

## Entwicklung eines Abschalungselements in Platten ohne Minderung des Querkraftwiderstandes

Hightech-Zentrum Kanton Aargau HTZA: Machbarkeitsstudie

Industriepartner: Profilsager AG, Dürrenäsch



Prof. Dr. Simon Zweidler

Beat Häfeli, Versuchs- und Entwicklungingenieur,  
Maschinenbauingenieur BSc.

Emanuel Amer, wissenschaftlicher Mitarbeiter,  
Bauingenieur MSc.

Muttenz, 25.06.2024

## **Hinweise**

**Diagramme:** Alle dargestellten Diagramme sind mit dem Raster von einem Zentimeter dargestellt. Das Drucken in der tatsächlichen Grösse auf A4 ermöglicht ein grafisches Auslesen mit einem Massstab.

**Rechte:** Alle Bild- und Grafikrechte obliegen dem Fachbereich Baustatik und Mechanik der Fachhochschule Nordwestschweiz. Sie dürfen ohne Einwilligung nicht weiterverwendet werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Ausgangslage	5
1.2	Auftrag	6
1.3	Abgrenzung	6
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Einführung	7
2.2	Biegeschubfugen	7
2.3	Critical Shear Crack Theory (CSCT)	8
2.4	Modified Compression Field Theory (MCFT)	8
<b>3</b>	<b>Entwicklung</b>	<b>9</b>
3.1	Einleitung	9
3.2	Entwicklungsziele	9
3.3	Erste Schritte	10
3.4	Prototyp	12
<b>4</b>	<b>Dimensionierung Versuchskörper</b>	<b>14</b>
4.1	Konzeption	14
4.2	Abmessungen	15
4.3	Werkstoffe	16
4.4	Biegewiderstand	16
4.5	Querkraftwiderstand	18
<b>5</b>	<b>Herstellung</b>	<b>19</b>
5.1	Abmessungen	19
5.2	Biege- und Querkraftbewehrung	21
5.3	Werkstoffe	22
5.4	Fertigung	22
<b>6</b>	<b>Werkstoffprüfungen</b>	<b>24</b>
6.1	Betonstahl	24
6.2	Beton	27
<b>7</b>	<b>Prognose</b>	<b>30</b>

7.1	Biegewiderstand	30
7.2	Querkraftwiderstand	30
<b>8</b>	<b>Versuchsvorbereitung</b>	<b>31</b>
8.1	Versuchseinrichtung	31
8.2	Versuchsvorbereitung	33
8.3	Messkonzept	33
8.4	Versuchsprogramm	35
8.5	Ablauf Traglastversuch	36
<b>9</b>	<b>Versuchsresultate</b>	<b>38</b>
9.1	Prüfkörper P 1.1	38
9.2	Prüfkörper P 1.2	40
9.3	Prüfkörper P 3.1	42
9.4	Prüfkörper P 3.2	44
9.5	Prüfkörper P 4.1	46
9.6	Prüfkörper P 2.1	48
9.7	Prüfkörper P 2.2	50
9.8	Prüfkörper P 4.2	52
9.9	Prüfkörper P 5.1	55
9.10	Prüfkörper P 5.2	58
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>61</b>
10.1	Vergleich der Bruchlasten	61
10.2	Schlussfolgerung	62

# **1 Einleitung**

## **1.1 Ausgangslage**

Die Firma ProfilSager AG, vertreten durch den Geschäftsführer Stephan Sager, hat sich in der Entwicklung und Herstellung von Kunststoffprofilen für den Hochbau eine Kernkompetenz erarbeitet. Unter anderem hat sich die Firma durch den eigens entwickelten Armierungsdistanzhalter «Ferrofix» als Produktlieferant in der Schweiz etablieren können. Die Firma möchte sich nun strategisch in den Bereich Engineering weiterentwickeln, was sich in einer entsprechenden Erweiterung der Produktpalette niederschlagen soll.

Eines dieser möglichen Zukunftsprojekte identifiziert die Firma im Produkt eines Abschalungselementes, welches zur Etappierung von Stahlbetonplatten benötigt wird. In Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Nordwestschweiz, vertreten durch Prof. Dr. Simon Zweidler und dem Team des Baulabors FHNW, ist nach ersten Abklärungen ein Antrag für eine Machbarkeitsstudie beim Hightech-Zentrum Aargau HTZA für die finanzielle Unterstützung eingereicht worden, welches am 01. November 2021 gutgeheissen worden ist.

Auftrag:	Machbarkeitsstudie zur Entwicklung eines Abschalungselements, dass in Platten ohne Querkraftbewehrung ohne Querkrafttragverlust verbaut werden kann.
Auftraggeber:	Hightech-Zentrum Aargau HTZA, Badenerstrasse 13, 5200 Brugg. HTZ-Projekt-Nr.: 1 0.00502.02.2.
Betreuer:	Leendert den Haan, Technologie- & Innovationsexperte.
Forschungs-partner:	Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochsschule HABG, Institut für Bauingenieurwesen IBau, Baulabor FHNW.
Projektleiter:	Prof. Dr. Simon Zweidler.
Industriepartner:	ProfilSager AG, Alte Hallwilerstrasse 13, 5724 Dürrenäsch.
Antragssteller:	Stephan Sager.

## **1.2 Auftrag**

In der Studie «Abschalungselement mit Eisendurchdringung» soll nebst dem Erfüllen der technischen Machbarkeit den folgenden Ansprüchen der verschiedenen am Gewerk beteiligten Fachpersonen Rechnung getragen werden kann:

- Polier: Robustes Element beim Einbau, leichte Handhabung bei der Bewehrungsdurchdringung.
- Bauingenieur: Abschalungselement erfüllt die Anforderungen an den geforderten Kräfteübertrag; es stellt keine Schwächung in Bezug auf den Querkraftwiderstand dar.
- Baumeister: Kostengünstig in der Beschaffung und beim Einbau.

Prioritäres Ziel ist die Entwicklung eines Abschalungselementes, welches bei Platten ohne Querkraftbewehrung kein Widerstandsdefizit bezüglich des Querkraftwiderstandes aufweisen wird. Nach der Entwicklungsphase soll der ausgewählte Prototyp auf Basis einer detaillierten Prognose folgenden mechanischen Untersuchungen im Baulabor der FHNW unterzogen werden:

- Bestimmen der Werkstoffkenngrößen.
- Querkraftversuche an durchbetonierten Prüfkörpern; sie dienen als Referenzwerte.
- Querkraftversuche an Prüfkörpern mit Abschalungselement, jedoch ohne Querkraftverstärkung.
- Querkraftversuche an Prüfkörpern mit Abschalungselement und integrierter Querkraftverstärkung.

## **1.3 Abgrenzung**

Die vorliegende Untersuchung soll die technische Machbarkeit der in Kapitel 1.2 aufgeführten Anforderungen bestätigen. Dies unter folgenden Annahmen: Die Prüfkörper der Versuchsreihe sind auf eine häufig verwendete Plattendicke von 30 cm sowie einer Betonqualität C30/37 festgelegt worden. In der Baupraxis werden üblicherweise Stärken von Platten und Decken ohne Querkraftbewehrung im Bereich von 20 – 40 cm sowie handelsübliche Betonqualitäten zwischen C20/25 bis C40/50 verwendet. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Untersuchung sind dementsprechend auf die gewählte Plattenstärke und Betonqualität beschränkt und können nicht ohne Weiteres auf andere Anwendungsfälle, Plattendicken oder Werkstoffkenngrößen übertragen bzw. verallgemeinert werden.

Ein Bemessungsvorschlag als Verallgemeinerung der erwähnten Bereiche in Bezug auf Plattendicken und Betonqualitäten ist nicht Gegenstand der vorliegenden Machbarkeitsstudie. Dies äußert sich insbesondere bei der Wahl der Querkraftbewehrung von Platten mit der Dicke im Bereich von 30 cm bis 40 cm sowie bei höheren Betonqualitäten.

Die Ausbildung der Verzahnung liesse sich mittels Versuche zur gesonderten Ermittlung des Stegdruckbruchverhalten quantitativ überprüfen. Eine entsprechende Versuchsreihe ist bereits konzeptionell erarbeitet; die Versuche sind jedoch nicht Gegenstand der Machbarkeitsstudie und deshalb noch ausstehend.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Einführung

Zu Beginn ist ein Literaturstudium zum Thema «Schubwiderstand in zusammengesetzten Bauteilen» durchgeführt worden [2], siehe Bild 1. Für die Bemessung von Schubfugen ist die Unterscheidung zwischen Schub längs und quer zur Fuge aufgrund unterschiedlicher Tragweisen von zentraler Bedeutung [22].

