Einfeldträger; gelenkig gelagerte einachsig oder zweiachsig gespannte Platte	1,0	14	20
Endfeld eines Durchlaufträgers oder einer einachsig gespannten durchlaufenden Platte; Endfeld einer zweiachsig gespannten Platte, die kontinuierlich über einer längere Seite durchläuft	1,3	18	26
Mittelfeld eines Balkens oder einer einachsig oder zweiachsig gespannten Platte	1,5	20	30
Platte, die ohne Unterzüge auf Stützen gelagert ist (Flachdecke) (auf Grundlage der größeren Spannweite)	1,2	17	24
Kragträger	0,4	6	8

ANMERKUNG 1 Die angegebenen Werte befinden sich in der Regel auf der sicheren Seite, und genauere rechnerische Nachweise führen häufig zu dünneren Bauteilen.

ANMERKUNG 2 Für zweiachsig gespannte Platten ist in der Regel der Nachweis auf Grundlage der kürzeren Stützweite durchzuführen. Bei Flachdecken ist in der Regel die größere Stützweite zugrunde zu legen.

ANMERKUNG 3 Die für Flachdecken angegebenen Grenzen sind weniger streng als der zulässige Durchhang von  $1/250$  der Stützweite. Erfahrungsgemäß ist dies ausreichend.

Das aus der Norm ermittelte  $l/d$  Verhältnis wird jenem der Bauteilgeometrie gegenübergestellt. Im Falle, dass die zulässige Biegeschlankheit größer ist als die vorhandene so ist laut ÖNORM EN 1992-1-1 [5] kein genauerer Nachweis in Bezug auf die Verformung zu führen.

Das nachfolgende Beispiel soll zeigen, wie die Verformung unter quasi-ständiger Lastfallkombination in der Mitte des Thermoelementes ermittelt wird. Die Eingangsparameter sind aus Tabelle 15 zu entnehmen.

TABELLE 15: EINGANGSPARAMETER FÜR STARRKÖRPERVERDREHUNG

Eingangsparameter:					
Betongüte	C 25/30		$A_2$	7,50	$[\text{cm}]^2$
$n$	5	$[\text{Stk}/\text{m}]$	$A_{3a}$	10,28	$[\text{cm}]^2$
$h_{\text{platte}}$	18,00	$[\text{cm}]$	$A_{3b}$	17,32	$[\text{cm}]^2$
$d_{\text{De}}$	12,00	$[\text{cm}]$	$E_{\text{NC}}$	10.163	$[\text{MPa}]$
$l_0$	1,55	$[\text{m}]$	$E_{\text{UHPC}}$	23.000	$[\text{MPa}]$
$l$	1,80	$[\text{m}]$	$EA_{\text{GFK}}$	32.560	$[\text{kN}]$
$z_{\text{Hebel}}$	11,2	$[\text{cm}]$	$\theta_{\text{Strebe}}$	22,9	$[\text{°}]$

### Schnittgrößen aus quasi-ständiger LFK:

$$M_2 = 8,50 \text{ [kNm]}, V_2 = 10,2 \text{ [kN]}$$

### Normalkräfte zufolge Moment und Querkraft:

$$N_{M,1-1} = \frac{M_2}{n \cdot z} \rightarrow N_{M,1-1} = 15,2 \text{ [kNm]}$$

$$N_V = \frac{Q_2}{n \cdot \tan(\theta)} \rightarrow N_V = 4,8 \text{ [kN]}$$

Die Berechnungen der nachfolgenden Verformungen beziehen sich auf die Formeln aus dem Kapitel 6.5. Für die Berechnung der Starrkörperverdrehung wird das Kriechen des Normalbetons mit einem  $\varphi_{\text{eff}}$  von 2,05 und das des UHPCs mit einem  $\varphi_{\text{eff}}$  von 1,0 berücksichtigt. Die für die Berechnung der Starrkörperverdrehung herangezogenen Formeln sind in Kapitel 6.5 angeführt.

### UHPC

$$\Delta l_{UHPC} = \frac{N_{M,1-1} \cdot d_{De}}{E_{UHPC} \cdot A_2} \rightarrow \frac{15,2 \cdot 10^3 \cdot 120}{23000 \cdot 7,50 \cdot 10^2} = 0,106 \text{ [mm]}$$

### Normalbeton

$$\Delta l_{NB,1-1} = \frac{N_{M,1-1} \cdot l_{NB}}{E_{NC} \cdot A_4} \rightarrow \frac{15,2 \cdot 10^3 \cdot 180}{10163 \cdot 27 \cdot 10^2} = 0,099 \text{ [mm]}$$

$$\Delta l_{NB,3-3} = \frac{(N_{M,1-1} + N_V) \cdot l_{NB}}{E_{NC} \cdot A_4} \rightarrow \frac{(15,2 + 4,8) \cdot 10^3 \cdot 180}{10163 \cdot 27 \cdot 10^2} = 0,131 \text{ [mm]}$$

### GFK – Schlaufe

$$\Delta l_{GFK} = \frac{(N_{M,1-1} + N_V) \cdot l_{GFK}}{EA_{GFK}} \rightarrow \frac{(15,2 + 4,8) \cdot 342}{32560} = 0,210 \text{ [mm]}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta l_{UHPC} + \Delta l_{NB,1-1} + \Delta l_{NB,3-3} + \Delta l_{GFK}}{z_{Hebel}} \right)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{0,106 + 0,099 + 0,131 + 0,210}{11,2 \cdot 10} \right) = 0,281 [^\circ]$$

$$\alpha_{Kragarm} = 0,281 [^\circ]$$

Die Verformung infolge der Starrkörperverdrehung  $\delta_{\text{Starr}}$  aus quasi-ständiger Lastfallkombination wird wie folgt ermittelt.

$$\delta_{\text{Starr}} = \tan(\alpha_{Kragarm}) \cdot \left( l_0 + \frac{d_{De}}{2} \right) \rightarrow \tan(0,281) \cdot \left( 1,55 + \frac{0,12}{2} \right) = 7,9 \text{ [mm]}$$

Die maximale Verformung, wird in ÖNORM EN 1992-1-1 [5] geregelt, um die Gebrauchstauglichkeit nicht zu beeinträchtigen. Sie besagt, dass unter quasi-ständiger Einwirkungskombination der Durchhang eines Kragbalkens nicht mehr als  $l/250$  betragen darf, da es sonst zu einer Beein-

trächtigung der Gebrauchstauglichkeit kommen kann. Die ideale Länge des Kragträgers<sup>2</sup> ergibt die doppelte Auskragungslänge. Die maximal zulässige Verformung muss dann der gesamten Verformung, welche sich aus der Starrkörperverdrehung und der der Betonplatte ergibt, gegenübergestellt und kontrolliert werden. Daraus resultierend ergibt sich:

$$\delta_{Starr} = 7,9 [mm] \leq \delta_{zul} = \frac{2 \cdot l}{250} = \frac{2 \cdot 1800}{250} = 14,4 [mm]$$

---

<sup>2</sup> Abstand der Momentennullpunkte beim Ersatzsystem (Einfeldträger)

## 7.3 EINWIRKUNGEN IM HOCHBAU

---

Die Einwirkungen im Hochbau sind in der ÖNORM EN 1990 [9] und ÖNORM EN 1991-1-1 [10] und dem nationalen Anwendungsdokument ÖNORM B 1991-1-1 [11] geregelt. Da im Vorfeld dieser Arbeit nicht definiert wurde, in welchen Bereichen die Thermoelemente eingesetzt werden, müssen mehrere Fälle der Nutzungskategorien bei der Bemessung betrachtet werden. In Abbildung 52 sind alle Einwirkungen, die im Zuge dieser Arbeit berücksichtigt wurden, dargestellt.

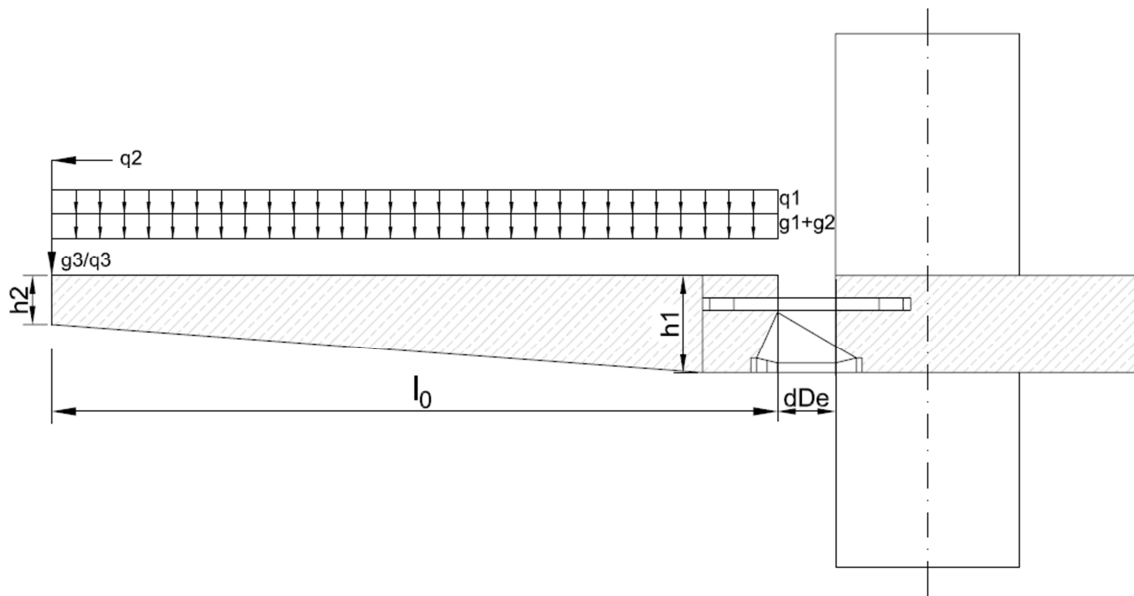


ABBILDUNG 52: BELASTUNG AUF BALKONPLATTE

- $g_1+g_2$  Eigengewicht der Balkonplatte und Ausbaulast [kN/m<sup>2</sup>]
- $g_3$  Eigengewicht der Brüstung / Absturzsicherung [kN/m]
- $q_1$  Nutzlasten im Hochbau [kN/m<sup>2</sup>] lt. ÖNORM B 1991-1-1 [11]
- $q_2$  Horizontallast auf Absturzsicherung [kN/m] lt. ÖNORM B 1991-1-1 [11]
- $q_3$  Vertikallast auf Absturzsicherung [kN/m] oder [kN] lt. ÖNORM B 1991-1-1 [11]

### 7.3.1 EIGENGEWICHT

---

Das spezifische Gewicht  $\gamma$  von Stahlbeton wird aus dem nationalen Anwendungsdokument ÖNORM B 1991-1-1 [11] Tabelle A.1–Unbewehrter Festbeton, mit dem Wert 24 [kN/m<sup>3</sup>] für Normalbeton, entnommen. In der Anmerkung dieser Tabelle steht, dass für einen bewehrten Beton eine Erhöhung des angegebenen Wertes um 1,0 [kN/m<sup>3</sup>] erlaubt ist, was einen Gesamtwert für die Wichte des Stahlbetons von 25 [kN/m<sup>3</sup>] ergibt. Die Größe des Eigengewichtes der Balkonplatte ergibt sich aus der Bauteilgeometrie. Zusätzlich zum Gewicht der Balkonplatte wird noch eine Ausbaulast mit 0,22 [kN/m<sup>2</sup>] und pro [cm] Dicke angesetzt. Hierbei handelt es sich um

keramische Bodenfliesen einschließlich dem Verlegemörtel, und ist den Schneider Bautabellen [12] entnommen. Als weitere Last ist das Gewicht der Absturzsicherung  $g_3$  am auskragenden Ende der Balkonplatte anzusetzen.

### 7.3.2 NUTZLASTEN

Die Nutzlasten im Hochbau sind für auskragende Bauteile in verschiedenen Nutzungskategorien eingeteilt, wie aus Tabelle 16 zu entnehmen ist. Die für Balkone in Frage kommenden Kategorien sind die Kategorien A1, C3 und C5.

TABELLE 16: NUTZUNGSKATEGORIEN [11]

Kategorie	Nutzungsmerkmal	Beispiele
A	Wohnflächen	<b>A1:</b> Flächen von Räumen in Wohngebäuden und -häusern, Stations- und Krankenzimmer in Krankenhäusern <sup>a</sup> , Zimmer in Hotels und Herbergen, Küchen, Toiletten, sowie Räume mit wohnaffiner Nutzung in bestehenden Gebäuden <b>A2:</b> Flächen von nicht ausbaubaren, begehbaren Dachböden <sup>b</sup>
B	Büroflächen	<b>B1:</b> Büroflächen in bestehenden Gebäuden <b>B2:</b> Büroräume in Bürogebäuden <sup>c</sup>
C	Flächen mit Personenansammlungen (außer Kategorien A, B und D)	<b>C1:</b> Flächen von Räumen mit Tischen u. dgl. <sup>d</sup> , z. B. Unterrichtsräume in Schulen, Cafés, Restaurants, Speisesälen, Lesezimmern <sup>e</sup> , Empfangsräumen <sup>f</sup> <b>C2:</b> Flächen von Räumen mit fester Bestuhlung <sup>g,h</sup> , z. B. in Kirchen, Theatern, Kinos, Konferenzräumen, Vorlesungssälen, Versammlungshallen, Wartezimmern, Bahnhofswartesaalen <b>C3:</b> Flächen (Decken, Treppen, Zugangsflächen sowie Balkone und Loggien) von Räumen ohne Hindernisse für die Beweglichkeit von Personen <b>C3.1:</b> Flächen von Räumen mit mäßiger Personenfrequenz, z. B. in Museen, Ausstellungsräumen u.dgl. sowie Zugangsflächen in Bürogebäuden <b>C3.2:</b> Flächen von Räumen mit möglicher hoher Personenfrequenz, z. B. Zugangsflächen in öffentlichen Gebäuden, Schulen und Verwaltungsgebäuden, Hotels, Krankenhäusern und Bahnhofshallen <b>C4:</b> Flächen von Räumen mit möglichen körperlichen Aktivitäten, z. B. Tanzsäle, Turnsäle, Bühnen <b>C5:</b> Flächen von Räumen mit möglichem Menschengedrange, z. B. in Gebäuden mit öffentlichen Veranstaltungen, wie Konzertsälen, Sporthallen mit Tribünen, Vorplätze und Zugangsbereiche sowie Bahnsteige
D	Verkaufsflächen	<b>D1:</b> Flächen in Einzelhandelsgeschäften <b>D2:</b> Flächen in Kaufhäusern

<sup>a</sup> Krankenzimmer in Krankenhäusern sind jedoch der Kategorie C1 zuzuordnen, wenn die Verwendung von Behandlungs- und Diagnosegeräten nicht ausgeschlossen werden kann.  
<sup>b</sup> Ausbaubare Dachböden sind der Kategorie C1 zuzuordnen.  
<sup>c</sup> Zugangsflächen, Treppen und Balkone in Bürogebäuden sind im Allgemeinen der Kategorie C3.1 zuzuordnen.  
<sup>d</sup> Bei wohnaffiner Nutzung in bestehenden Gebäuden können derartige Räume auch der Kategorie A1 zugeordnet werden.  
<sup>e</sup> Für Flächen mit Nutzung als Archiv oder Bibliothek ist Tabelle 3 zu beachten.  
<sup>f</sup> Es wird empfohlen, Flächen mit Tischen der Kategorie C3.1 zuzuordnen, wenn auf diese Flächen bei Entfernung der Tische Veranstaltungen mit mäßiger Personenfrequenz nicht auszuschließen sind. Dies gilt besonders für Schulen, Gaststätten, Restaurants, u. Ä.  
<sup>g</sup> In Räumen mit fester Bestuhlung sind freie Flächen (Flächen ohne Bestuhlung), die 25 m<sup>2</sup> überschreiten, der Kategorie C3.2 zuzuordnen.  
<sup>h</sup> Tribünen mit festen Sitzen sind der Kategorie C2, sonst der Kategorie C5 zuzuordnen.