Bei parallel zur Bauteilachse angeordneten Fugen spricht man von Schubfugen. Typische Beispiele sind Ortsbetonergänzungen bei vorfabrizierten Deckenelementen oder Arbeitsfugen zwischen Decken und Wandelementen. Der Tragwiderstand einer Schubfuge basiert auf dem Modell der Schubreibungstheorie [22], welcher sich aus Haftverbund, Reibung und Schubbewehrung zusammensetzt. Hierfür liegen unterschiedliche Bemessungsansätze in den verschiedenen Normen vor, wie beispielsweise in der SIA Norm 262:2013 [18].

Fugen rechtwinklig zur Bauteilachse erfahren zusätzlich eine Biegebeanspruchung; man spricht von einer Biegeschubbeanspruchung. Ein typisches Beispiel hierfür sind Arbeitsfugen bei Platten rechtwinklig zur Bauteilachse. Die Schubtragfähigkeit solcher Fugen wird wesentlich durch die Verzahnung der Fuge sowie die Zugfestigkeit des Betons beeinflusst.

### 2.2 Biegeschubfugen

Zilch und Fingerloos zeigen in [22] die unterschiedlichen Modellvorstellungen der in Kapitel 2.1 beschriebenen Fugen auf. Es wird erläutert, dass die Fuge quer zur Bauteilachse mit überwiegender Biegebeanspruchung analog zu einem Biegeriss zu behandeln ist. Die einwirkenden Schubspannungen werden mittels Verzahnung an den Rissufern übertragen. Damit eine Verzahnung gewährleistet werden kann, beschränkt sich die DIN 1045-1:2008 basierend auf Erfahrungswerten auf rau und verzahnte Fugen [11]. Mit einer verzahnten Fugenausbildung lässt sich ein quasi monolithisches Tragverhalten sicherstellen; der Nachweis erfordert keine Abminderung. Folgedessen ist der Querkraftwiderstand bei lediglich rauen Fugen abzumindern.

Dieser Bemessungsvorschlag wurde in der DIN 1045-1:2008-08, 10.3.6 [11] aufgenommen; mit dem Übergang zum Eurocode 2011 ist dieser Bemessungshinweis nur noch im nationalen Anhang von Deutschland aufgeführt; siehe hierzu die Ausführungen in DIN EN 1992-1-1:2011 [12] [13]. In den in der Schweiz aktuell gültigen Normen SIA 262 und EN 1992-1-1 sind hingegen keine Angaben zur Biegeschubfuge zu finden.

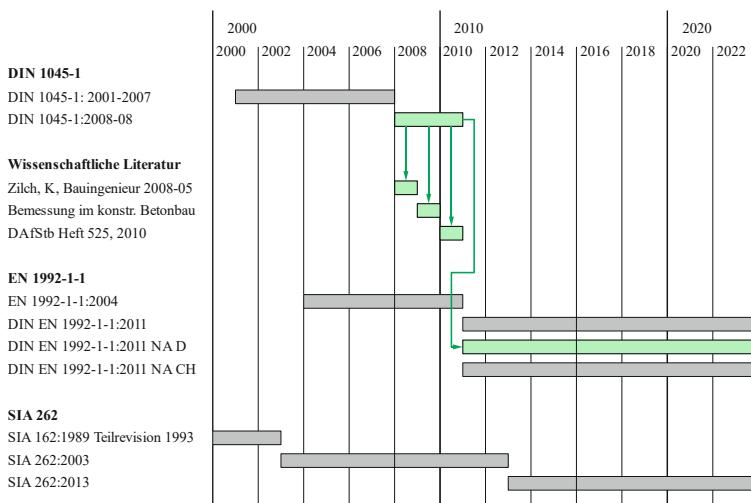


Bild 1: Chronologischer Verlauf: Thematisierung Schub- und Biegeschubfugen in entsprechenden Normierungen.

## **2.3 Critical Shear Crack Theory (CSCT)**

Muttoni stellte einen Zusammenhang zwischen der Bildung von Biegerissen und dem zugehörigen Querkraftwiderstand fest. Aus diesen Beobachtungen leitet er ab, dass ein durch die Druckstrebe verlaufender Biegeriss einen wesentlichen Einfluss auf den Querkraftwiderstand hat. Es lässt sich damit ein empirisches Modell [16] zur Berechnung des Querkraftwiderstandes von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung ableiten; eine Erweiterung des Modells ist in [17] zu finden. Gemäss der Modellvorstellung ist der Querkraftwiderstand massgeblich von der Rissweite und der Rissrauigkeit abhängig; die effektive Tragwirkung kommt aus der Verzahnung der Rissufer in den Biegerissen zustande.

Diese Modellvorstellung mit der Benennung «Critical Shear Crack Theory (CSCT)» bildet in einer vereinfachten Darstellung die Grundlage für die Querkraftbemessung von Platten ohne Querkraftbewehrung in der SIA262:2013 [18]; diese ist zur Ermittlung der Prognose der vorliegenden Referenzprüfkörper herangezogen worden.

## **2.4 Modified Compression Field Theory (MCFT)**

Die Modified Compression Field Theory [8] stellt eine Erweiterung der klassischen Druckfeldmodelle dar; sie beschreibt ein unter Schub beanspruchtes, gerissenes und senkrecht zueinander bewehrtes Stahlbetonscheiben-element. Dabei wird davon ausgegangen, dass bis zu einer gewissen Schubrissöffnung eine kombinierte Tragwirkung aus Querkraftbewehrung und Rissverzahnung vorliegt. Die Ermittlung der Schubübertragung über die Rissufer basiert dabei auf den Arbeiten von Walraven. Die vollständige Lösung der MCFT lässt sich analytisch nicht lösen und ist damit für einfache Bemessungsaufgaben ungeeignet. Die Weiterentwicklung zur Simplified Modified Compression Field Theory [5] ermöglicht eine vereinfachte Darstellung der komplexen Berechnungen der MCFT.

Diese vereinfachte Form der MCFT findet in verschiedenen Normen als Grundlage für die Querkraftbemessung von Stahlbetonbauteilen Verwendung, wie beispielsweise dem fib Model Code 2010 [6], der amerikanischen Brückenbaunorm AASHTO LRFD [1] oder der kanadische Betonbaunorm CSA [7].

## 3 Entwicklung

### 3.1 Einleitung

Größere Betonelemente wie Decken können nur selten in einem einzigen Arbeitsgang betoniert werden. Die Etappierung erfordert aus baupraktischen wie auch wirtschaftlichen Gründen sogenannte Arbeitsfugen. Häufig ist die Tagesleistung des Betonierens die limitierende Größe, was eine Etappierung mittels Arbeitsfugen notwendig macht. Weiter kann durch das temporäre Offenlassen von sogenannten Schwindgassen zwischen einzelnen Bauetappen in bestimmten Situationen eine Rissminderung erreicht werden. Aus wirtschaftlichen Gründen können sich zudem Betonieretappen lohnen, um kleinere Mengen an Schalungselementen vorhalten zu müssen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Herstellung von Arbeitsfugen, wobei zwischen verlorenen und normalen Abschalungen unterschieden wird. Verlorene Schalungen verbleiben nach dem Betonieren im Bauteil und werden nicht mehr ausgeschalt. Dabei können unterschiedliche Materialien bzw. Elemente zum Einsatz kommen. Sie werden in der Regel als Etappenschalungen eingesetzt, wobei die Durchdringung der Längsarmierung durch das Schalungselement ermöglicht sein soll. Das Element hat analog zu normalen Schalungselementen während des Betonierens den Betonierdruck standzuhalten.

### 3.2 Entwicklungsziele

Das Hauptziel der Entwicklung des neuen Abschalungselementes besteht in der Konzeption eines Bauteils, dass kein Defizit im Querkraftwiderstand von Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung hervorruft. Die Referenzgröße ist demnach der Querkraftwiderstand des reinen Betons einer durchbetonierten Stahlbetonplatte. Dies soll mittels minimaler Querkraftbewehrung in Form einer Wellenbewehrung im Abschalungselement bewerkstelligt werden. Durch eine optimale Auslegung der Bewehrung und der kombinierten Tragwirkung von Querkraftbewehrung und Rissverzahnung soll durch den Einbau des Abschalungselementes der Querkraftwiderstand lokal erhöht werden.

Bei der Entwicklung des Abschalungselementes sind zudem weitere Faktoren für das Erreichen eines erfolgreichen Produktes massgebend:

- **Benutzerfreundlichkeit beim Einbau:** Das Abschalungselement sollte einfach auf der Deckenschalung zu montieren sein, die Eisendurchdringung sollte problemlos funktionieren und es sollte keine komplizierten Anweisungen erfordern.
- **Transparente Tragweise:** Darüber hinaus muss die Tragweise des Elementes klar kommunizierbar sein. Bauingenieurinnen und Bauingenieure sollen alleinig anhand der Geometrie der verschiedenen Elemente die Tragweise eindeutig identifizieren und zuordnen können. Die aus Grossversuchen gewonnenen Ergebnisse sollen die beabsichtigten Auslegungsziele untermauern. Die im Abschalungselement verbaute Querkraftbewehrung soll die durch das Element verursachte Minderung des Querkraftwiderstands beheben.
- **Dauerhaftigkeit:** Das entwickelten Abschalungselement verbleibt nach dem Betonieren als verlorene Schalung in der Stahlbetonplatte. Daher muss eine entsprechende Dauerhaftigkeit des Elementes gewährleistet werden können.
- **Wettbewerbsfähigkeit:** es ist eine wettbewerbsfähige Entwicklung des Abschalungselementes anzustreben. Die monetäre Entgeltung darf aufgrund der Vorteile leicht höher sein als bei Konkurrenzprodukten sein.

### 3.3 Erste Schritte

In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner sind verschiedene Prototypen von Abschalungselementen entwickelt worden. Nach mehreren Entwicklungsstufen hat sich folgender Aufbau als erfolgversprechendste Variante herauskristallisiert: Die Verzahnung zwischen den beiden Betonieretappen wird mittels einem entsprechend in Form gebrachten Stahlgitter mit grober Maschenweite sichergestellt. Als Begrenzung des giessfähigen Betons dient ein engmaschiges Kunststoffnetz, welches sich enganliegend am Stahlgitter abstützt und mit Bewehrungsseisen leicht durchstossen werden kann. Der beidseitige Abschluss bildet jeweils eine Kunststoffleiste, in welchen sowohl das Stahlgitter als auch das Kunststoffgewebe fixiert werden. In der Kunststoffleiste ist zudem eine Halterung für eine Querkraftbewehrung vorgesehen, die zwei Aufgaben zu übernehmen hat: Die schlangenförmig ausgebildete Schlaufenbewehrung verleiht erstens dem Abschalungselement insbesondere bei der Montage als auch beim Betonierungsvorgang die notwendige Stabilität. Im Endzustand dient diese der Behebung der mit der Betonieretappe zwangsweise gegebenen Schwächung des Querkraftwiderstandes.

Der Industriepartner stellte nebst acht Typen von Stahlgittern mit unterschiedlichen Geometrien auch Kunststoffleisten sowie Kunststoffnetze zur Verfügung. Die daraus gefertigten Prototypen von Abschalungselementen dienten zur Überprüfung der qualitativen Ausbildung der Nocken sowie der erforderlichen Verzahnung. Die ausführliche Dokumentation zu diesen ersten Versuchen ist in Anhang A aufgeführt.

Nach der Bespannung des Stahlgitters mit dem Kunststoffnetz sind die Abschalungselemente in kleinen Prüfkörpern verbaut worden. Durch das einseitige Betonieren konnte nach dem Aushärten des Betons die Nockenbildung visuell überprüft werden. Das Betonieren der zweiten Etappe diente dem Ausbilden der Verzahnung, deren qualitative Überprüfung erst nach dem Aufbrechen der Prüfkörper erfolgen konnte. Das kontrollierte Aufbrechen ist mittels Dreipunkt-Biegeversuch bewerkstelligt worden; die in Bild 2 a) bis d) dargestellten Fotografien dienen dem Verständnis. Diese Versuche dienten gleichzeitig zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit des reinen Betons bzw. über das Abschalungselement und der Beurteilung der Nockenbildung (Verzahnung) durch das Abschalungelement. Die Auswertung der Versuchsergebnisse ergab, dass sich der Gittertyp 6 durch eine optimale Ausbildung der Nocken und einer höchst erreichten Zugfestigkeit auszeichnet; er ist damit für die Weiterentwicklung ausgewählt worden.

An den vorhandenen Prüfkörpern sind nach den ersten Versuchsauswertungen noch diverse Kleinversuche durchgeführt worden. Das Aufschneiden der Nocken liess durch die visuelle Kontrolle Rückschlüsse auf die Kornverteilung in den ausgebildeten Nocken zu. Weiter sind die vom Industriepartner zur Verfügung gestellten Kunststoffleisten zur Untersuchung der Entlüftung während des Betonierungsvorgangs in die erste Prüfkörperserie eingebaut worden. Durch das nachträgliche Aufschneiden lassen sich die Leisten bezüglich darunter liegender Hohlräume kontrollieren, womit eine Aussage zur Gewährleistung einer vollständigen Entlüftung machen lässt. Ausführlichere Informationen zu den Kleinversuchen sind im Anhang B zu finden.

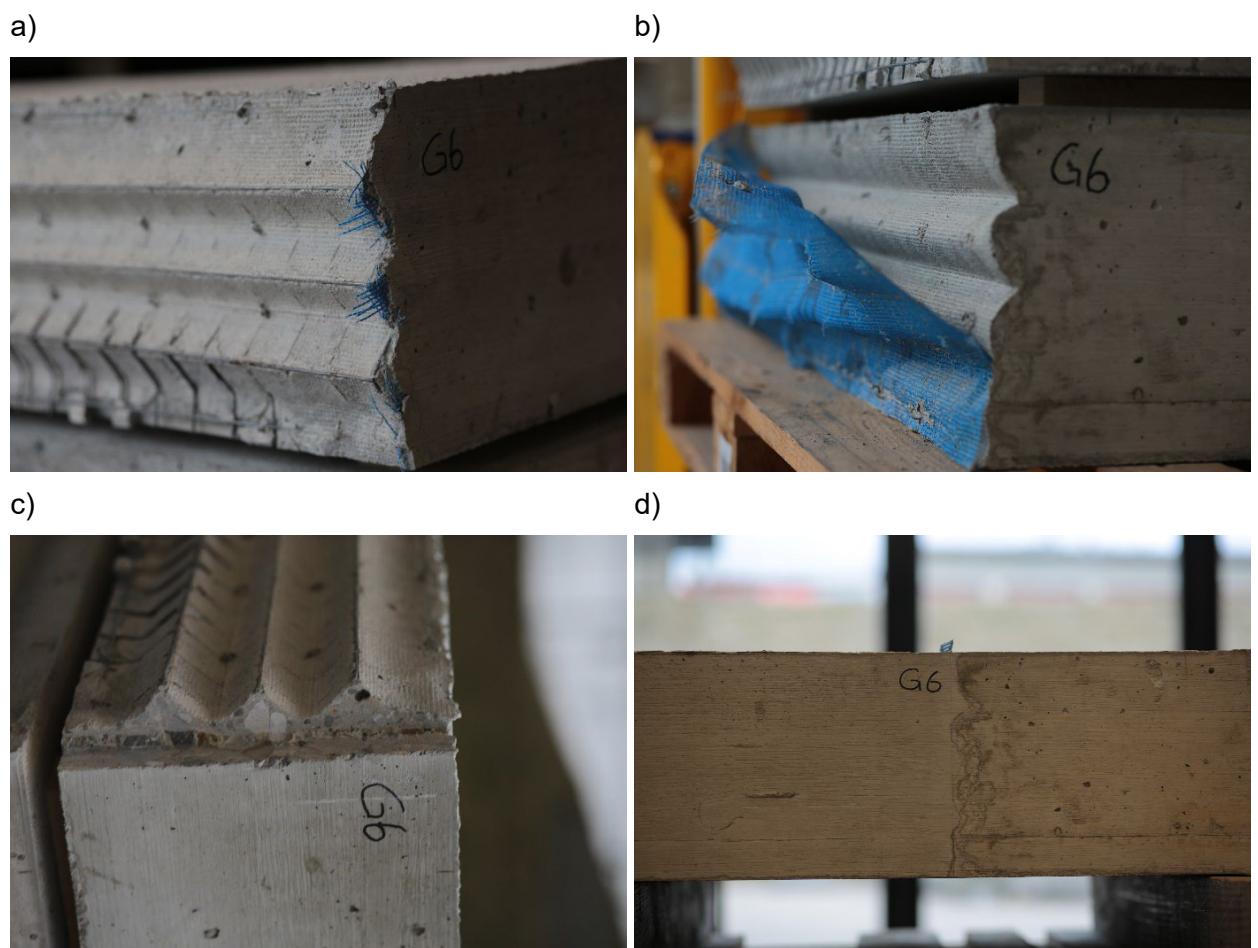


Bild 2: Gittertyp 6, a,b) nach dem Biegeversuch, c) Kornverteilung in den Nocken, d) vor dem Biegeversuch.