ANMERKUNG 1 Terrassen und widmungsgemäß begehbare Dächer sind mindestens der Nutzungskategorie der anschließenden Räume zuzuordnen.  
 ANMERKUNG 2 Nichtbefahrbare, außerhalb der Gebäude liegende Flächen (z. B. Kellerdecken unter Höfen und Gärten) müssen je nach Personenfrequenz den entsprechenden Kategorien zugeordnet werden.

Die Größe der Einwirkung ist im nationalen Anwendungsdokument der ÖNORM B 1991-1-1 [11] geregelt. Die Werte für diese Einwirkung sind der Tabelle 17 zu entnehmen. Die für die Bemessung des Thermoelements herangezogenen Werte sind mit einem roten Rahmen markiert. Bei diesen Lasten handelt es sich um Flächenlasten, die noch mit der Einflussbreite der Balkonplatte multipliziert werden müssen, um auf die für die Bemessung relevante Gleichlast [kN/m] zu kommen.

TABELLE 17: NUTZLASTEN AUF DECKEN, BALKONE UND TREPPEN IM HOCHBAU [11]

Nutzungskategorien		$q_k$	$Q_k$
		kN/m <sup>2</sup>	kN
Kategorie A	A1 für		
	- Decken	2,0	2,0
	- Treppen, Gänge, Loggien	3,0	2,0
	- Balkone	4,0	2,0
	A2	1,5	2,0
Kategorie B	B1	2,0	2,0
	B2	3,0	3,0
Kategorie C	C1	3,0	3,0
	C2	4,0	4,0
	C3		
	- C3.1	4,0	4,0
	- C3.2	5,0	5,0
	C4	5,0	4,0
Kategorie C	C5 für		
	- Decken	5,0	4,0
	- Treppen, Gänge, Loggien	6,0	4,0
	- Balkone	6,0	4,0
Kategorie D	D1	4,0	4,0
	D2	5,0	5,0

Zusätzlich zur obigen Nutzlast müssen noch vertikale und horizontale Einzellasten auf die Absturzsicherung angesetzt werden. Laut ÖNORM B 1991-1-1 [11] ist für die vertikale Last entweder eine Streckenlast  $q_k$  von 0,5 [kN/m] oder eine Einzellast  $Q_k$  von 1,0 [kN] ungünstig anzusetzen. Die horizontale Last auf die Absturzsicherung ist wiederum von den Nutzungskategorien abhängig und wird für die Bemessung auf die Höhe des Handlaufes angesetzt. Laut ÖNORM B 1991-1-1 [11] ist die Horizontallast auf die Absturzsicherung nicht gleichzeitig mit der Vertikallast zu betrachten. Zur Horizontallast ist anzumerken, dass sie erst dann maßgebend wird, wenn die Brüstungshöhe größer als die Auskrügelungslänge, oder wenn ein Gebäude auf die Nutzungskategorie C5 bemessen wird.

TABELLE 18: HORIZONTALE LASTEN AUF ZWISCHENWÄNDE UND ABSTURZSICHERUNGEN [11]

Nutzungskategorie	$q_k$
	kN/m
Kategorien A und B1	0,5
Kategorien B2 und C1	1,0
Kategorien C2 bis C4 und D	1,0
Kategorie C5	3,0
Kategorie E	1,0

Weitere Nutzlasten, wie z.B. Schnee und Wind, werden im Zuge der Bemessung vernachlässigt, da die Nutzlasten nicht gleichzeitig mit einer Schneelast bzw. Windlast anzusetzen sind.

## 7.4 BEMESSUNG

Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchen und den mechanischen Hintergründen, die sich aus der Bauteilgeometrie ergeben, kann nun eine ausreichende Bemessung und Dimensionierung durchgeführt werden. Wie bereits in Kapitel 7.2 aufgezeigt, müssen im Zuge der Nachweisführung des Thermoelementes die verschiedensten Kriterien im Grenzzustand der Tragfähigkeit, sowie auch der Gebrauchstauglichkeit eingehalten werden. Für die Dimensionierung des Thermoelementes wird aus allen geführten Nachweisen das Minimum herangezogen. Um zu überprüfen, ob auch alle Nachweise mit der aus dem Minimum ermittelten Auskragungslänge und den dazugehörigen Schnittgrößen erfüllt sind, müssen alle relevanten Nachweise kontrolliert werden.

Das nachfolgende Beispiel soll zeigen, wie von den Schnittgrößen, die sich aus der Belastung der Kragplatte ergeben, auf die Betondrucknormalkraft und die Betonspannung an der Kontaktfläche, gerechnet wird. Formeln, die für die Berechnung herangezogen werden, sind dem Kapitel 7.2 entnommen. Die Eingangswerte sind der Tabelle 19 zu entnehmen.

TABELLE 19: EINGANGSWERTE FÜR NACHWEISFÜHRUNG

Eingangsparameter:	
Betongüte	C 30/37
Stahlgüte	BST550
n [Stk/m]	5
$h_{\text{Platte}}$ [cm]	18,00
$\theta_{\text{Strebe}}$ [°]	22,9
$z_{\text{Hebel}}$ [cm]	11,2
$A_{\text{Stirn}}$ [[cm] <sup>2</sup> ]	27

### **Bemessungsschnittgrößen Schnitt 1-1:**

$$M_{ed} = 21,79 \text{ [kNm]/Meter} \quad M_0 = 13,07 \text{ [kNm]/Meter} \quad M_2 = 10,07 \text{ [kNm]/Meter}$$

$$Q_{ed} = 23,46 \text{ [kNm]/Meter} \quad V_0 = 15,01 \text{ [kNm]/Meter} \quad V_2 = 11,05 \text{ [kNm]/Meter}$$

Die Umrechnung der Schnittgrößen auf die Bemessungsebene c-c erfolgt in diesem Beispiel direkt in der Ermittlung der Betondrucknormalkraft.

### **Ermittlung der Betondrucknormalkraft pro Element:**

$$N_{ed,vorh} = \frac{M_{ed}}{n \cdot z_{\text{Hebel}}} + \frac{V_{ed}}{n \cdot \tan(\theta)}$$

$$N_{ed,vorh} = \frac{21,79}{5 \cdot 0,112} + \frac{23,46}{5 \cdot \tan(22,9)} = 50,1 \text{ [kN]}$$

Als erster Nachweis wird jener der Betonspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt. Daher wird mit Hilfe der vorhandenen Betondruckfestigkeit des Normalbetons die maximale Drucknormalkraft  $N_{ed,zul}$  ermittelt, die vom Normalbeton aufgenommen werden kann. Aus diesem Grund wird die verwendete Betondruckfestigkeit mit der Kontaktfläche  $A_4$  (siehe Abbildung 33) multipliziert. Anhand dieses Nachweises ist auch jener der Betonspannung im ULS erfüllt.

$$N_{ed,zul} = \frac{f_{ck} \cdot \alpha_{cc}}{\gamma_M} \cdot A_4$$

$$N_{ed,zul} = \frac{30 \cdot 1,0}{1,5} \cdot 27 \cdot 10^{-1} = 54,0 \text{ [kN]}$$

$$N_{ed,vorh} = 50,1 \text{ [kN]} \leq N_{ed,zul} = 54 \text{ [kN]} \quad \checkmark \text{ Nachweis erfüllt!}$$

#### **Ermittlung der Betonspannung unter charakteristischer Lastfallkombination:**

$$\sigma_{c,vorh} = \frac{\frac{M_0}{n \cdot z} + \frac{V_0}{n \cdot \tan(\theta)}}{A_4}$$

$$\sigma_{c,vorh} = \frac{\frac{13,07}{5 \cdot 0,112} + \frac{15,01}{5 \cdot \tan(22,9)}}{27} \cdot 10 = 11,3 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{c,vorh} = 11,3 \text{ [MPa]} \leq \sigma_{c,zul} = k_1 \cdot f_{ck} = 0,60 \cdot 30 = 18,0 \text{ [MPa]} \quad \checkmark \text{ Nachweis erfüllt!}$$

#### **Ermittlung der Betonspannung unter quasi-ständiger Lastfallkombination:**

$$\sigma_{c,vorh} = \frac{\frac{M_2}{n \cdot z} + \frac{V_2}{n \cdot \tan(\theta)}}{A_4}$$

$$\sigma_{c,vorh} = \frac{\frac{10,07}{5 \cdot 0,112} + \frac{11,05}{5 \cdot \tan(22,9)}}{27} \cdot 10 = 8,6 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{c,vorh} = 8,6 \text{ [MPa]} \leq \sigma_{c,zul} = k_2 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot 30 = 13,50 \text{ [MPa]} \quad \checkmark \text{ Nachweis erfüllt!}$$

#### **Ermittlung der Stahlspannung unter charakteristischer Lastfallkombination:**

$$N_{GFK} = \frac{M_0}{n \cdot z} + \frac{V_0}{n \cdot \tan(\theta)}$$

$$N_{GFK} = \frac{13,07}{5 \cdot 0,112} + \frac{15,01}{5 \cdot \tan(22,9)} = 30,5 \text{ [kN]}$$

Für die Berechnung der Stahlspannung wird zuerst die Normalkraft in der GFK-Schleife ermittelt. Diese Kraft muss über eine Anschlussbewehrung in den Normalbeton eingeleitet werden. Als Anschlussbewehrung kommen 2 Schleifen mit  $\varnothing 10$  zum Einsatz.

$$A_{s,vorh} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{2 \cdot 10^2 \cdot \pi}{4} = 157,1 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{s,vorh} = \frac{N_{GFK}}{A_{s,vorh}} = \frac{30,5 \cdot 10^3}{157,1} = 194,1 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{s,vorh} = 194,1 \text{ [MPa]} \leq \sigma_{s,zul} = k_3 \cdot f_{yk} = 0,80 \cdot 550 = 440,0 \text{ [MPa]} \quad \checkmark \text{ Nachweis erfüllt!}$$

Anhand der folgenden Nachweise werden die Spannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit am UHPC-Druckteil kontrolliert.



### Ermittlung der Betonspannung (UHPC) unter charakteristischer Lastfallkombination:

$$\sigma_{UHPC,vorh} = \frac{\frac{M_0}{n \cdot z} + \frac{V_0}{n \cdot \tan(\theta)}}{A_1}$$

$$\sigma_{c,vorh} = \frac{\frac{13,07}{5 \cdot 0,112} + \frac{15,01}{5 \cdot \tan(22,9)}}{6} \cdot 10 = 50,7 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{UHPC,vorh} = 50,7 \text{ [MPa]} \leq \sigma_{UHPC,zul} = 0,60 \cdot 150 = 90,0 \text{ [MPa]} \checkmark \text{ Nachweis erfüllt!}$$

### Ermittlung der Betonspannung unter quasi-ständiger Lastfallkombination:

$$\sigma_{UHPC,vorh} = \frac{\frac{M_2}{n \cdot z} + \frac{V_2}{n \cdot \tan(\theta)}}{A_1}$$

$$\sigma_{UHPC,vorh} = \frac{\frac{10,07}{5 \cdot 0,112} + \frac{11,05}{5 \cdot \tan(24,54)}}{6} \cdot 10 = \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{UHPC,vorh} = 38,7 \text{ [MPa]} \leq \sigma_{UHPC,zul} = 0,45 \cdot 150 = 67,5 \text{ [MPa]} \checkmark \text{ Nachweis erfüllt!}$$

Die Nachweise zeigen, dass sich die Auskragung mit dem Thermoelement AVI-TE5 ausführen lässt. Die Bezeichnung TE5 soll die Anzahl der verwendeten Elemente bezogen auf einen Meter angeben, und TE steht für den Begriff Thermoelement. Eine weitere Methode zur Bemessung und Dimensionierung des Thermoelementes, stellt das Momenten / Querkraft Interaktionsdiagramm dar, welches in Kapitel 7.5 näher erläutert wird.

#### 7.4.1 AUSKRAGUNGLÄNGEN

---

Im Zuge der Erstellung des Bemessungskonzeptes werden durch Änderung der einzelnen Parameter wie z.B. Betongüte, Plattenhöhe oder Anzahl der Elemente pro Meter, die möglichen Auskragungslängen und die dazugehörigen Verformungen betrachtet. Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen die Ergebnisse, die sich bei der Berechnung der Auskragungslängen ergeben. Der Unterschied zwischen den eingefärbten Feldern ist die Anzahl der Elemente pro Meter. Ein weiterer Parameter der sich ändert ist die Nutzlast, die auf das System aufgebracht wurde.

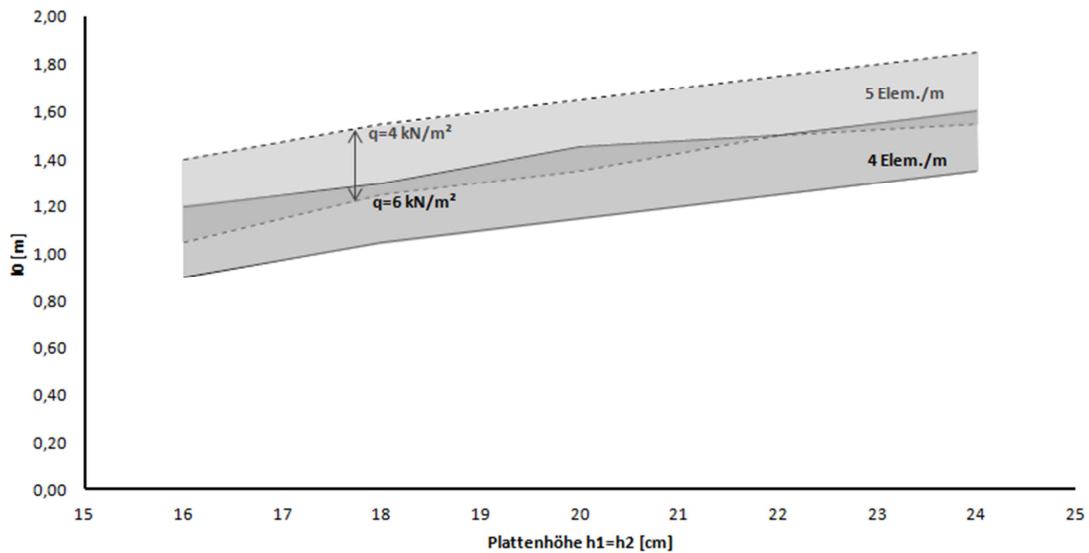


ABBILDUNG 53: AUSKRAGUNGLÄNGEN  $L_0$  KONSTANTE PLATTENHÖHE (C25/30)

Der Vergleich der Auskragungslängen wird zum einen mit einer konstanten Plattenhöhe durchgeführt, siehe Abbildung 53, zum anderen mit einer veränderlichen Höhe der Platte wie in Abbildung 54 dargestellt. Mit einer sich veränderten Plattenhöhe ist gemeint, dass sich die Höhe mit zunehmender Auskragung verjüngt. Die für die Berechnung maximal angesetzte Differenz zwischen der Höhe im Bereich der Einspannung und am auskragenden Ende beträgt 5[cm]. Der Verlauf der Kurven wird durch den Zuwachs der Auskragungslängen mit zunehmender Plattenhöhe bestimmt. Da der Zuwachs der Auskragungslänge nicht konstant ist, kommt es zu den Knicken in den Kurven, wie auch anhand der Werte in Tabelle 20 zu erkennen ist. Des Weiteren zeigt sich, dass sich die veränderliche Höhe positiv auf die Auskragungslänge auswirkt. Der Grund dafür ist die Reduktion des Eigengewichtes der Kragplatte von rund 15%.