### **3.4 Prototyp**

Der gemeinsam mit dem Industriepartner entwickelte Prototyp hat eine Bauteilhöhe von 30 cm und eine Länge von 1 m. Die oben und unten angebrachten Kunststoffprofile haben eine Breite von 73 mm und eine Höhe von 35 mm; sie werden im Stranggussverfahren durch den darauf spezialisierten Industriepartner gefertigt. In

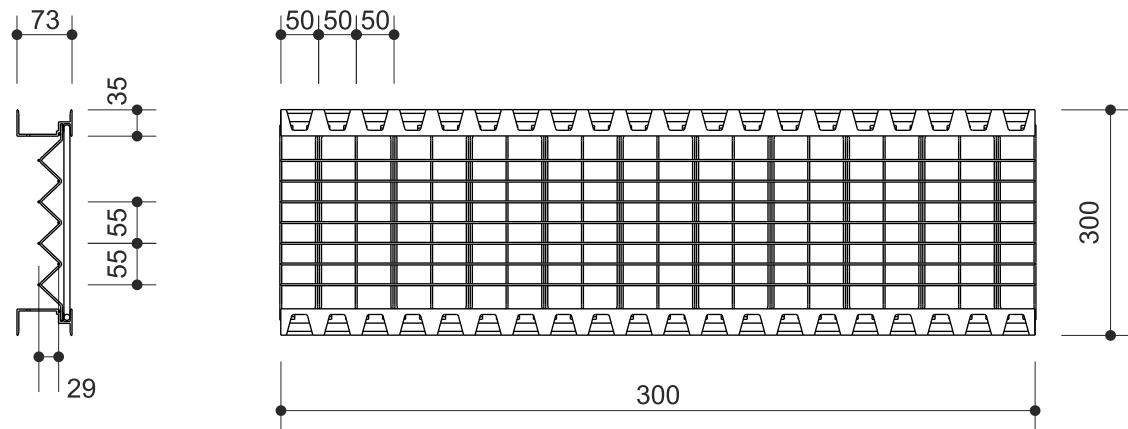
Bild 3 a) ist der Querschnitt und die Ansicht dargestellt;

Bild 3 b) zeigt eine axonometrische Darstellung.

Zwischen den Kunststoffprofilen ist ein punktgeschweisstes Drahtgitter gesteckt, welches einen Drahdurchmesser von 2.5 mm und eine Maschenweite von 50 mm aufweist. Die Drahtgitter werden mithilfe von Presswerkzeugen in die gewünschte Form gebracht, wodurch die notwendige Verzahnungsgeometrie der Betonfuge erzeugt werden kann. Zusätzlich sind die Drahtgitter mit einem Glasfasernetz bespannt, welches sich trotz hoher Rissfestigkeit leicht mit Bewehrungseisen durchstossen lässt. Die exakten Abmessungen des Drahtgitters sind in Anhang A aufgeführt.

Die Kunststoffprofile verfügen über eine zusätzliche Nute, in welche die Schlaufenbewehrung eingesetzt werden kann. Diese hat die Funktion einer lokal begrenzten Querkraftbewehrung und soll die Minderung des Querkraftwiderstandes aufgrund der Arbeitsfuge beheben. Die Wellenbewehrung ist für eine Plattenstärke von 30 cm ausgelegt worden; sie hat einen Durchmesser von 8 mm, einen Abstand der vertikalen Eisen von 100 mm und weist eine Höhe von 240 mm auf. Die Auslegung der erforderlichen Querkraftbewehrung erfolgt auf Basis der durch die verschiedenen Normenwerke zugrunde gelegten Beziehungen zur Ermittlung der Mindestquerkraftbewehrung unter Berücksichtigung der günstigen Plattentragwirkung.

a)



b)

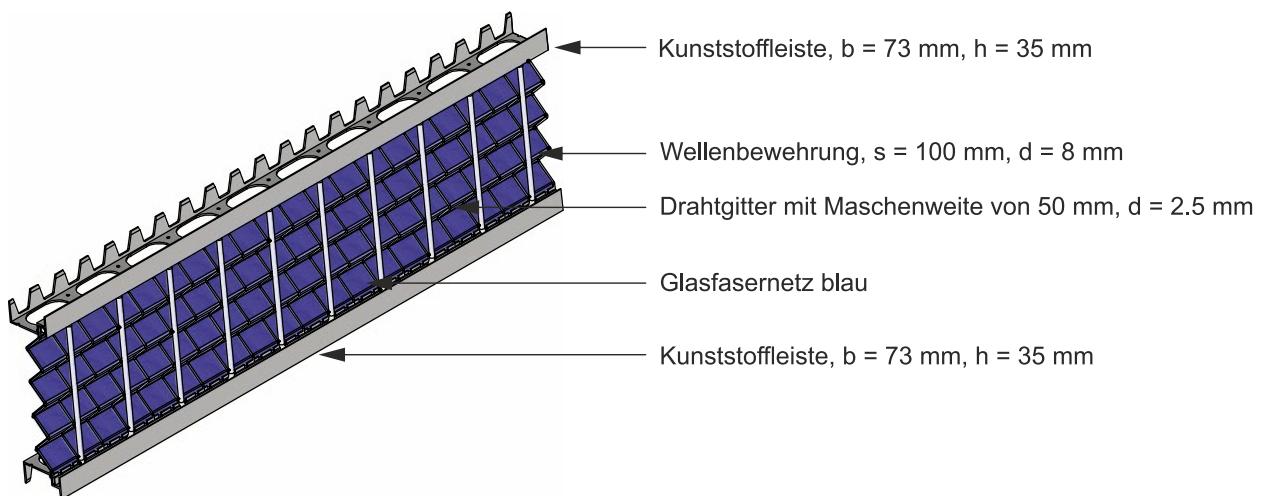


Bild 3: a) Abmessungen Abschalungselement, b) Beschriftung Abschalungselement.

## 4 Dimensionierung Versuchskörper

### 4.1 Konzeption

Eine Etappierung mittels Arbeitsfuge und dem damit einhergehenden Einsatz des Abschalungselementes wird sich aufgrund der verwehrten Ausbildung einer natürlichen Verzahnung mit einer Minderung auf den Querkraftwiderstand auswirken. Dies soll mit Versuchen des klassischen Querkraftversagens überprüft werden. Die Konzeption sieht einen Prüfkörper mit beidseitig angeordnetem Prüfbereich für einen Querkraftversuch vor, welche zeitlich voneinander getrennt durchgeführt werden. Die Prüfbereiche sind in den beiden Auskragungen des als einfachen Balken gelagerten Prüfkörpers angeordnet, siehe hierzu Bild 4. Das entsprechende statische System ist der statisch bestimmte Kragarm. Der Prüfstand besteht aus einer Krafteinleitung im Abstand der Schubspannweite  $a$  zum positiven Auflager. Im hinteren Bereich befindet sich das negative Auflager. Diese Anordnung ermöglichte es, jeden Prüfkörper einseitig bis zum Bruch zu testen und anschließend 180 Grad um die Vertikalachse für die zweite Versuchsdurchführung zu drehen. Der Bereich zwischen den Auflagern gehört nicht zum Prüfbereich; er stellt die notwendige Einspannung des Kragarmes und damit des Prüfbereichs sicher; dieser ist zur Sicherung gegen eines Querkraftversagens mit entsprechender Querkraftbewehrung ausgestattet.