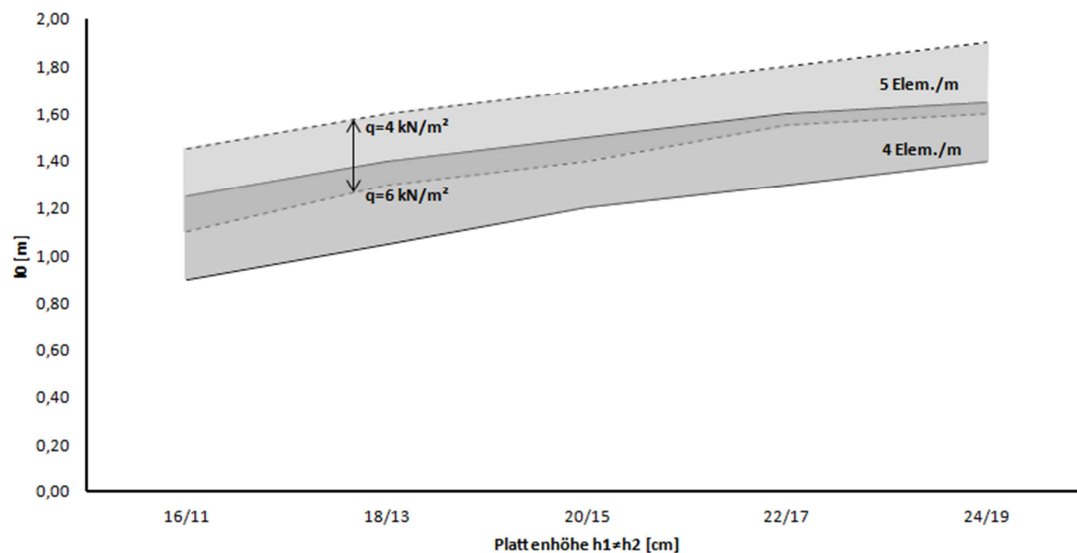


ABBILDUNG 54: AUSKRAGUNGLÄNGEN  $L_0$  VERÄNDERLICHE PLATTENHÖHE (C25/30)

In Tabelle 20 sind die Ergebnisse der Berechnung der Auskragungslängen nochmal dargestellt.

TABELLE 20: ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE FÜR DIE AUSKRAGUNGSLÄNGEN

Belastung	4 Element pro Meter			5 Elemente pro Meter		
	$q_1=4[\text{kN/m}^2]$	$q_1=5[\text{kN/m}^2]$	$q_1=6[\text{kN/m}^2]$	$q_1=4[\text{kN/m}^2]$	$q_1=5[\text{kN/m}^2]$	$q_1=6[\text{kN/m}^2]$
$h_{\text{Platte}} [\text{cm}]$	Auskragungslängen $l_0$ [m]					
16	1,20	1,10	0,90	1,40	1,30	1,05
18	1,30	1,25	1,05	1,55	1,45	1,25
20	1,45	1,35	1,15	1,65	1,55	1,35
22	1,50	1,45	1,25	1,75	1,65	1,50
24	1,60	1,50	1,35	1,85	1,75	1,55
16/11	1,25	1,15	0,90	1,45	1,35	1,10
18/13	1,40	1,30	1,05	1,60	1,50	1,30
20/15	1,50	1,40	1,20	1,70	1,60	1,40
22/17	1,60	1,50	1,30	1,80	1,70	1,55
24/19	1,65	1,55	1,40	1,90	1,80	1,60

#### 7.4.2 ÜBERHÖHUNGEN / VERFORMUNGEN

Die Durchbiegung  $w_{\text{max}}$  ist die größte mögliche Verformung, die im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit erreicht werden darf. Dieser Wert muss jedoch unterhalb der zulässigen Durchbiegung von  $l/250$  liegen. Die Betrachtung dieser Verformung ist nur im Falle der nicht eingehaltenen Biegeschlankheit (siehe Kapitel 7.2.6) notwendig. In Abbildung 55 sind die Verformungen, die für die Bemessung des Thermoelementes notwendig sind aufgetragen. Die Kurven ergeben sich aus einer Betongüte C25/30 und einer gleichbleibenden Höhe über die Auskragungslänge der Balkonplatte. In der Abbildung ist außerdem zu sehen, dass die vertikale Durchbiegung des Kragträgers mit zunehmender Bauteilhöhe und Auskragungslänge abnimmt. Der Grund dafür ist, dass das Verhältnis  $h_{\text{platte}}/l_0$  mit zunehmender Auskragung und Plattenhöhe größer wird, und daher kleinere Verformungen in vertikaler Richtung auftreten. Ein weiterer Aspekt der aus Abbildung 55 hervorgeht, ist der Knick in den Kurven für  $w_c$  und  $w_{\text{max}}$ , der darauf zurückzuführen ist, dass der Zuwachs der Auskragungslängen nicht konstant ist und daher eine Änderung der Steigung hervorgerufen wird.

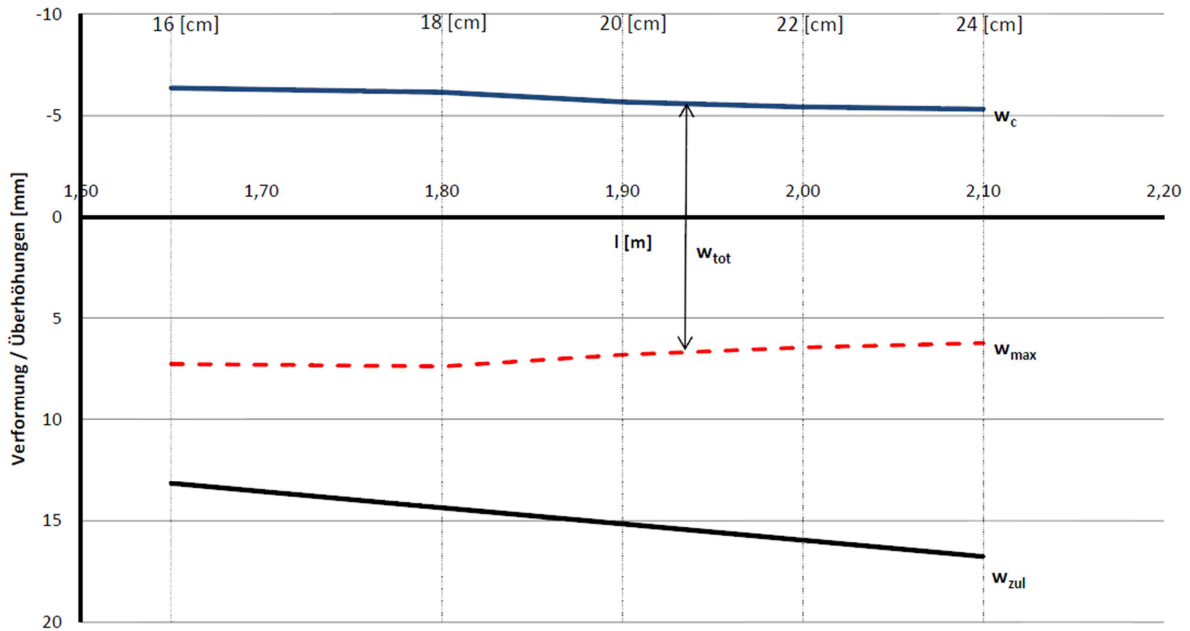


ABBILDUNG 55: ÜBERHÖHUNGEN/VERFORMUNGEN BEI KONstanTER PLATTENHÖHE (C25/30)

In Abbildung 56 ist die vorhandene und die laut ÖNORM EN 1992-1-1 [5 S. 140] ermittelte zulässige Biegeschlankheit in Abhängigkeit der Auskragungslänge  $l$ , der Bauteilhöhe  $h_{\text{Platte}}$  und den oben angeführten Parametern abgebildet. Es zeigt sich, dass die zulässige Biegeschlankheit nie überschritten wird und daher kein genauer Nachweis für die Verformung geführt werden muss.

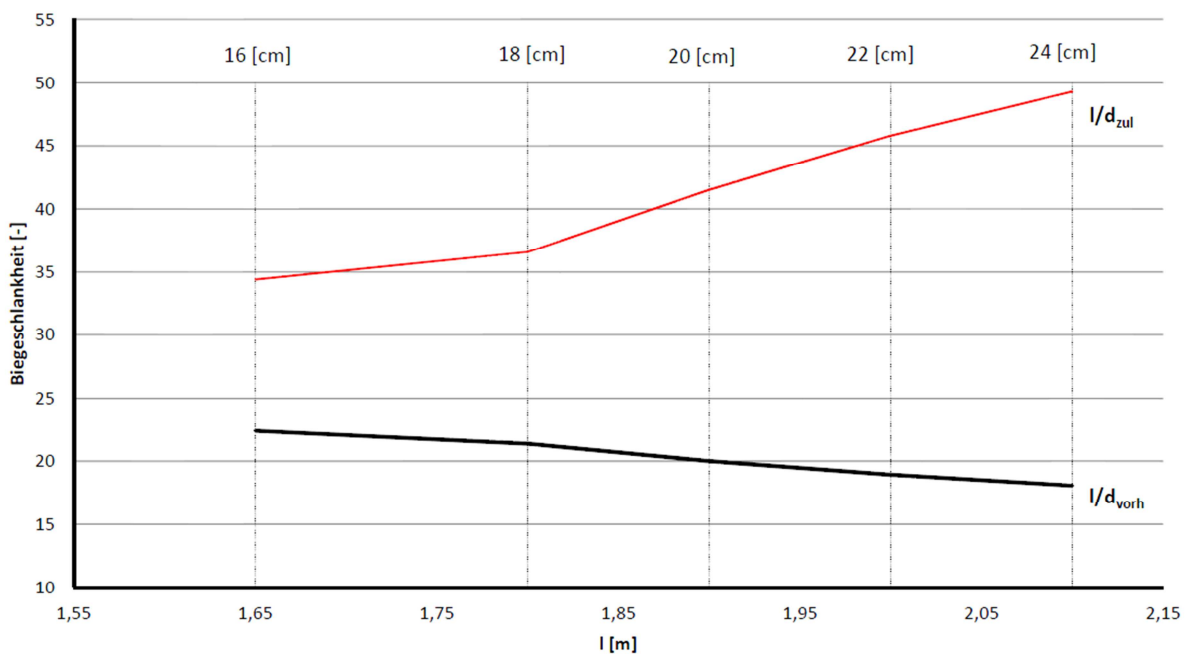


ABBILDUNG 56: BIEGESCHLANKHEIT

Die Werte der verschiedenen Verformungen, die in den oben angeführten Abbildungen grafisch dargestellt sind, können aus Tabelle 21 entnommen werden.

TABELLE 21: ERGEBNISSE FÜR VERFORMUNGSBERECHNUNG (C 25/30)

$h_{\text{Platte}}$ [cm]	$l_0/l$ [m]	$w_c$ [mm]	$w_{\text{tot}}$ [mm]	$w_{\text{max}}$ [mm]	$w_{\text{zul}}$ [mm]
16	1,40 / 1,65	6,35	13,6 / $(\frac{l}{242})$	7,3 / $(\frac{l}{452})$	13,16+
18	1,55 / 1,80	6,14	13,5 / $(\frac{l}{266})$	7,4 / $(\frac{l}{486})$	14,36
20	1,65 / 1,90	5,67	12,5 / $(\frac{l}{304})$	6,8 / $(\frac{l}{558})$	15,16
22	1,75 / 2,00	5,43	11,9 / $(\frac{l}{336})$	6,5 / $(\frac{l}{615})$	15,96
24	1,85 / 2,10	5,32	11,6 / $(\frac{l}{362})$	6,2 / $(\frac{l}{677})$	16,76

## 7.5 M / V INTERAKTIONSDIAGRAMM

Im Laufe der Erläuterung über das Tragverhalten des Thermoelementes wird öfters auf die getrennte Übertragung der Momenten- und Querkraftanteile, eingegangen. Dabei wird auf den Bereich der Dämmebene verwiesen, wo die einzelnen Kräfte getrennt voneinander über das UHPC-Formteil übertragen werden. Die Bemessung des Thermoelementes kann darüber hinaus auch mit Hilfe eines Momenten / Querkraft Interaktionsdiagrammes, wie in Abbildung 57 dargestellt, durchgeführt werden. Als Eingangsdaten benötigt der Anwender lediglich die vorhandenen Schnittgrößen, die sich aus der Berechnung seines Systems ergeben, um so schnell zum richtigen Thermoelement zu gelangen.

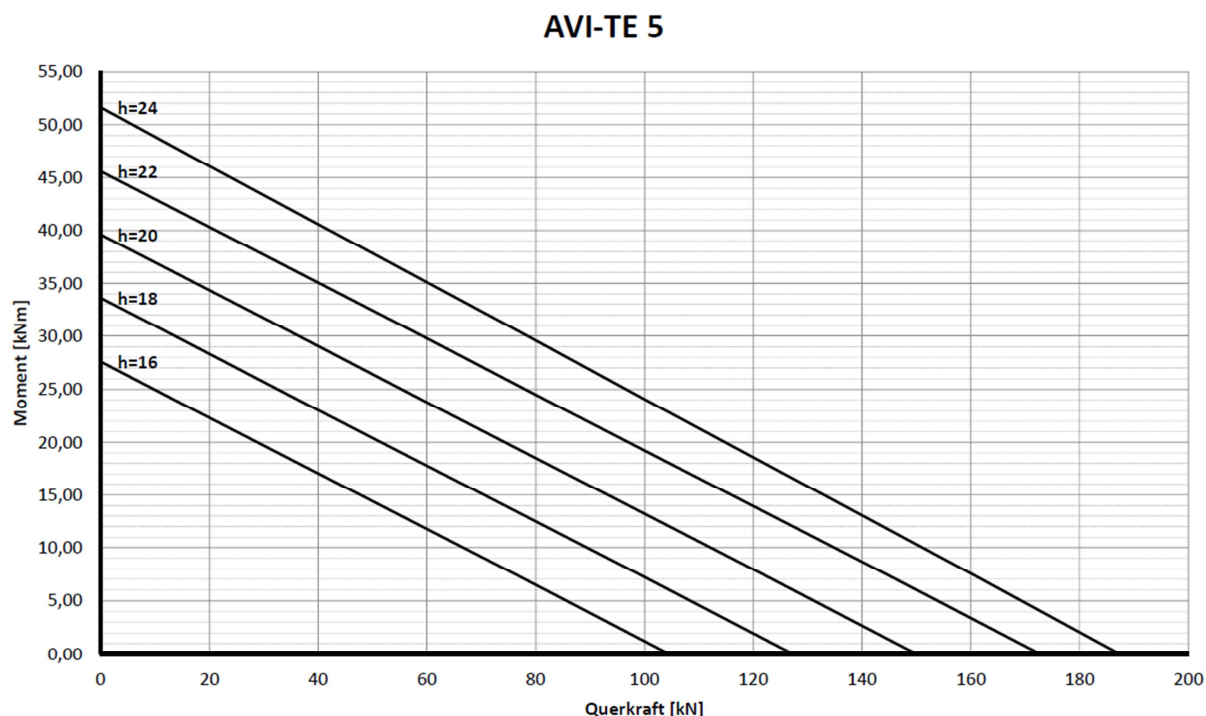


ABBILDUNG 57: M/V-INTERAKTIONSDIAGRAMM FÜR 5 ELEMENTE/METER

Anhand der Linien, die im Diagramm ersichtlich sind, werden die Widerstände der einzelnen Plattenhöhen in Abhängigkeit der verwendeten Elemente pro Meter festgelegt. So ergeben sich an der x-Achse (Abszisse) aus dem Grenzfall der reinen Querkraft ohne Momentwirkung mit

$$V_R = N_{rd,UHPC} \cdot \tan(\theta) \cdot n \quad (18)$$

und an der y-Achse (Ordinate) aus reinem Moment ohne Querkraftwirkung mit

$$M_R = N_{rd,UHPC} \cdot z \cdot n \quad (19)$$

Die Widerstände  $V_R$  und  $M_R$  entsprechen jenen des Schnittes 1-1 also der Schnittgrößenebene. Als Grundlage für die Berechnung der beiden Grenzwerte, wird die maximale Druckkraft im UHPC mit  $N_{rd,UHPC} = 60[kN]$  herangezogen (siehe 7.2.2).

Um eine passende Dimensionierung des Thermoelementes zu gewährleisten, können mit Hilfe der vorhandenen Schnittgrößen  $V_{ed}$  und  $M_{ed}$ , die Widerstandsschnittgrößen  $V_{rd}$  und  $M_{rd}$  ermittelt werden. Die mögliche Querkraft, die mit einer beliebigen Plattenhöhe erreicht werden kann, ergibt sich wie folgt:

$$V_{rd} = \frac{M_R}{\frac{M_R}{V_R} + \frac{M_{ed}}{V_{ed}}} \quad (20)$$

Das zugehörige Moment wird ermittelt aus:

$$M_{rd} = -\frac{M_R}{V_R} \cdot V_{rd} + M_R \quad (21)$$

Mit Hilfe dieser beiden Schnittgrößen und dem Beiwert  $f_U$  (Formel (22)) kann für eine bestimmte Plattenhöhe und Betongüte die realisierbaren Schnittgrößen rückgerechnet werden.

$$f_U = \frac{f_{ck,vorh}}{f_{ck,not}^{ULS}} \quad (22)$$

$$f_{ck,not}^{ULS} = \frac{f_{cd,UHPC}}{A_4} \cdot A_1 \cdot \gamma_M \quad (23)$$

$$E_{real} = E_{rd} \cdot f_U \quad (24)$$

$f_{ck,vorh}$	die für die Berechnung verwendete Betondruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ck,not}^{ULS}$	die für die Durchführung nötige Betondruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] (siehe Formel (23))
$E_{rd}$	Widerstandsschnittgröße $M_R$ und $V_R$

Die realisierbaren Schnittgrößen  $V_{real}$  und  $M_{real}$  werden durch Einsetzen in Formel (24) ermittelt. Ergeben sich nun bei  $M_{ed}/M_{real}$  und  $V_{ed}/V_{real}$  Werte größer gleich 1, kann das vorhandene System die Spannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht aufnehmen und muss daher angepasst werden. Folgende Anpassungen können in diesem Fall getroffen werden:

- Anpassen der Plattenhöhe  $h$
- Ändern der Auskragungslänge  $l_0$
- Erhöhen der Betongüte  $f_{ck,vorh}$
- Erhöhung der Elementanzahl pro Meter

Bevor die Bemessung des Thermoelementes abgeschlossen werden kann, müssen noch die Gebrauchstauglichkeitskriterien überprüft werden. Für diesen Nachweis erfolgt die Umrechnung der Schnittgrößen vom Grenzzustand der Tragfähigkeit in den der Gebrauchstauglichkeit. Diese Umrechnung erfolgt anhand von zwei Beiwerten  $\gamma_0$  und  $\gamma_2$ , die von der prozentuellen Aufteilung der ständigen und veränderlichen Einwirkungen abhängig sind. Diese werden wie folgt ermittelt:

$$\gamma_0 = \%_G \cdot \gamma_g + \%_Q \cdot \gamma_q \quad (25)$$

und

$$\gamma_2 = \%_G + \%_Q \cdot \psi_2 \quad (26)$$

$\gamma_0$	Beiwert zur Umrechnung auf charakteristisches Lastniveau
$\gamma_2$	Beiwert zur Umrechnung auf quasi-ständiges Lastniveau
$\%_G$	prozentueller Anteil ständiger Einwirkungen (Eigengewicht)
$\%_Q$	prozentueller Anteil veränderlicher Einwirkungen (Nutzlasten)
$\gamma_g$	Teilsicherheitsbeiwerte für ständige Lasten
$\gamma_q$	Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Lasten
$\psi_2$	Kombinationsbeiwert im Hochbau

Zur Berechnung der notwendigen Betondruckfestigkeit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden folgende Formeln herangezogen:

$$f_i = \frac{f_{ck,vorh}}{f_{ck,not}^{SLS_i}} \quad (27)$$

$$f_{ck,not}^{SLS_0} = \frac{f_{cd,UHPC} \cdot A_1}{A_4 \cdot \gamma_0} \cdot f_U \cdot \frac{1}{k_1} \quad (28)$$

$$f_{ck,not}^{SLS_2} = \frac{f_{cd,UHPC} \cdot A_1}{A_4} \cdot f_U \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_0} \cdot \frac{1}{k_2} \quad (29)$$

$f_{ck,not}^{SLS_i}$	notwendige Betondruckfestigkeit für Gebrauchstauglichkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$k_1$	Beiwert zur Begrenzung der Betonspannung im SLS char Lastfallkombination [5]
$k_2$	Beiwert zur Begrenzung der Betonspannung im SLS qs Lastfallkombination [5]

Anhand der Faktoren  $f_0$  und  $f_2$  kann der Nachweis der zulässigen Spannungen im SLS durchgeführt werden. Ergibt sich für  $f_0$  und  $f_2$  ein Wert größer gleich 1, dann sind die beiden Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit erfüllt.

Das nachfolgende Beispiel soll zeigen, wie man schnell das richtige Thermoelement für eine bestimmte Bauteilhöhe ermittelt.

TABELLE 22: EINGANGSPARAMETER M/V-BEMESSUNG

Eingangsparameter:			
Betongüte	C 30/37	$g_1$ [kN/m]	4,50
n [Stk/m]	5	$g_2$ [kN/m]	0,33
$h_{\text{Platte}}$ [cm]	18,00	$g_B$ [kN]	0,50
$d_{\text{Te}}$ [cm]	12,00	$q_1$ [kN/m]	4,00
$l_0$ [m]	1,70	$q_{3v}$ [kN]	1,0
$z_{\text{Hebel}}$ [cm]	11,2	$\gamma_G/\gamma_Q$	1,35/1,50



Für die Ermittlung der richtigen Schnittgrößen müssen die in Tabelle 22 angeführten charakteristischen Belastungen noch mit dem jeweiligen Teilsicherheitsbeiwert multipliziert werden.

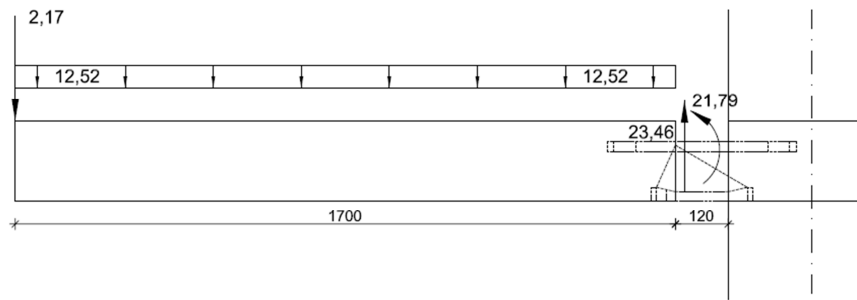


ABBILDUNG 58: SCHNITTGRÖßEN FÜR SYSTEM

Die Schnittgrößen aus Abbildung 58 entsprechen denen aus der Schnittebenen 1-1. Daher muss das Moment für die Bemessung noch um den Anteil der Querkraft multipliziert mit der Abmessung der Dämmebene erhöht werden, wie nachfolgend zu sehen ist.

$$M_{ed} = 21,8 \text{ [kNm]} \text{ (Schnitt 1 - 1)}$$

$$V_{ed} = 23,5 \text{ [kN]} \text{ (Schnitt 1 - 1)}$$

#### **Widerstände für Plattenhöhe 18 [cm]:**

$$V_R = N_{rd,UHPC} \cdot \tan(\theta) \cdot n \rightarrow V_R = 60 \cdot \tan(22,9) \cdot 5 = 126,7 \text{ [kN]}$$

$$M_R = N_{rd,UHPC} \cdot z \cdot n \rightarrow M_R = 60 \cdot 0,112 \cdot 5 = 33,6 \text{ [kNm]}$$

Als nächsten Schritt werden die möglichen Schnittgrößen ermittelt, die mit dieser Plattenhöhe zu erreichen sind.

$$V_{rd} = \frac{M_R}{\frac{M_R}{V_R} + \frac{M_{ed}}{V_{ed}}} \rightarrow V_{rd} = \frac{33,6}{\frac{33,6}{126,7} + \frac{21,79}{23,46}} = 28,2 \text{ [kN]}$$

$$M_{rd} = -\frac{M_R}{V_R} \cdot V_{rd} + M_R \rightarrow M_{rd} = -\frac{33,6}{126,7} \cdot 28,2 + 33,6 = 26,1 \text{ [kNm]}$$

$$f_{ck,not}^{ULS} = \frac{f_{cd,UHPC}}{A_4} A_1 \cdot \gamma_M \rightarrow f_{ck,not}^{ULS} = \frac{100}{27} \cdot 6 \cdot 1,50 = 33,3 \text{ [MPa]}$$

$$f_U = \frac{f_{ck,vorh}}{f_{ck,not}^{ULS}} \rightarrow f_U = \frac{30}{33,3} = 0,90 \text{ [-]}$$

#### **Ermittlung der realisierbaren Schnittgrößen:**

$$M_{real} = M_{rd} \cdot f_U \rightarrow M_{real} = 26,1 \cdot 0,90 = 23,5 \text{ [kNm]}$$

$$V_{real} = V_{rd} \cdot f_U \rightarrow V_{real} = 28,2 \cdot 0,90 = 25,4 \text{ [kN]}$$

### Kontrolle der Schnittgrößen:

$$\frac{M_{ed}}{M_{real}} = \frac{21,8}{23,5} = 0,93 \leq 1,0 \rightarrow \text{System möglich!}$$

$$\frac{V_{ed}}{V_{real}} = \frac{23,5}{25,4} = 0,93 \leq 1,0 \rightarrow \text{System möglich!}$$

Die Ausführung des Systems, wie die obige Berechnung zeigt ist möglich, daher müssen keine Änderungen am System vorgenommen werden.

### Nachweis der Gebrauchstauglichkeit:

Zuerst wird die nötige Betondruckfestigkeit in der charakteristischen- und der quasi-ständigen-Lastfallkombination ermittelt. Für die Druckfestigkeit des UHPCs ist ein C150 für die Berechnungen herangezogen worden.

$$\gamma_0 = \%_G \cdot \gamma_G + \%_Q \cdot \gamma_Q \rightarrow \gamma_0 = 0,52 \cdot 1,35 + 0,48 \cdot 1,50 = 1,42 [-]$$

$$\gamma_2 = \%_G \cdot \gamma_G + \%_Q \cdot \psi_2 \rightarrow \gamma_2 = 0,52 + 0,48 \cdot 0,3 = 0,66 [-]$$

$$f_{ck,not}^{SLS_0} = \frac{f_{cd,UHPC} \cdot A_1}{A_4 \cdot \gamma_0} \cdot f_U \cdot \frac{1}{k_1} \rightarrow f_{ck,not}^{SLS_0} = \frac{100 \cdot 6}{27 \cdot 1,42} \cdot 0,90 \cdot \frac{1}{0,6} = 23,5 [MPa]$$

$$f_{ck,not}^{SLS_2} = \frac{f_{cd,UHPC} \cdot A_1}{A_4} \cdot f_U \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_0} \cdot \frac{1}{k_1} \rightarrow f_{ck,not}^{SLS_2} = \frac{100 \cdot 6}{27} \cdot 0,90 \cdot \frac{0,66}{1,42} \cdot \frac{1}{0,45} = 20,7 [MPa]$$

$$f_0 = \frac{f_{ck,vorh}}{f_{ck,not}^{SLS_0}} \rightarrow f_0 = \frac{30}{23,5} = 1,3 [-] \rightarrow \text{Nachweis erfüllt!}$$

$$f_2 = \frac{f_{ck,vorh}}{f_{ck,not}^{SLS_2}} \rightarrow f_2 = \frac{30}{20,7} = 1,5 [-] \rightarrow \text{Nachweis erfüllt!}$$

Abbildung 59 zeigt das Moment-Querkraft-Interaktionsdiagramm für das oben gerechnete Beispiel. Der Datenpunkt mit der Beschriftung  $E_d$ , welcher die vorhandenen Schnittgrößen des Systems zeigt, liegt im grün hinterlegten Bereich des Diagrammes. Das System ist daher umsetzbar. Der rote Bereich ist jener, in dem die Spannungen für den Normalbeton zu groß sind, und es zu einem Versagen kommt. Des Weiteren sind die Verhältnisse der charakteristischen- und quasi-ständigen Lastfallkombination im Diagramm eingetragen.

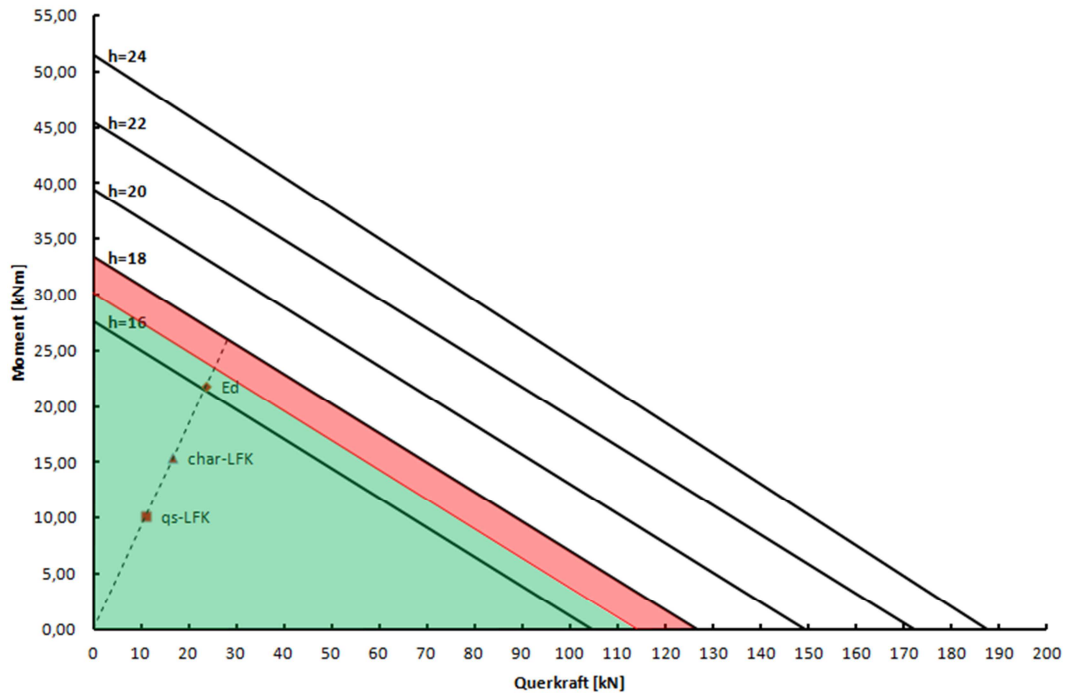


ABBILDUNG 59: M/V-INTERAKTIONSDIAGRAMM FÜR AVI-TE5

## 8 KONSTRUKTIVE DURCHBILDUNG

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie der Übergang zwischen einem innen liegenden und einem auskragenden Bauteil konstruktiv ausgeführt wird. Die gezeigten Varianten beinhalten die konstruktive Durchbildung des Bereiches, in dem sich das Thermoelement befindet. Die restlichen Ausführungen sind den örtlichen Gegebenheiten anzupassen.

### 8.1 STANDARDAUSFÜHRUNG OHNE HÖHENSPRUNG

Bei der Standardausführung ohne Höhensprung handelt es sich um eine Variante, bei der das innere und das äußere Niveau im Rohbauzustand gleich sind. Aus Abbildung 60 ist die konstruktive Durchbildung dieser Variante ersichtlich. Hierbei ist zu erkennen, dass es sich bei dieser Ausführungsvariante in Bezug auf die Herstellung, um die einfachste handelt. Auf Grund des gleichen Niveaus auf Innen- und Außenseite, kommt eine stecknadelförmige Anschlussbewehrung zum Einsatz, welche in die GFK-Schlaufe eingehängt werden muss. Ein möglicher Nachteil dieser Variante ist, wenn der Bodenaufbau an der Außenseite geringer ausfällt als im Inneren, so würde es zu einem Niveausprung kommen.