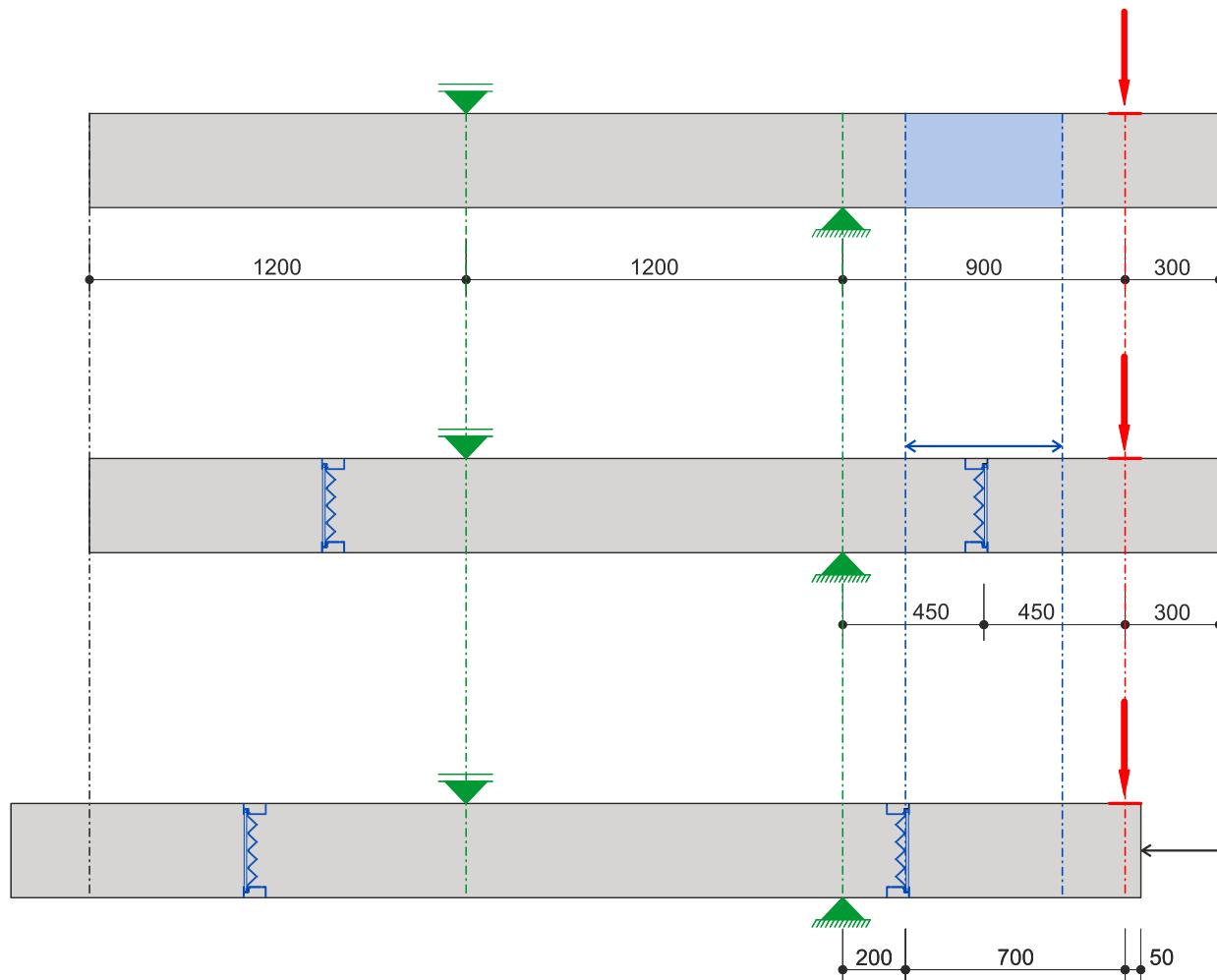


Bild 4: Versuchskonzeption.

Der zentrale Bestandteil der Versuchskonzeption besteht in der Gewährleistung einer möglichst freien Positionierung des bereits einbetonierten Abschalungselementes, siehe hierzu die Darstellungen in Bild 4. Der Grund dafür liegt im spröden Tragverhalten des Querkraftversagens. Die Rissbildung beim Querkraftbruch bildet sich ausgehend von einer Initiierungsstelle beidseitig in Richtung der Balkenachse aus. Um den effektiven Einfluss des Abschalungselementes auf den Querkraftwiderstand überhaupt detektieren zu können, muss im eigentlichen Versuch die Position des Abschalungselementes mit der Stelle der Rissinitiierung übereinstimmen. Mit Hilfe von vier Referenzversuchen kann diese Stelle vorab ermittelt werden, was dann bei den eigentlichen Querkraftversuchen eine exakte Justierung der Position des Abschalungselementes vor Versuchsdurchführung ermöglicht. Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Wahlfreiheit der Positionierung weisen die Prüfkörper beiderseits eine entsprechende Verlängerung auf; die Anordnung der Querkraftbewehrung im mittleren Bereich ist ebenfalls entsprechend von den Auflagern zurückversetzt angeordnet.

## 4.2 Abmessungen

Gemeinsam mit dem Industriepartner ist für die erste Versuchsreihe eine in der Praxis häufig vorkommende Plattenstärke von 30 cm gewählt worden. Die Plattenbreite wurde auf 100 cm festgelegt, siehe die untere Darstellung in Bild 5. Die Bauhöhe des Abschalungselementes ist aufgrund der gewählten Plattenstärke gegeben. Die Dimensionierung des Kragarms und des Bereichs zwischen den Auflagern erfolgte auf das Vierfache der Bauteilstärke, was einer Länge von 120 cm entspricht. Mit diesen Abmessungen können die Versuchskörper einer Schubspannweite bei 3  $h$  geprüft werden, was einer schubkritischen Laststellung entspricht, siehe die obere Darstellung in Bild 5.

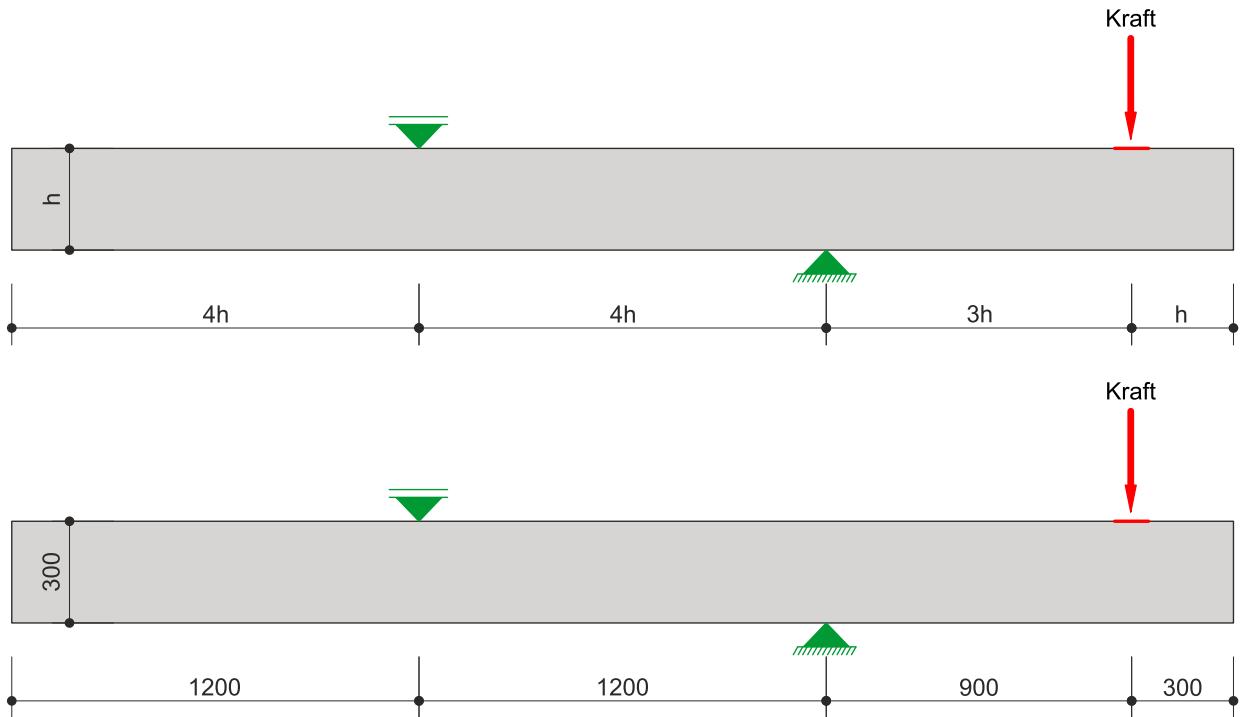


Bild 5: Dimensionierung der Abmessungen.

## 4.3 Werkstoffe

### Beton

Es ist ein Konstruktionsbeton der Sorte C30/37 mit einem Größtkorndurchmesser von 32 mm gewählt worden. Dieser Beton weist eine charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von 30 N/mm<sup>2</sup> und eine charakteristische Würfeldruckfestigkeit von 37 N/mm<sup>2</sup> auf. Die Schubfestigkeit des Betons lässt sich mit dem Betrag von 1.65 N/mm<sup>2</sup> aus der Zylinderdruckfestigkeit rechnerisch ableiten. Zur Dimensionierung der Prüfkörper wird die Druckfestigkeit auf das Mittelwertniveau angehoben, indem gemäss SIA-Norm 262:2013 die charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit um den Wert 8 N/mm<sup>2</sup> erhöht wird. Somit kann eine Druckfestigkeit auf Mittelwertniveau von 38 N/mm<sup>2</sup> für die Prüfkörper angenommen werden. Die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Beton	$f_{ck} [N/mm^2]$	$f_{cm} [N/mm^2]$	$\tau_{ck} [N/mm^2]$	$\tau_{cm} [N/mm^2]$	$D_{max} [mm]$
C30/37	30	30+8	1.65	1.85	32

Tabelle 1: Eigenschaften der Betonsorte C30/37.

### Betonstahl

Für die Biegebewehrung wird ein Betonstahl B500B verwendet welcher eine Fliessgrenze von 500 N/mm<sup>2</sup> aufweist, siehe Tabelle 2.

Betonstahl	$f_{sk} [N/mm^2]$	Verhältnis $f_t/f_{sk}$
B500B	500	$\geq 1.08$

Tabelle 2: Eigenschaften vom Betonstahl B500B.

## 4.4 Biegewiderstand

Die Bestimmung des Biegewiderstands erfolgt anhand des mechanischen Bewehrungsgehalts, siehe Beziehung (2). Um sicherzustellen, dass eine ausreichende Duktilität des Bauteils gewährleistet ist, wird das Verhältnis von Druckzonenhöhe zur statischen Höhe  $x/d_v$  auf den Wert 0.3 begrenzt.

$$M_{Rk} = A_{s,vor} \cdot f_{sk} \cdot d_v \cdot \left(1 - \frac{\omega}{2}\right) \quad (1)$$

$$\omega = \frac{A_{s,vor} \cdot f_{sk}}{b \cdot d_v \cdot f_{cm}} \quad (2)$$

Anhand der gewählten Druckzonenhöhe lässt sich die maximale Bewehrungsfläche gemäss Beziehung (3) bestimmen:

$$A_{s,max} = \frac{\frac{x}{d_v} \cdot b \cdot f_{cm} \cdot 0.85}{f_{sk}} \quad (3)$$

Unter Berücksichtigung der maximalen Bewehrungsfläche kann die Biegebewehrung bestimmt werden. Um eine symmetrische Anordnung der Bewehrung sicherzustellen, werden 15 Bewehrungseisen mit einem Durchmesser von 20 mm ausgewählt, siehe hierzu die Zusammenstellung in Tabelle 3.

$As_{max} [N/mm^2]$	$d_s [mm]$	$Stk [-]$	$As_{vor} [N/mm^2]$
5019	20	15	4712

Tabelle 3: Biegebewehrung gemäss Vordimensionierung.

Mit der gewählten Biegebewehrung ergibt sich gemäss Tabelle 4 der vorhergesagte Biegewiderstand von 539.6 kNm.

$\omega [-]$	$M_{Rk} [kNm]$
0.238	<b>539.6</b>

Tabelle 4: Biegewiderstand gemäss Vordimensionierung.

## 4.5 Querkraftwiderstand

Der Querkraftwiderstand der Prüfkörper wird nach der Modellvorstellung der SIA-Norm 262:2013 gemäss Ziffer 4.3.3.2 für Bauteile ohne Querkraftbewehrung vordimensioniert. Dies ist unter Berücksichtigung von entsprechenden Variationen massgebend für die Auslegung des gesamten Versuchsstandes und insbesondere der Hydraulikzylinder.

Dabei wird der Querkraftwiderstand gemäss Modellvorstellung für den um  $d_v/2$  entfernten fiktiven Nachweisschnitt von der Krafteinleitung bestimmt. Der Querkraftwiderstand für Bauteile ohne Querkraftbewehrung gemäss SIA 262 lässt sich folgendermassen berechnen:

$$V_{Rk} = k_d \cdot \tau_{cm} \cdot d_v \cdot b \quad (4)$$

$$k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_s \cdot d_v \cdot k_g} \quad (5)$$

$$k_g = \frac{48}{16 + d_{\max}} \quad (6)$$

Da die Biegebewehrung im elastischen Bereich bleibt, gilt für die Dehnung  $\varepsilon_v$  folgende Beziehung:

$$\varepsilon_s = \frac{f_{sk}}{E_s} \cdot \frac{M_{Ek}}{M_{Rk}} \quad (7)$$

Der Querkraftwiderstand nach der SIA-Norm 262 hängt von der Dehnung  $\varepsilon_s$  ab und damit auch vom einwirkenden Biegemoment  $M_{Ek}$ , welches sich im vorliegenden Fall mit dem Term  $V_{Rk} * l$  gleichsetzen lässt. Die nun implizit vorliegende Darstellung der Berechnung des Querkraftwiderstandes lässt sich iterativ lösen. Es resultiert den in Tabelle 5 aufgeführten Querkraftwiderstand.

$V_{Rk}[kN]$
362

Tabelle 5: Querkraftwiderstand gemäss Vordimensionierung.

## 5 Herstellung

Insgesamt wurden gemäss Bild 6 fünf Prüfkörper mit an beiden Enden angeordneten Versuchsbereichen hergestellt, siehe Bild 6. Die daraus insgesamt resultierenden zehn Versuche sind folgendermassen unterschiedlich konzipiert (Die Prüfkörper sind durch die Beschriftungen P 1.1, P 1.2, P 2.1... P 5.2 gekennzeichnet): P 1 und P 2 sind durchbetoniert und weisen daher keine Arbeitsfuge auf; sie dienen mit den Bezeichnungen P 1.1, P 1.2, P 2.1 und P 2.2 als Referenzversuche einerseits für die Verifizierung des prognostizierten Querkraftwiderstands und anderseits zur Bestimmung des Ortes der Rissinitiierung.

Die Prüfkörper P 3.1, P 3.2 und P 4.1 beinhalten das entwickelte Abschalungselement, jedoch ohne Schlaufenbewehrung zur Querkraftsicherung. Bei diesen drei Prüfkörpern wird im Vergleich zu den Referenzversuchen eine leicht geringere Traglast erwartet. Die restlichen drei Prüfkörper P 4.2, P 5.1 und P 5.2 weisen im Gegensatz zu P 3.1, P 3.2 und P 4.1 eine Querkraftsicherung mittels Schlaufenbewehrung auf. Hier wird im Vergleich zu den Referenzversuchen mindestens der gleich hohe Querkraftwiderstand erwartet. Eine Zusammenfassung ist in Tabelle 6 wiedergegeben.

Prüfkörper	Gestaltung der Arbeitsfuge
P 1.1, P 1.2, P 2.1, P 2.2	Ohne Etappe durchbetoniert.
P 3.1, P 3.2, P 4.1	Etappiert mit Abschalungselement ohne Schlaufenbewehrung.
P 4.2, P 5.1, P 5.2	Etappiert mit Abschalungselement inklusive Schlaufenbewehrung.

Tabelle 6: Übersicht der Prüfkörper.



Bild 6: Prüfkörper nach dem Entfernen der seitlichen Abschalungen.

### 5.1 Abmessungen

Wie in Bild 7 dargestellt, wurden alle Prüfkörper identisch mit folgenden Abmessungen hergestellt: Länge von 360 cm, Breite von 100 cm und Plattendicke von 30 cm. Die Abschalungselemente wurden 75 cm vom Plattenrand positioniert. Mit diesen Abmessungen ergibt sich für einen Prüfkörper ein Gesamtgewicht von 2.7 Tonnen, siehe Tabelle 7 und Bild 7 a) und b).

Länge	360 cm
Breite	100 cm
Stärke	30 cm
Gewicht	2.7 t

Tabelle 7: Abmessungen der Prüfkörper.

a)



b)

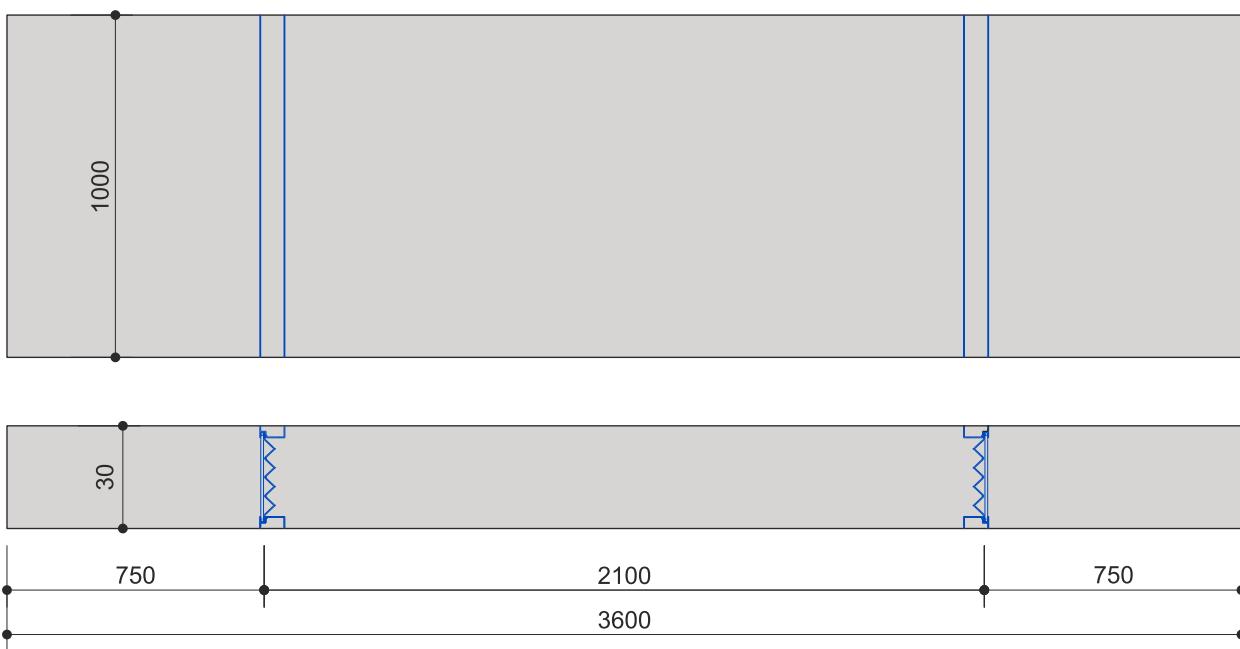


Bild 7: Abmessungen der Prüfkörper, a) Referenzversuche, b) Versuchskörper mit Abschalung am Beispiel P5.