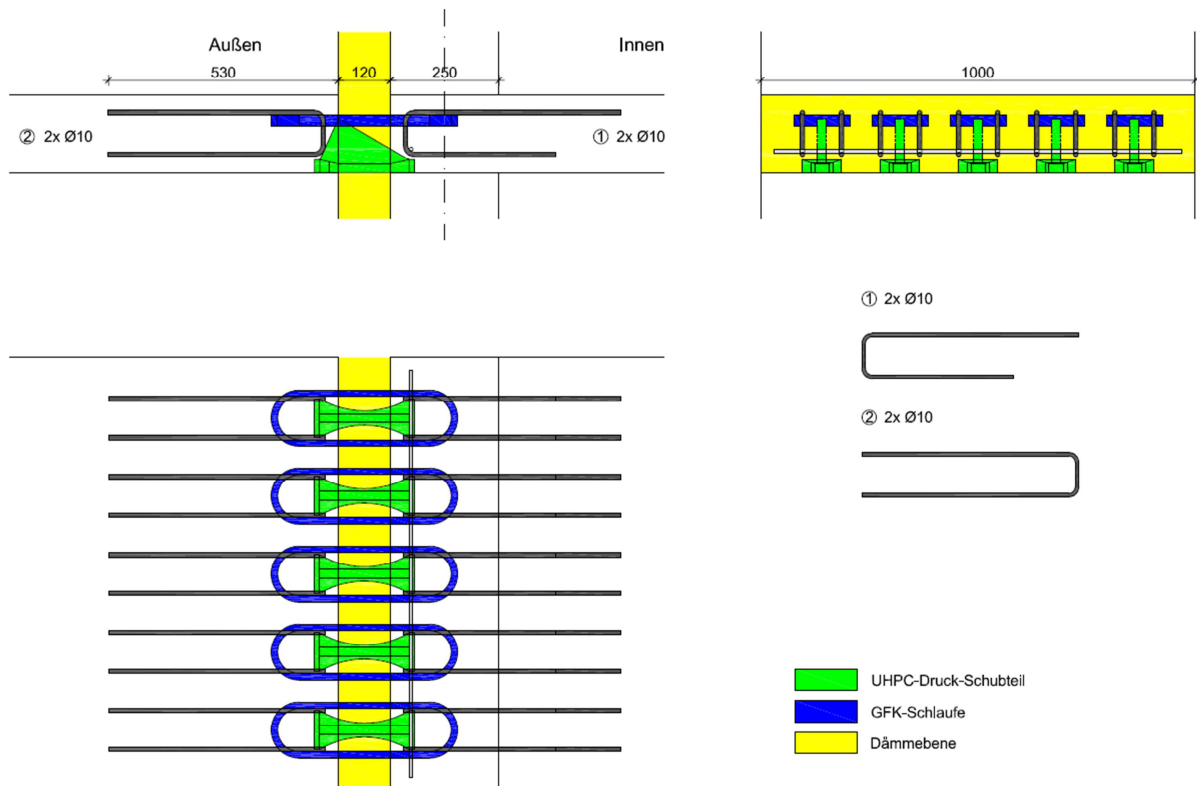


ABBILDUNG 60: STANDARD OHNE HÖHENSPRUNG

## 8.2 ÜBERGANG MIT KLEINEM HÖHENSPRUNG INNEN UND AUßEN

In Abbildung 61 ist eine Ausführungsvariante dargestellt, bei der es bei höherem Innenbodenaufbau und kleineren Außenbodenaufbau im Endzustand zu keinem Höhensprung kommt. Die Schwierigkeit bei dieser Variante ist es, die Kraft auf der Innenseite zu verankern, da durch den Höhensprung die Zugkräfte lagenmäßig versetzt werden. Aus diesem Grund ist es notwendig durch die unten gezeigten Anschlussbewehrung mit der Positionsnummer 1, dies zu bewerkstelligen. Die Höhe des Sprunges bei der hier gezeigten Variante beträgt 140mm. Diese Höhe entspricht jener eines standardisierten Fußbodenaufbaus, durch den sich ein Niveauegleich herstellen lässt. Die Höhe des Sprunges kann den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Mit zunehmender Höhe müssen zusätzliche konstruktive Maßnahmen wie in 8.3 beschrieben, durchgeführt werden.

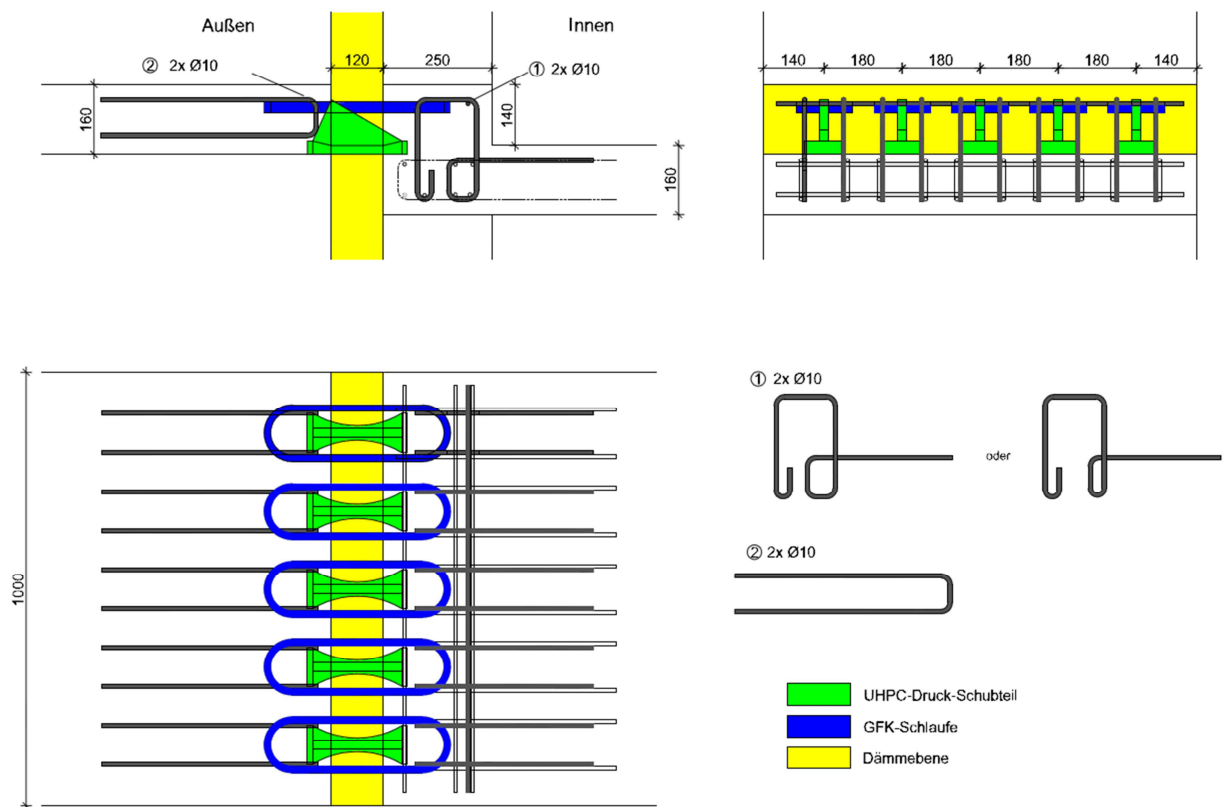


ABBILDUNG 61: ÜBERGANG MIT KLEINEM HÖHENSPRUNG INNEN

Eine weitere Variante mit einem kleinen Höhengsprung ist jene, bei der sich der Niveausprung auf der Außenseite, also an der Auskragung befindet. Diese Ausführung ist in Abbildung 62 dargestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten ist die verwendete Anschlussbewehrung, welche hierbei mit einem Bügel  $\varnothing 10$  Pos.1 und der dazugehörigen Nadel  $\varnothing 8$  Pos.3 ausgeführt werden muss.

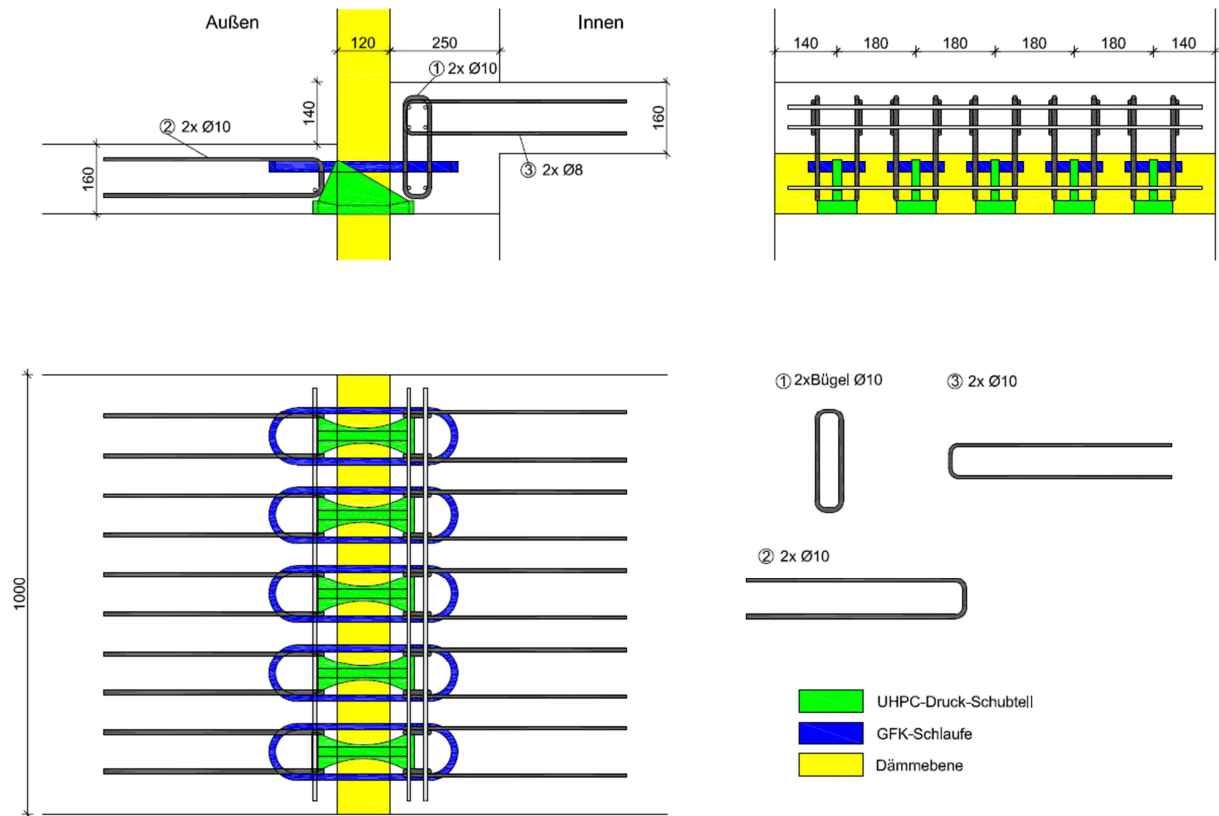


ABBILDUNG 62: ÜBERGANG MIT KLEINEM HÖHENSPRUNG AUßEN

### 8.3 ÜBERGANG MIT GROßEM HÖHENSPRUNG

Bei einer Ausführungsvariante mit großem Höhengsprung muss zusätzlich noch eine konstruktive Bewehrung eingelegt werden. Diese Haken (Pos.3), die in der Abbildung 63 Rot hinterlegt sind, dienen zur Aufnahme der auftretenden Querkraft. Die genaue Anzahl der Haken und deren Aufteilung sind von der Abmessung des Höhengsprungs abhängig.

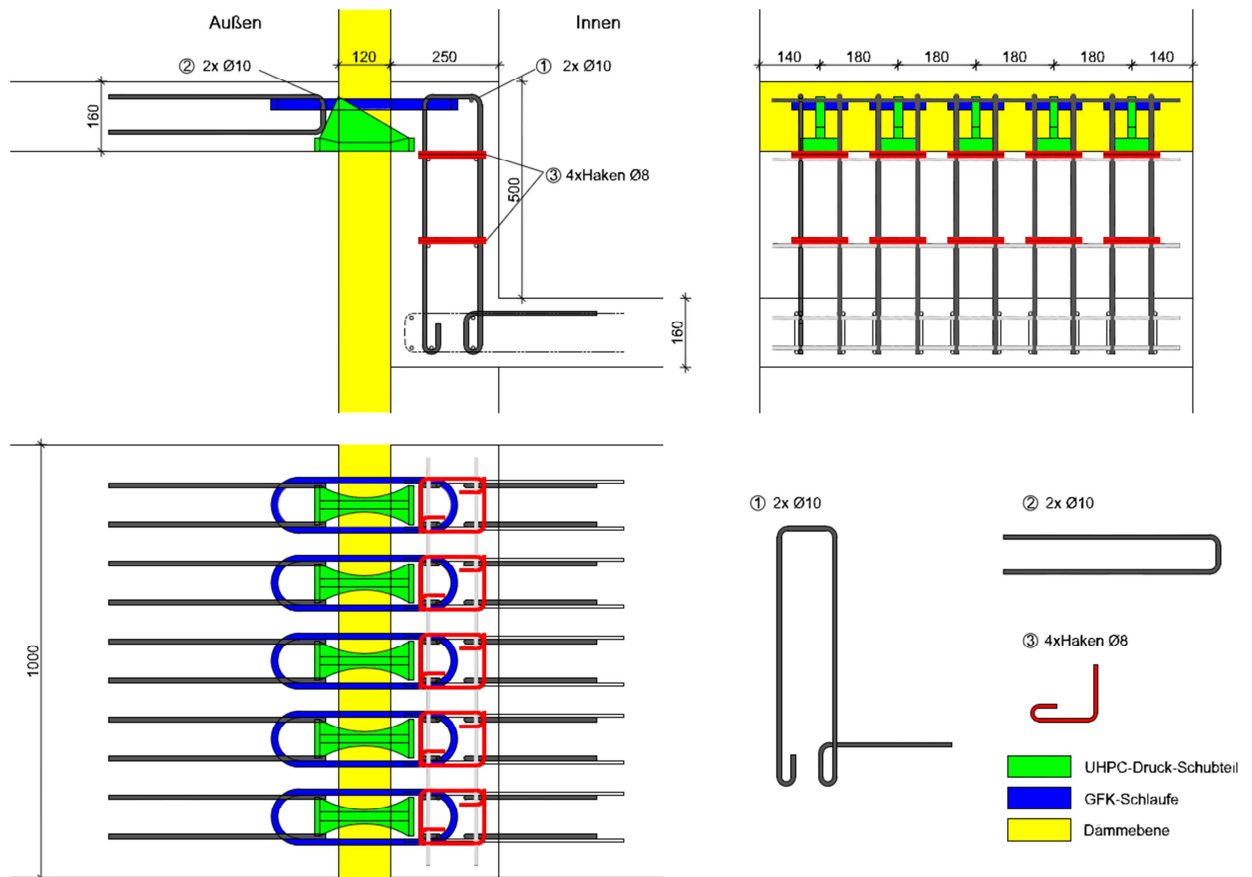


ABBILDUNG 63: ÜBERGANG MIT GROßEM HÖHENSPRUNG

## 8.4 INDIREKTE LAGERUNG

Bei der indirekten Lagerung, befindet sich im Bereich der thermischen Trennung zwischen der Innen- und Außenseite kein Auflager. Hierbei muss die konzentrierte Schubkraft, die normalerweise ins untere Bauteil fließt über Bügel aufgefangen und verteilt in die Platte eingeleitet und zum Auflager geleitet werden. Aus diesem Grund müssen noch zusätzliche Bügel (Pos.4) mit eingelegt werden, wie in Abbildung 64 zu sehen ist. Die den Thermoelement umfassende Bügelfläche (Pos.3) muss ausreichen, um die Querkraft aufzunehmen. Die Anzahl der Bügel und auch deren Abstand zueinander sind von der Größe der Kraft abhängig. Damit der innere Hebelarm nicht verändert wird, muss die Decke auf der Auflagerseite um den Anteil der Betondeckung und des Bügeldurchmessers vergrößert werden.

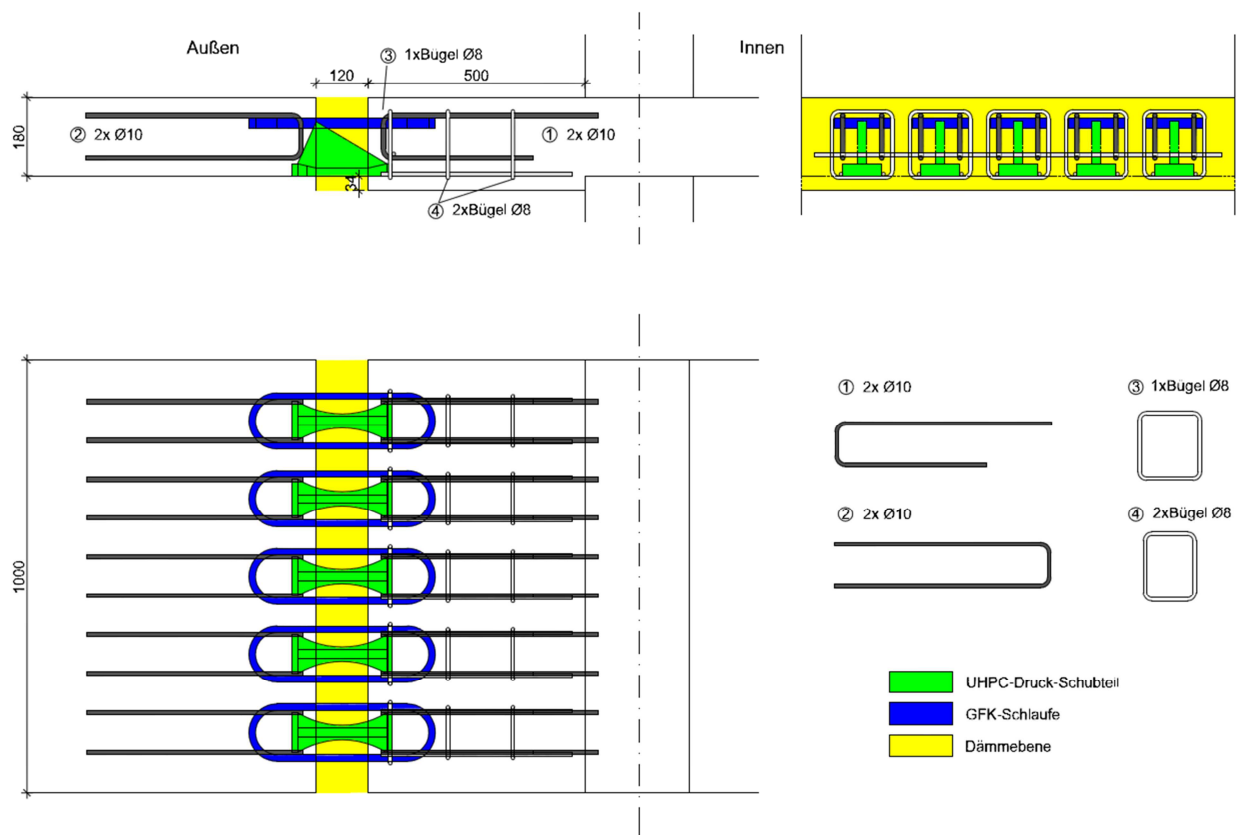


ABBILDUNG 64: INDIREKTE LAGERUNG



## 8.5 AUSSPRINGENDE ECKE MIT KLEINEM HÖHENSPRUNG INNEN / AUßEN

Bei der Ausbildung der Ecken werden zwei Varianten unterschieden, zum einen das ausspringende Eck (Abbildung 65) und zum anderen das einspringende Eck (Abbildung 66). Der Unterschied zwischen den beiden Varianten liegt in der Bewehrungsführung im auskragenden Bauteil wie anhand der Abbildungen zu sehen ist.

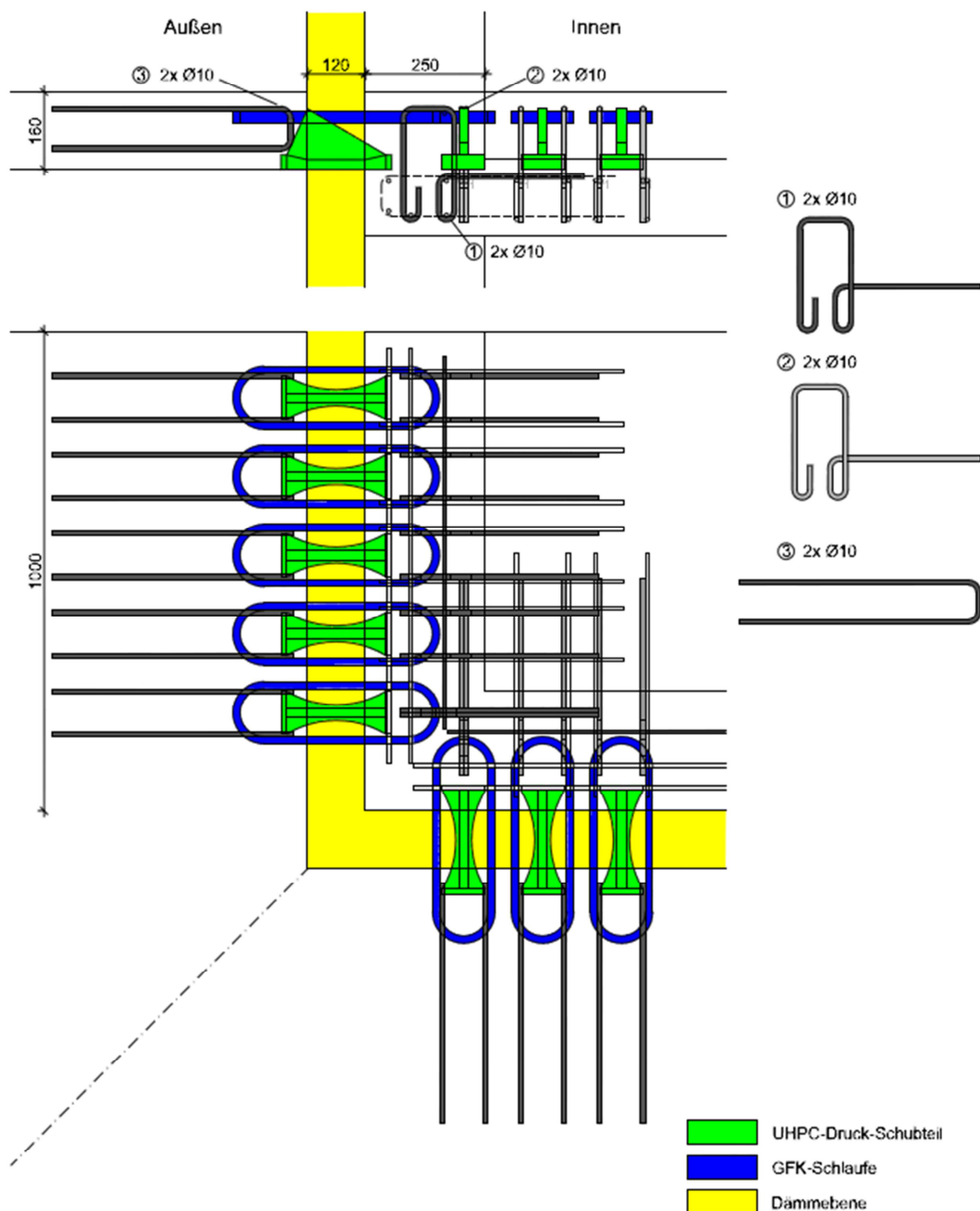


ABBILDUNG 65: AUSSPRINGENDE ECKE MIT KLEINEM HÖHENSPRUNG INNEN

Bei einer Balkonplatte, die ums Eck geführt wird, ist auf die Abstände der einzelnen Komponenten untereinander zu achten. Die Randabstände des ersten Thermoelements sind nach dem Knick größer als bei einem normal auskragenden Bauteil. Der Grund für die Vergrößerung der Abstände zur Ecke hin ist, dass es zu einer Kollision der GFK-Schlaufen kommt. Außerdem können bei einer Ausbildung um ein Eck nur 5 Elemente auf den ersten Meter nach dem Eck angeordnet werden.

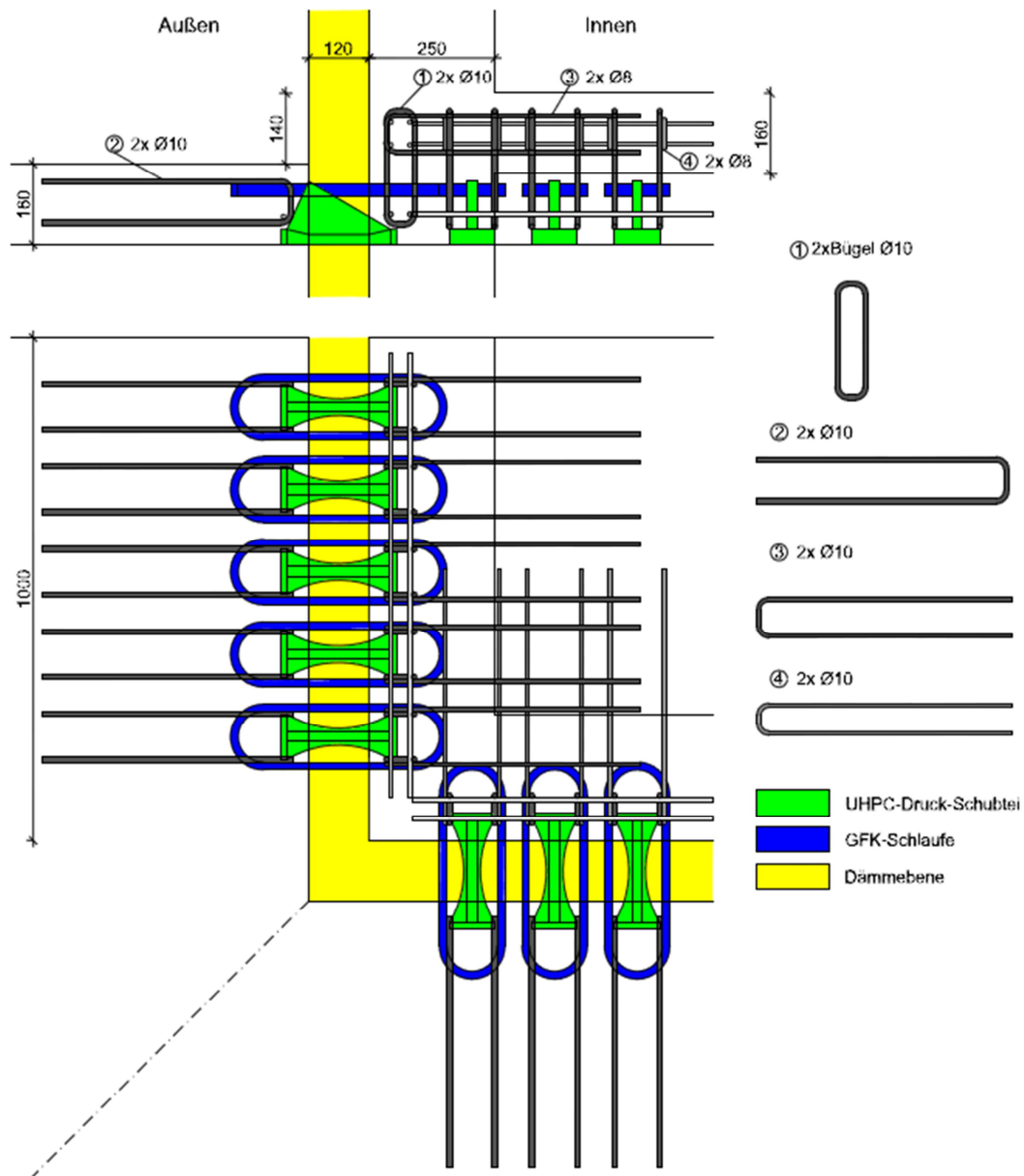


ABBILDUNG 66: AUSSPRINGENDE ECKE MIT KLEINEM HÖHENSPRUNG AUBEN

## 8.6 ATTIKA

Bei Flachdächern kommt als Randabschluss oft auf eine Aufmauerung zum Einsatz, welche als Attika bezeichnet wird. Sie wird ebenfalls als Absturzsicherung bei begehbaren Dächern verwendet. Aufgrund der geringen Lasten (Horizontallasten aus Wind und der Absturzsicherung), die auf eine Attika wirken, sind im Vergleich zu einer konventionellen horizontalen Auskragung weniger Thermoelemente pro Meter erforderlich (Abbildung 67). Durch eine mögliche beidseitige Belastung müssen die Thermoelemente in beide Richtungen versetzt angeordnet werden. Da es für die Elemente, welche die Last von der Dachseite aufnehmen müssen zu einer quasi indirekten Lagerung kommt, müssen hier konstruktive Maßnahmen gesetzt werden. Aus diesem Grund, werden in diesem Fall die Elemente herein gerückt und mit einem Bewehrungsseisen, Positionsnummer 3, umfasst.

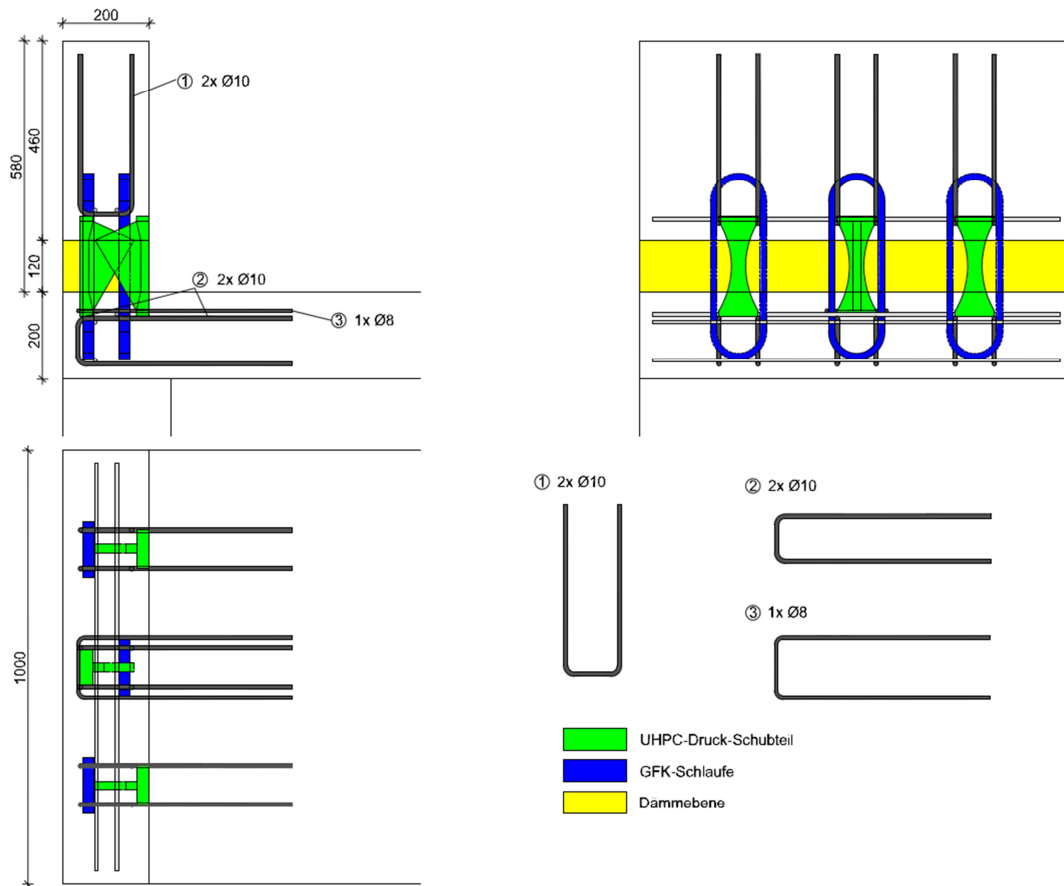


ABBILDUNG 67: ATTIKA

## 8.7 KONSOLE

Wie in Abbildung 68 zu sehen ist, unterscheidet sich die Variante der Konsole nur im geringen Ausmaß von der Standardausführung ohne Höhengsprung. Durch die geringere Auskrügelungslänge kommt es zu einer größeren Querkraftbeanspruchung, die mit Hilfe einer zusätzlichen Bügelbewehrung bis in den Auflagerbereich geführt wird. Aufgrund der zahlreichen Möglichkeiten eine Konsole einzusetzen, muss die zusätzlich benötigte Bewehrung den Gegebenheiten angepasst werden. Ein wesentlicher Punkt, der genauer betrachtet werden muss, ist die Verankerungslänge laut ÖNORM EN 1992-1-1 [5], um die Kräfteinleitung auf der Auskrügelungsseite sicherzustellen. Natürlich ist es auch möglich die Konsole mit einem kleinen oder großen Höhengsprung auszuführen (siehe Kapitel 8.2 und 8.3).