## 5.2 Biege- und Querkraftbewehrung

Die Biegebewehrung wurde bei allen Prüfkörpern identisch verlegt. In jedem Prüfkörper wurden 15 Bewehrungsseisen mit einem Durchmesser von 20 mm verwendet. Zur Gewährleistung der Verankerung sind die Bewehrungsseisen an beiden Enden mit einem Endhaken versehen.

Die Prüfkörper sind im mittleren Bereich zur Sicherheit durch eine Querkraftbewehrung verstärkt, siehe hierzu Bild 8 und Bild 9. Mit dieser Massnahme soll verhindert werden, dass es außerhalb der eigentlichen Prüfbereiche zwischen den beiden Auflagern zu einem unbeabsichtigten Querkraftversagen kommt. Die Bewehrung der Prüfkörper ist in Bild 8 am Beispiel des Prüfkörpers P3 dargestellt. Tabelle 8 zeigt eine Zusammenfassung der eingelegten Bewehrung pro Prüfkörper.

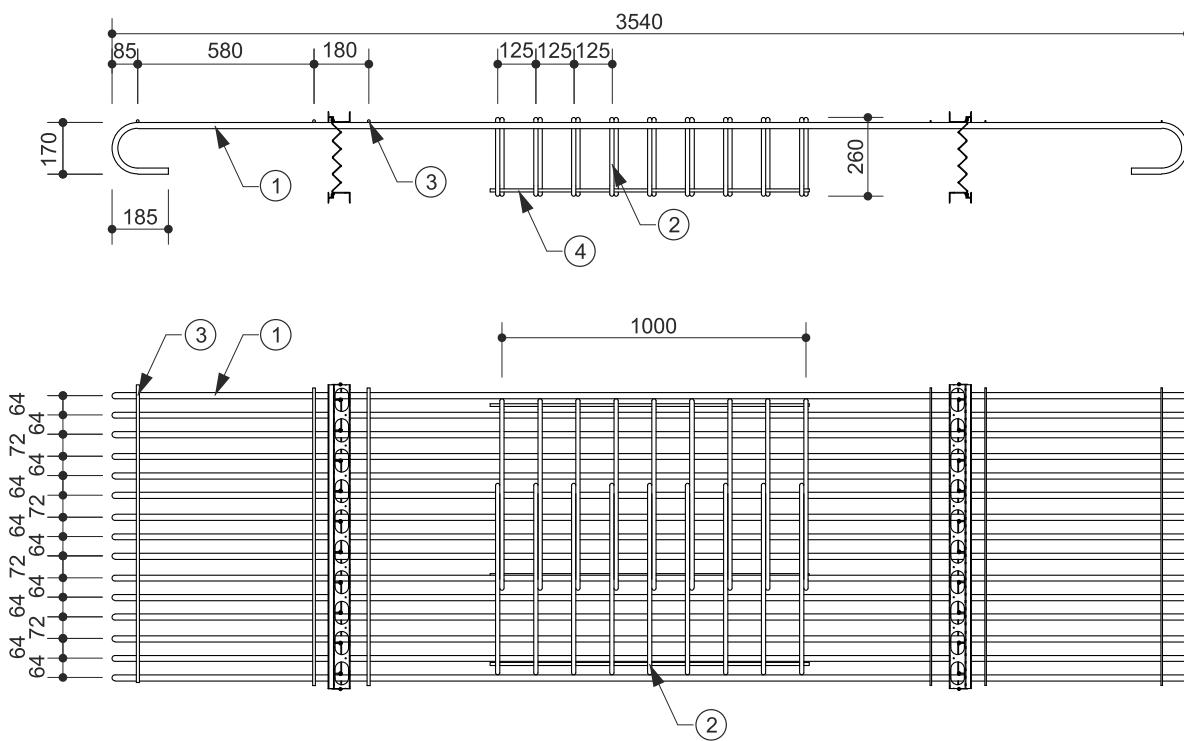


Bild 8: Biege- und Querkraftbewehrung der Prüfkörper am Beispiel P3.

Pos.	d [mm]	Stück	Beschreibung
1	20	15	Biegebewehrung mit 2 x Endhaken
2	14	18	Querkraftbügel, b = 630 mm, h = 260 mm
3	10	6	Lagereisen, l = 980 mm
4	10	4	Lagereisen, l = 1050 mm

Tabelle 8: Biege- und Querkraftbewehrung der Prüfkörper.

a)



b)



Bild 9: a, b) Prüfkörper nach dem Einbringen der Bewehrung und den Abschalungselementen.

### 5.3 Werkstoffe

#### Beton

Der Beton wurde von der Firma Holcim AG in Birsfelden geliefert. Gemäss Vordimensionierung wurde ein Beton mit der Qualität C300 (NPK C) C30/37 und einem Größtkorn von 32 mm bestellt. Zur Begrenzung der Druckfestigkeit des Betons ist in Absprache mit dem Laborverantwortlichen der Firma Holcim AG 10 kg/m<sup>3</sup> weniger Zement der Betonmischung beigefügt worden.

Beton gemäss Lieferschein: **C300 (NPK C) C30/37, XC4, XF1 (CH), Kranbeton C3 32**

#### Betonstahl

Der Vordimensionierung liegt ein Betonstahl mit der Qualität B500B zugrunde; die Bewehrung ist durch die Firma Debrunner AG geliefert worden.

Betonstahl gemäss Lieferschein: **B500B, gerippt**

### 5.4 Fertigung

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte in mehreren Etappen. Zuerst wurde ein Schalungsboden erstellt, gefolgt von der Montage der seitlichen Abschalungen. Anschließend wurde die Bewehrung verlegt und die Abschalungselemente eingebaut. Das Betonieren der Prüfkörper erfolgte gemäss entsprechender Etappierung durch die Abschalungselemente. In der ersten Etappe wurden die durchbetonierten Prüfkörper P1 und P2 sowie die mittleren Bereiche der restlichen Prüfkörper zwischen den Abschalungselementen betoniert. In der zweiten Etappe sind die Außenbereich zwischen Rand und den Abschalungselementen betoniert worden.

Der Beton wurde von der Firma Holcim AG Birsfelden mit einem Transportbetonmischer zur Fachhochschule geliefert, anschließend mithilfe eines Lastwagenkrans der Firma Grollimund AG aus Muttenz unter Beihilfe eines Betonsilos eingebracht und mit einem Vibriernadel verdichtet. Impressionen der Fertigung sind in Bild 10 a) bis d) festgehalten.

## Ausführungsdaten

Schritt 1	Erstellung der Schalung	KW 23, 2023
Schritt 2	Prüfkörper Bewehren und Abschalungselemente einbauen	KW 24 und 25, 2023
Schritt 3	Betonieren 1. Etappe	28.06.2023
Schritt 4	Betonieren 2. Etappe	03.07.2023

a)



b)



c)



d)



Bild 10: a) Prüfkörper vor dem Betonieren, b) Betonieren der ersten Etappe, c) Abschalung nach dem betonieren der ersten Etappe, d) Betonieren der zweiten Etappe.

## 6 Werkstoffprüfungen

### 6.1 Betonstahl

Es wird ein Betonstahl mit der Qualität B500B verwendet. Für eine exakte Prognose des Biegewiderstandes werden die Werkstoffeigenschaften der Biegebewehrung mittels Zugproben ermittelt. Hierzu sind aus drei Bewehrungsstäben acht Zugproben entnommen worden. Von den acht Zugproben ist jeweils der Elastizitätsmodul, die Fließgrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung ermittelt worden. Die Zugversuche wurden auf der Universalprüfmaschine Amsler mit einer Kraftkapazität von 1 MN durchgeführt. Die acht Zugproben sind in Bild 11 a) und b) vor und nach der Prüfung dargestellt. Die ermittelten Werkstoffkenngrößen sind in der Tabelle 9 aufgeführt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse ist der Tabelle 10 zu entnehmen.



Bild 11: Biegebewehrung  $d = 20 \text{ mm}$ , a) Vor den Zugversuchen, b) Nach den Zugversuchen.

Bezeichnung	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	Mittelwert
E-Modul [ $\text{kN}/\text{mm}^2$ ]	214	204	198	189	201	209	207	205	203
$f_{s0.2m}$ [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	541	522	550	544	539	543	552	555	543
$f_{tm}$ [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	639	638	647	641	651	639	651	651	645
$\varepsilon_{u.m}$ [%]	15.8	16.9	14.2	14.6	15.2	15.5	13.0	16.3	15.2

Tabelle 9: Biegebewehrung  $d = 20 \text{ mm}$ : Resultate und Auswertung der acht Zugproben.

Bezeichnung	Charakteristik	Wert
Elastizitätsmodul	Mittelwert	$E = 203 \text{ kN/mm}^2$
Fliessgrenze	5%-Fraktile	$f_{s0.2k} = 518 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit	5%-Fraktile	$f_{tk} = 630 \text{ N/mm}^2$
Bruchdehnung	10%-Fraktile	$\varepsilon_{uk} = 12.8 \%$

Tabelle 10: Biegebewehrung d = 20 mm: Charakteristische Werte.