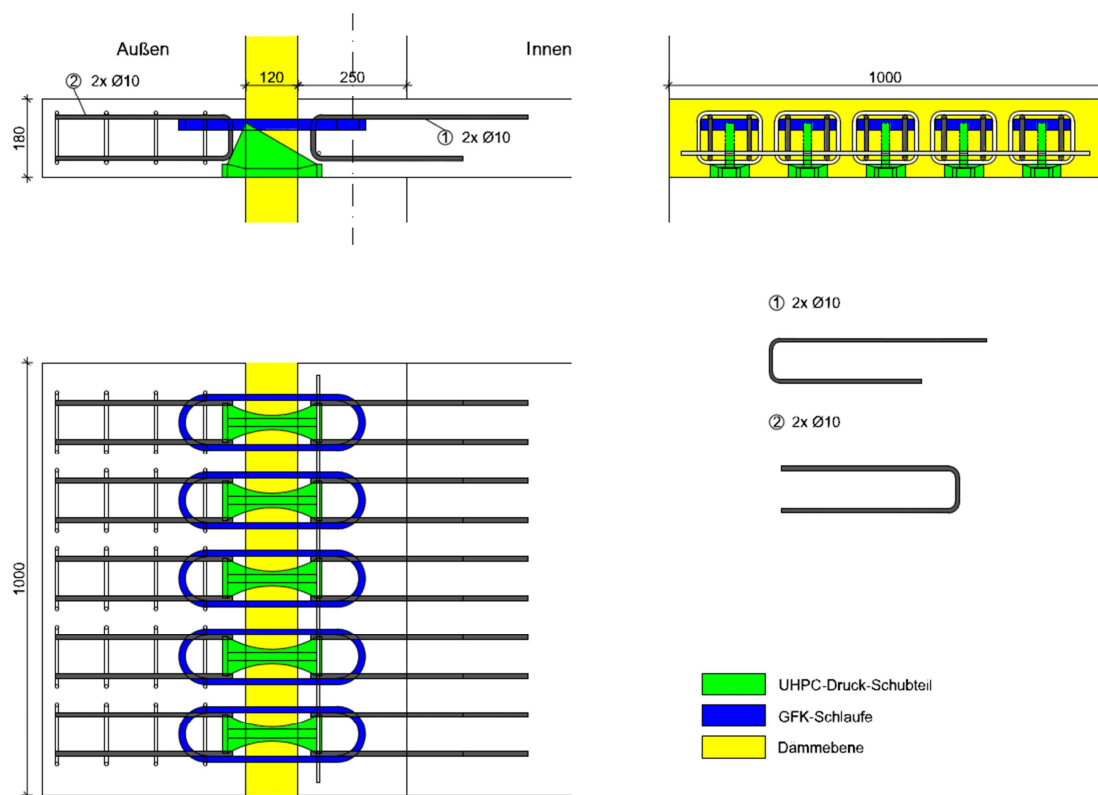


ABBILDUNG 68: KONSOLE

## 8.8 AUSFÜHRUNGSHINWEISE

---

Ein wichtiger Hinweis zur Ausführung ist die Verwendung der Anschlusseisen, welche die Aufgabe haben, die Kraft aus der GFK-Schlaufe in den Normalbeton zu übertragen. Die maximale Kraft, die von der GFK-Schlaufe an die Anschlusseisen abgegeben werden kann, ist jene des UHPC Druckteils, welche mit  $N_{ed,UHPC} = 60[kN]$  begrenzt ist. Damit diese Kraft in den Normalbeton übergeben werden kann, benötigt man entweder zwei Schlaufen  $\varnothing 10$  oder drei Schlaufen  $\varnothing 8$ . Im Kapitel 8 ist die Variante mit zwei Schlaufen  $\varnothing 10$  dargestellt. Die Kraft die von den Anschlusseisen aufgenommen werden kann, beträgt für die 2x  $\varnothing 10$  ein  $N_{s,max} = 75,13[kN]$  und für 3x  $\varnothing 8$  ein  $N_{s,max} = 72,12[kN]$ . Welche Variante der Anschlussbewehrung zum Einsatz kommt, ist von den Platzverhältnissen vor Ort abhängig.

Die Anordnung von konstruktiver Bewehrung, die Verankerungslängen im Normalbeton der Anschlussbewehrung, die zugehörigen Biegerollendurchmesser sowie die erforderliche Betondeckung sind der ÖNORM EN 1992-1-1 [5] und dem nationalen Anwendungsdokument ÖNORM B 1992-1-1 [6] zu entnehmen.

Bei der Herstellung des Thermoelementes auf der Baustelle ist darauf zu achten, dass das UHPC-Formteil mit der vollen Fläche am Mauerwerk aufliegt, damit es nicht wie in Kapitel 5.3.1 zu einer klaffenden Fuge kommen kann. Der Vorteil in der Praxis ist, dass im Auflagerbereich des Thermoelementes durch die Aufmauerung zu einer quasi Einspannung und dadurch nicht wie im Versuch zu einem wegdrücken des Versuchskörpers kommt.

## 9 RESÜMEE

---

### 9.1 ZUSAMMENFASSUNG

---

Mit Hilfe verschiedener Biegeversuchsserien konnte das Tragverhalten der Thermoelemente eingehend untersucht werden. Die Ergebnisse der einzelnen Serien haben gezeigt, dass trotz der unterschiedlichen Versuchsausführungen in Bezug auf den Aufbau, und deren M/V-Verhältnisse, vergleichbare Ergebnisse erzielt wurden. Dieser Umstand ist auch anhand der Gegenüberstellung der Versuchsdaten innerhalb der Serien, sowie im Vergleich der Serie 1 und 2 ersichtlich. Lediglich die Versuchsserie 3 konnte für die Gegenüberstellung nicht herangezogen werden, da es sich hier um Sonderformen handelte. Anhand der Versuchsergebnisse war es möglich, den Kraftfluss zur Beschreibung des Tragverhaltens vom untersuchten Thermoelement abzubilden und mit Formeln wiederzugeben. Die gute Übereinstimmung des erstellten Rechenmodells mit den Versuchsdaten zeigen die Nachrechnungen der Momenten-Winkelöffnungs-Beziehung, die im Zuge der Versuchsauswertung durchgeführt wurden.

Die Bemessung des Thermoelementes stützt sich auf die Anforderungen die in ÖNORM EN 1992-1-1 [5] angeordnet sind. Hierfür wurden die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit betrachtet. Das Hauptaugenmerk bei der Bemessung fällt auf die Kräfte, welche über die Dämmebene übertragen und anschließend in den Normalbeton eingeleitet werden müssen. Außerdem wurden die Verformungen die sich auf Grund der Starrkörperverdrehung des Thermoelementes am System einstellen genauer untersucht. Damit die Verformungen unter der quasi-ständigen Lastfallkombination den Grenzwert von  $l/250$  nicht überschreitet, kann die Balkonplatte überhöht werden. Diese Überhöhung soll der infolge des Eigengewichts entsprechen, damit sich zum Zeitpunkt  $t=0$  keine Verformungen am System einstellen. In weiterer Folge wurden im Zuge der Bemessung die möglichen Auskragungslängen ermittelt, welche durch den Einsatz des Thermoelementes umgesetzt werden können. Unter der Annahme einer Betongüte C25/30, einer Plattenhöhe von 18 [cm], 4 [kN/m<sup>2</sup>] Nutzlast und der Verwendung von 5 Elementen pro Meter, ist eine Auskragung bis zu 1,55 [m] möglich. Durch die Verjüngung der Betonplatte mit zunehmender Auskragung um 5 [cm], kann eine Auskragung von 1,60 [m] realisiert werden. Um die Bemessung zu vereinfachen, wurde im Bezuge des Bemessungsmodelles ein Momenten-Querkraft-Interaktionsdiagramm erstellt. Für die Verwendung des Interaktionsdiagramms werden lediglich die vorhandenen Schnittgrößen für die Auskragung benötigt. Diese Schnittgrößen werden im Diagramm aufgetragen und anschließend wird mit Hilfe von adäquaten Formel die Bemessung durchgeführt.

Ein weiterer Punkt, der in dieser Arbeit betrachtet wurde, ist die konstruktive Durchbildung von möglichen Varianten, bei denen das Thermoelement eingesetzt werden kann. Diese Durchbildungen beschränken sich jedoch nur auf den Bereich der Wärmedämmelemente und dessen Anschlussbereiche. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Einleitung der Zugkräfte in den Normalbeton, welche von der GFK-Schlaufe übergeben werden. Besonders bei den Varianten mit den Niveausprüngen stellte die Verankerung der Zugkräfte in den Normalbeton eine Herausforderung dar. Eine genauere Betrachtung galt auch den Ausführungen, bei denen die Auskra-

gung ums Eck geführt wurde, da hier auf mögliche Kollisionen der einzelnen Bewehrungsstäben geachtet werden musste.

## 9.2 AUSBLICK

---

Dieses Forschungsprojekt hat sich bis dato intensiv mit der Forschung und Bemessung der Thermolemente auseinandergesetzt, dennoch besteht vor allem im Bereich der Sonderformen, die im Zuge der Biegeversuchsserie 3 betrachtet wurden, noch wesentlicher Forschungsbedarf. Einer genaueren Betrachtung bedarf es vor allem im Bereich der Ausführung einer indirekten Lagerung. Hierbei wäre es einerseits notwendig die Bewehrungsführung, welche in der konstruktiven Durchbildung gezeigt wurde, einzusetzen und zu prüfen und andererseits sollte den Höhengsprüngen (klein) mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden, da diese in der Praxis häufig vorkommen.

Ebenso müsste man noch den Einbau des Thermolementes mit allen dazugehörigen Komponenten in der Praxis testen, um zu prüfen, ob die Ausführungen, welche in der konstruktiven Durchbildung theoretisch dargestellt sind, auch in der Praxis umsetzen lassen.

Der große praktische Vorteil der Verwendung von Wärmedämmelementen in auskragenden Stahlbetonbauteilen, basierend auf speziellen hochfesten Materialien, ist hauptsächlich in der Reduktion des Wärmeverlustes zu finden. Daraus resultiert eine Verringerung des Energieverlustes und eine Senkung der Energiekosten, wovon die Endkunden am Ende profitieren und sich für die Verwendung dieses Thermolementes entscheiden.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abbildung 1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm UHPC [3].....	3
Abbildung 2: Festigkeit der verschiedenen Faser unter Temperatureinfluss [4].....	4
Abbildung 3: Versuchsaufbau Zugversuch-Schlaufe [2].....	5
Abbildung 4: CFK (oben links), GFK Variante 1 (unten li), GFK Variante 2 (re) .....	6
Abbildung 5: Versuchsaufbau (li) und Versuchsdurchführung (re).....	7
Abbildung 6: Versuchskörper für Ausziehversuch der GFK-Schlaufe [2] .....	8
Abbildung 7: Probekörper nach Versuch .....	9
Abbildung 8: Versuchskörper (MV2-1s) .....	10
Abbildung 9: Versuchskonfiguration .....	11
Abbildung 10: Schnittebenen für Auswertung.....	11
Abbildung 11: Biegeversuchskörper Serie1.....	12
Abbildung 12: Schubversuchskörper Serie 1.....	13
Abbildung 13: Kanalplan Serie 1.....	13
Abbildung 14: Biegeversuchskörper MV2-1 / MV2-2 .....	14
Abbildung 15: Biegeversuchskörper MV2-1s / MV2-2s .....	15
Abbildung 16: Biegeversuchskörper MV2-1b / MV2-2b .....	16
Abbildung 17: Lasteinleitung bei 3 Elementen .....	16
Abbildung 18: Biegeversuchskörper MV3-1 und MV3-2.....	17
Abbildung 19: Biegeversuchskörper MV3-3 und MV3-4.....	18
Abbildung 20: Kanalplan Serie 3.....	19
Abbildung 21: Versagensbild MV1-1 und MV1-2 .....	20
Abbildung 22: Versagensbild MV1-3 (li) und MV1-4 (re) .....	21
Abbildung 23: Versagensbilder MV2-1 (li) und MV2-2 (re).....	22
Abbildung 24: Versagensbild MV2-1s (li) und Mv2-2s (re) .....	22
Abbildung 25: Druckstrebenwinkel MV2-1b .....	23
Abbildung 26: Versagensbild MV3-1 (li) und MV3-2 (re) .....	24
Abbildung 27: Versagensbild MV3-3 und MV3-4 .....	24
Abbildung 28: Bauteilgeometrie, Aufriss oben, Grundriss unten .....	26
Abbildung 29: Krafteinleitung-Normalbeton .....	27
Abbildung 30: Kraftaufteilung .....	27



Abbildung 31: Krafteinleitung der Schlaufe .....	28
Abbildung 32: Dehnungszustand mit gezeigter Krümmung .....	29
Abbildung 33: Beschreibung der Flächen.....	30
Abbildung 34: Schlaufenabmessungen .....	31
Abbildung 35: Momenten-Krümmungs-Beziehung Serie 1 .....	32
Abbildung 36: Kraft-Schlupf-Beziehung Serie 1 .....	32
Abbildung 37: Momenten-Krümmungs-Beziehung Serie 2 .....	33
Abbildung 38: Kraft-Schlupf-Beziehung Serie 2 .....	34
Abbildung 39: Momenten-Krümmungs-Beziehung Serie 3 .....	34
Abbildung 40: Kraft-Schlupf-Beziehung Serie 3 .....	35
Abbildung 41: Momenten-Krümmungs-Beziehung Serie 1 und 2 .....	37
Abbildung 42: Gegenüberstellung MV2 mit 20[cm] / 16 [cm].....	37
Abbildung 43: Momenten-Winkelöffnungs-Beziehung Serie 2 (M/V=0,5).....	40
Abbildung 44: Momenten-Winkelöffnungs-Beziehung Serie 2 (M/V=0,9).....	40
Abbildung 45: Bauteilbezeichnungen.....	42
Abbildung 46: Abmessungen Thermoelement .....	43
Abbildung 47: Schnittebenen.....	44
Abbildung 48: Flächenbezeichnung für Bemessung .....	45
Abbildung 49: Nachweisführung .....	46
Abbildung 50: Definition der Durchbiegungen [9 S. 45] .....	48
Abbildung 51: Biegeschlankheit laut ÖNORM EN 1992-1-1 [5] .....	48
Abbildung 52: Belastung auf Balkonplatte .....	52
Abbildung 53: Auskragungslängen $l_0$ konstante Plattenhöhe (C25/30).....	58
Abbildung 54: Auskragungslängen $l_0$ veränderliche Plattenhöhe (C25/30).....	58
Abbildung 55: Überhöhungen/Verformungen bei konstanter Plattenhöhe (C25/30) .....	60
Abbildung 56: Biegeschlankheit .....	60
Abbildung 57: M/V-Interaktionsdiagramm für 5 Elemente/Meter .....	62
Abbildung 58: Schnittgrößen für System .....	65
Abbildung 59: M/V-Interaktionsdiagramm für AVI-TE5.....	67
Abbildung 60: Standard ohne Höhengsprung.....	68
Abbildung 61: Übergang mit kleinem Höhengsprung innen.....	69
Abbildung 62: Übergang mit kleinem Höhengsprung außen.....	70

Abbildung 63: Übergang mit großem Höhengsprung .....	71
Abbildung 64: Indirekte Lagerung .....	72
Abbildung 65: ausspringende Ecke mit kleinem Höhengsprung innen .....	73
Abbildung 66: ausspringende Ecke mit kleinem Höhengsprung außen .....	74
Abbildung 67: Attika.....	75
Abbildung 68: Konsole.....	76

## TABELLENVERZEICHNIS

---

Tabelle 1: Materialeigenschaften UHPC [3] .....	3
Tabelle 2: Materialeigenschaften Glasfasern [4] .....	4
Tabelle 3: Biegeversuchsserie 1/2/3 .....	12
Tabelle 4: Abmessungen für M/V-Verhältnisse Serie 1 und 2 .....	13
Tabelle 5: Kanalbeschreibung für Auswertung Serie 1 und 2 .....	14
Tabelle 6: Abmessungen für M/V-Verhältnisse Serie 3 .....	18
Tabelle 7: Kanalbeschreibung für Auswertung Serie 3 .....	19
Tabelle 8: Ergebnisse Serie 1 .....	20
Tabelle 9: Ergebnisse Biegeserie 2 .....	21
Tabelle 10: Ergebnisse Biegeserie 3 .....	23
Tabelle 11: Bruchlasten-Versuch/Nachrechnung .....	36
Tabelle 12: Eingangswerte für Nachrechnung Serie 2 .....	39
Tabelle 13: Bauteilabmessungen .....	44
Tabelle 14: Grundwerte der Biegeschlankheit von Stahlbetonbauteilen ohne Normalkraft [5]...	49
Tabelle 15: Eingangsparameter für Starrkörperverdrehung.....	49
Tabelle 16: Nutzungskategorien [11] .....	53
Tabelle 17: Nutzlasten auf Decken, Balkone und Treppen im Hochbau [11] .....	54
Tabelle 18: Horizontale Lasten auf Zwischenwände und Absturzsicherungen [11] .....	54
Tabelle 19: Eingangswerte für Nachweisführung .....	55
Tabelle 20: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Auskragungslängen .....	59
Tabelle 21: Ergebnisse für Verformungsberechnung (C 25/30).....	61
Tabelle 22: Eingangsparameter M/V-Bemessung .....	64

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [1] Prügger, Gernot: *Studie über die Weiterentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Stahlbetonbauteilen, TU-Graz, 2009.*
- [2] Sammer Walter: *Weiterentwicklung eines tragenden Wärmedämmelementes im Bereich von auskragenden Sahlbetonbauteilen-Versuche, TU-Graz 2011.*
- [3] Schmidt, Michael. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton, Heft 561.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [4] Schürmann, Helmut. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbund 2, bearbeitet und erweiterte Auflage.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2007.
- [5] ÖNORM EN 1992-1-1 (2011-12-01) - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken; Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Wien : Österreichisches Normungsinstitut.
- [6] ÖNORM B 1992-1-1 (2011-12-01) - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und spannbetontragwerken Teil1-1:Allgemeine Bemessung und Regeln für den Hochbau (Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Ergänzungen). Wien : Österreichisches Normungsinstitut.
- [7] Zilch, Konrad und Zehetmaier, Gerhard. *Bemessung im konstruktiven Betonbau nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2).* München : Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010.
- [8] ÖNORM EN 1990 (2003-03-01) - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Wien : Österreichisches Normungsinstitut.
- [9] ÖNORM EN 1991-1-1 (2011-09-01) - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke; Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. Wien : Österreichisches Normungsinstitut.
- [10] ÖNORM B 1991-1-1 (2011-12-01) - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke; Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau (Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen). Wien : Österreichisches Normungsinstitut.
- [11] Schneider, Klaus Jürgen. *Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen.* s.l. : Werner Verlag, 2006. 17.

## MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG

### Serie 1

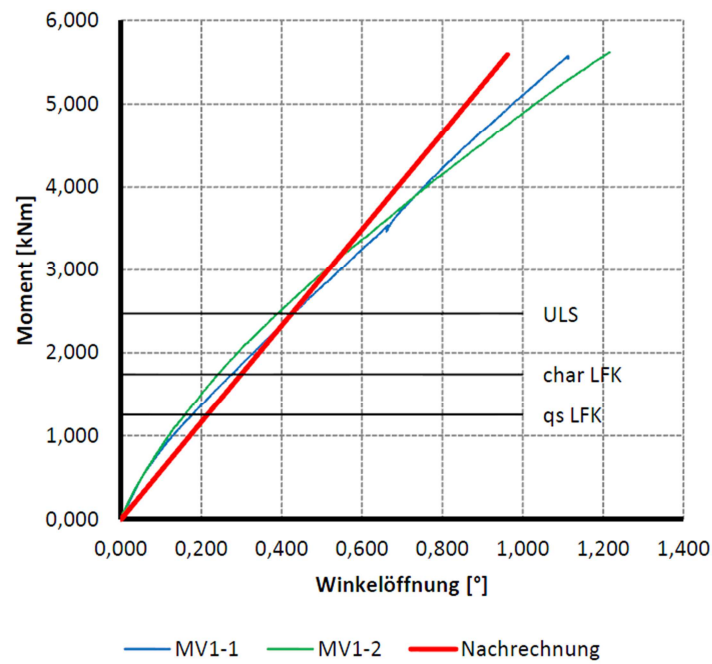


ABBILDUNG A 1: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 1 (M/V=0,5)

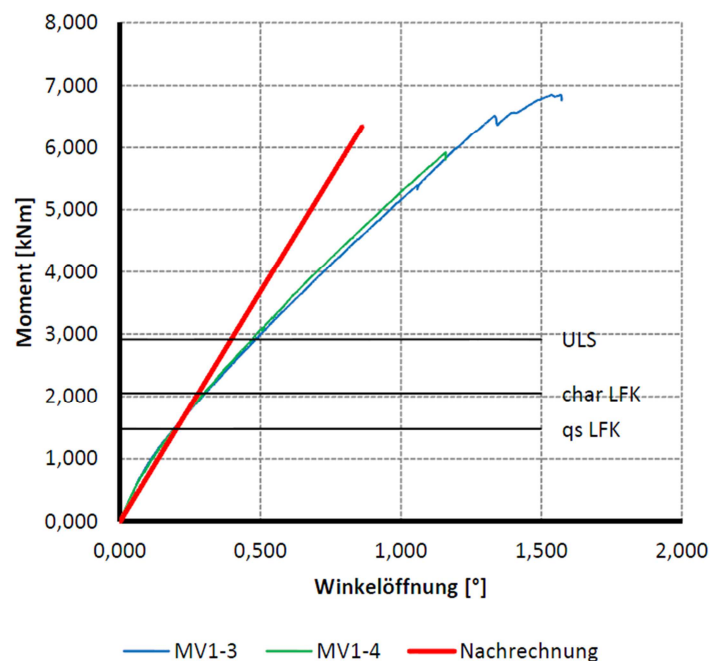


ABBILDUNG A 2: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 1 (M/V=0,9)

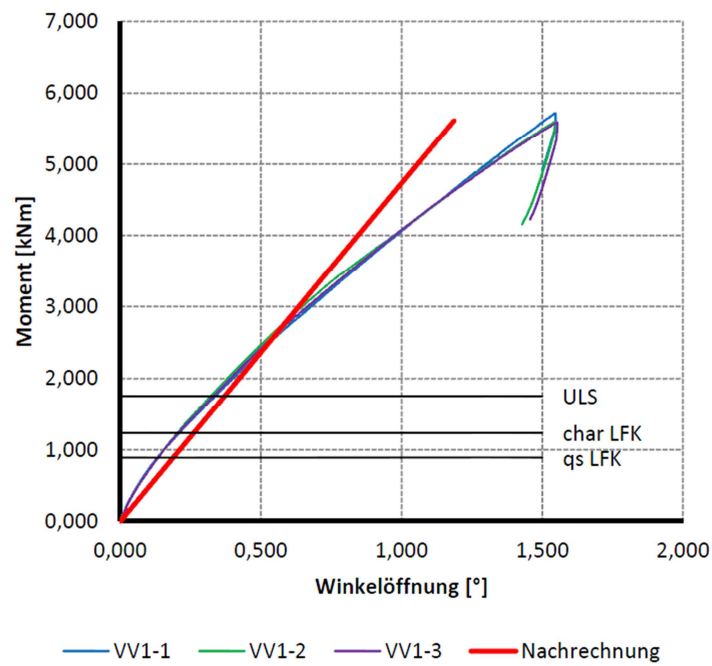


ABBILDUNG A 3: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 1 ( $M/V=0,32$ )

## Serie 2

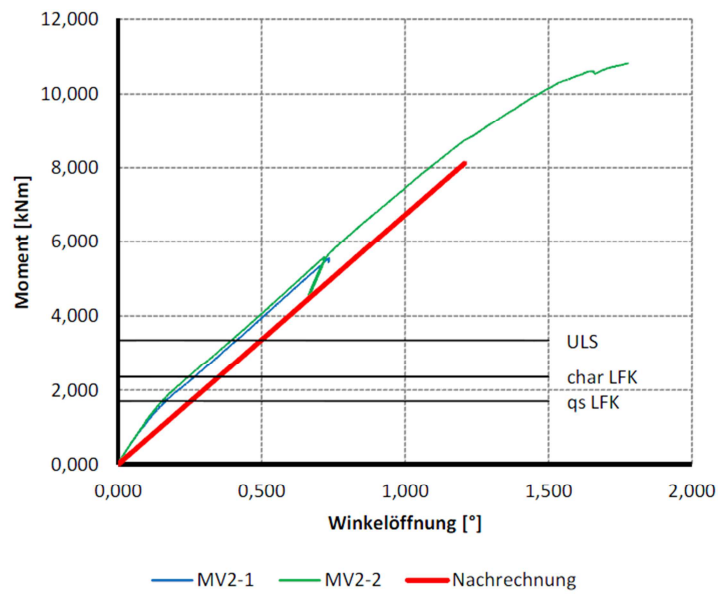
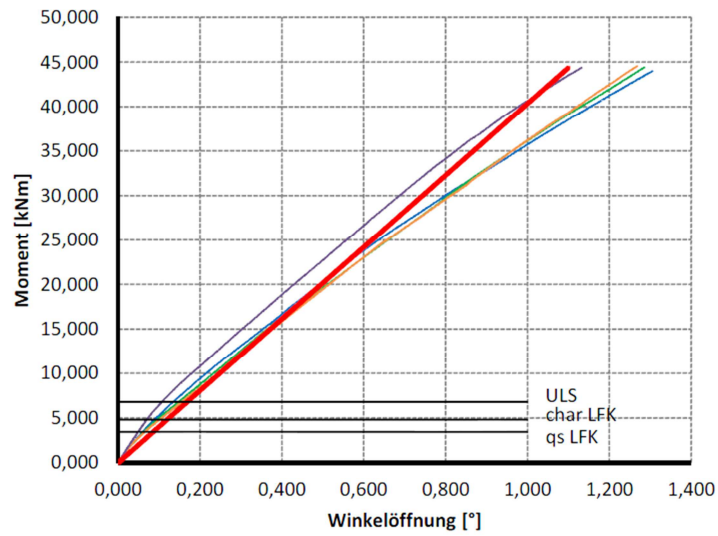


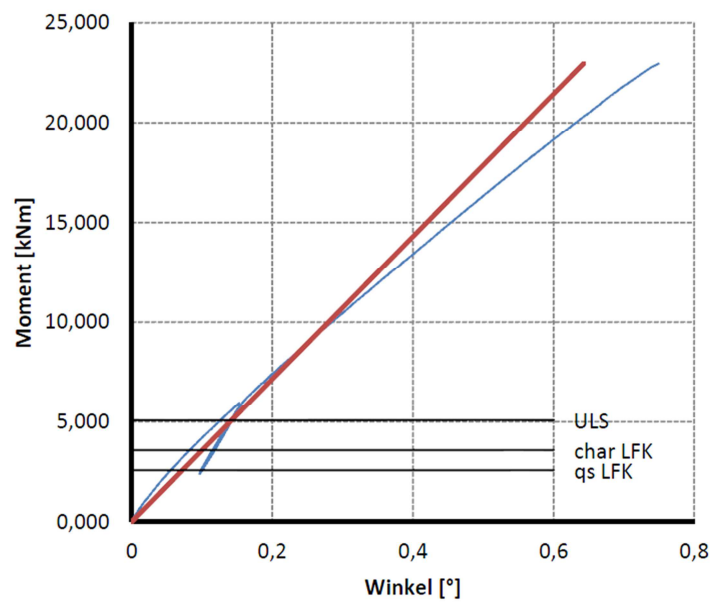
ABBILDUNG A 4: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 2 ( $M/V=0,5$ )



MV2-1s MV2-2s MV2-1b MV2-2b Nachrechnung

ABBILDUNG A 5: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 2 (M/V=0,9)

### Serie 3



MV3-1 Nachrechnung

ABBILDUNG A 6: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 3 (M/V=0,7)

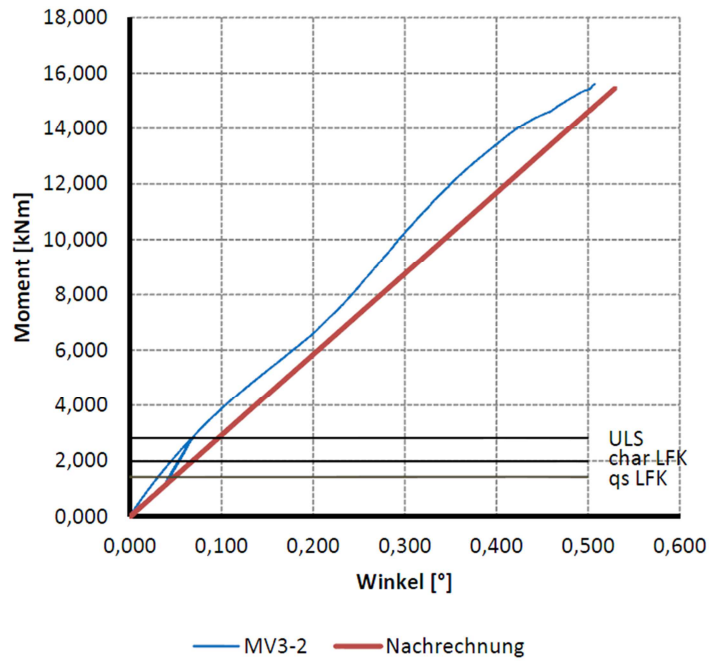


ABBILDUNG A 7: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 3 (M/V=0,4)

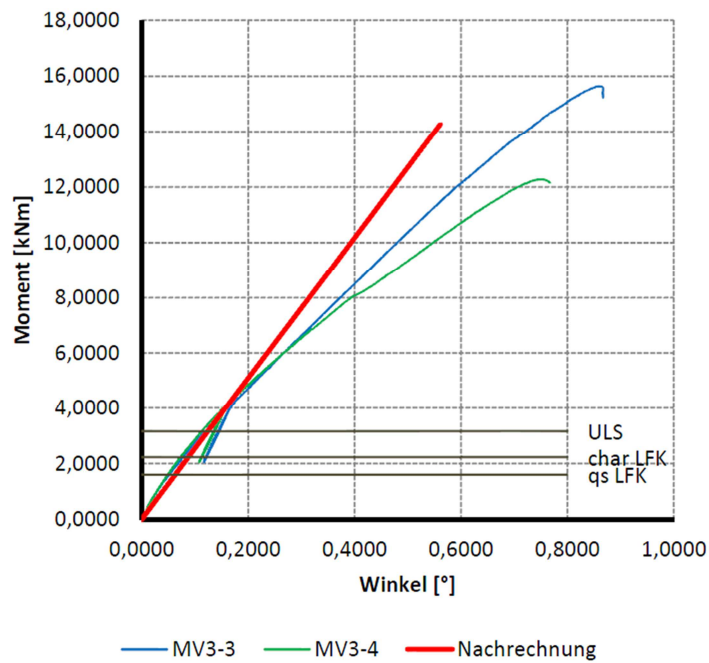


ABBILDUNG A 8: MOMENTEN-WINKELÖFFNUNGS-BEZIEHUNG SERIE 3 (M/V=0,7\_IND)