Von der Schlaufenbewehrung liegen die Werkstoffkenngrößen ebenfalls vor. Mittels Zugversuche ist die Charakteristik in Form des in Bild 12 dargestellten Spannungs-Dehnungsdiagrammes ermittelt worden.

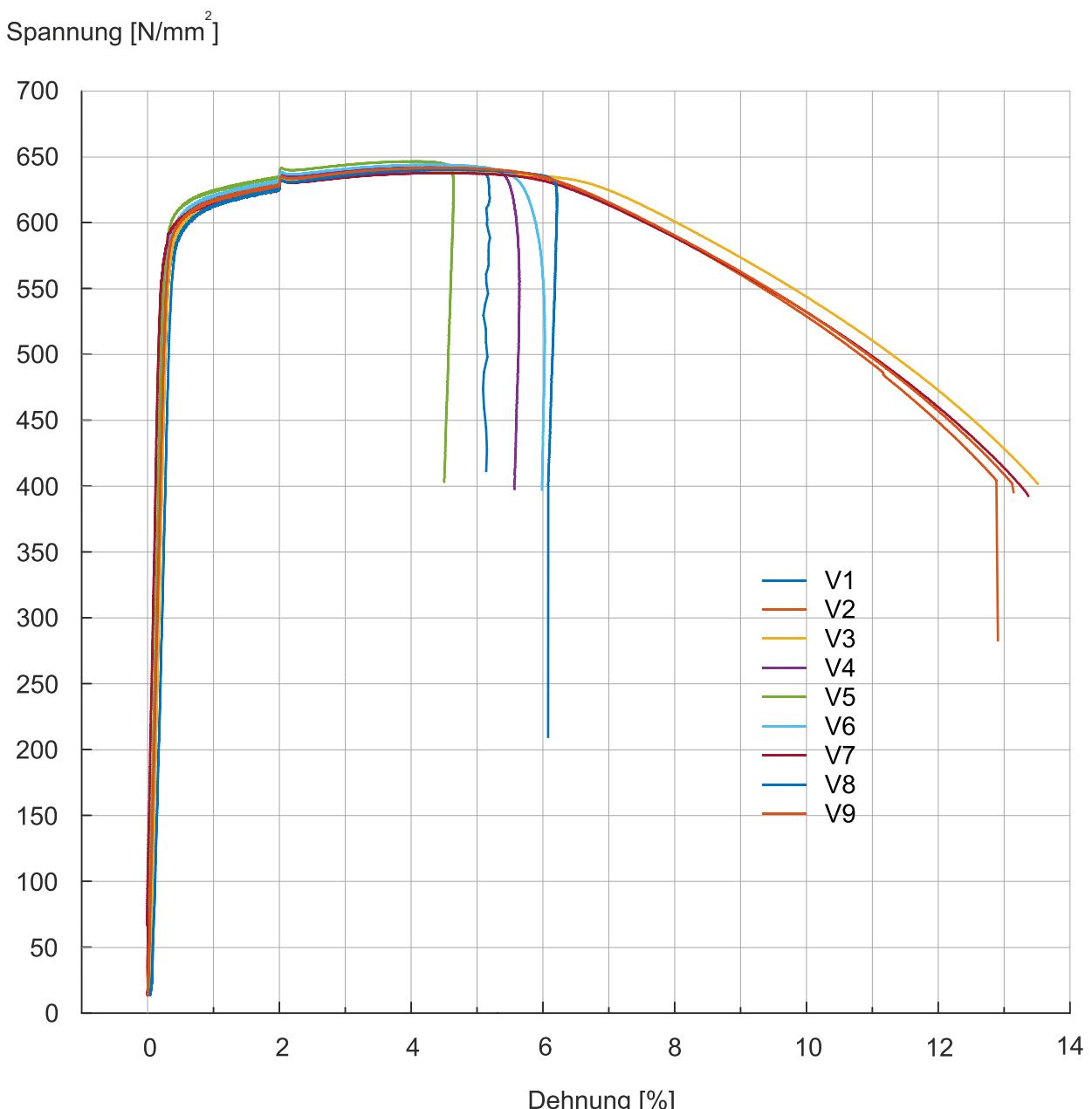


Bild 12: Schlaufenbewehrung: Spannungs-Dehnungsdiagramm der Zugversuche.

Die aus den neun Versuchen ermittelten Kenngrößen sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Bezeichnung	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	Mittelwert
E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	193	182	206	211	217	217	254	185	210	208
f <sub>y,02,m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	596	606	596	602	610	604	600	592	600	601
f <sub>u,m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	640	640	639	643	647	644	638	640	642	641
ε <sub>u,m</sub> [%]	4.3	4.4	4.4	4.2	4.1	4.3	4.3	4.6	4.5	4.4
ε <sub>uk,act</sub> [%]										4.0
f <sub>sk,act</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]										586.7
f <sub>uk,act</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]										634.2

Tabelle 11: Schlaufenbewehrung d = 8 mm: Resultate und Auswertung der neun Zugproben.

Daraus lassen sich die charakteristischen Werte der Schlaufenbewehrung in Tabelle 12 ermitteln.

Bezeichnung	Charakteristik	Wert
Elastizitätsmodul	Mittelwert	E = 208 kN/mm <sup>2</sup>
Fliessgrenze	5%-Fraktile	f <sub>sk,act</sub> = 586.7 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit	5%-Fraktile	f <sub>uk,act</sub> = 634.2 N/mm <sup>2</sup>
Bruchdehnung	10%-Fraktile	ε <sub>uk,act</sub> = 4.0 %

Tabelle 12: Schlaufenbewehrung d = 8 mm: Charakteristische Werte.

## 6.2 Beton

Gleichzeitig zu den Betonieretappen sind Betonprüfkörper in Form von Würfeln und Zylindern gemäss Tabelle 13 hergestellt worden, um die Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit des Betons bestimmen zu können. Die Würfel und Zylinder wurden jeweils zwei Tage nach dem Betonieren ausgeschalt und anschließend bis zum Zeitpunkt der Prüfung im Wasserbad gelagert. Die Betonproben wurden in mehreren Serien getestet, was eine Überwachung der Druck- und Zugfestigkeit bis zum Abschluss aller Versuche ermöglicht. Bild 13 a) und b) zeigen eine Auswahl von Würfeldruck- und Spaltzugproben vor und nach der Versuchsdurchführung.

Für die Durchführung der Druck- und Spaltzugversuche wurde die Universalprüfmaschine Veritest mit einer Kraftkapazität von 3 MN verwendet. Eine Zusammenstellung der Proben ist der Tabelle 13 zu entnehmen. Sämtliche Ergebnisse der Betonprüfungen sind in Tabelle 14 bis Tabelle 17 aufgeführt.

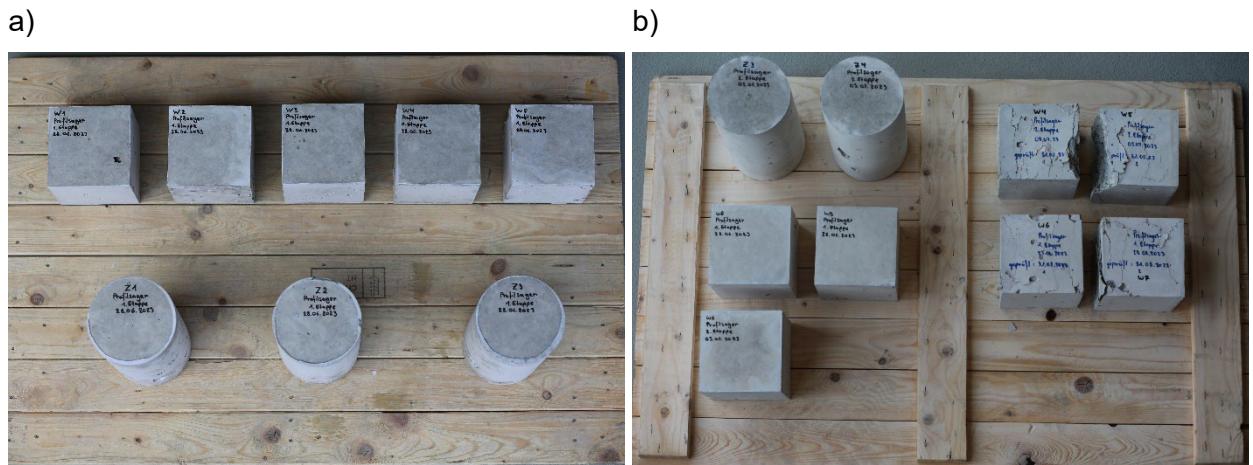


Bild 13: a und b) Prüfkörper zur Ermittlung der Druck- und Spaltzugfestigkeiten.

	<b>Druckproben</b>	<b>Spaltzugproben</b>
<b>Etappe 1</b>	9	3
<b>Etappe 2</b>	6	4

Tabelle 13: Übersicht der Anzahl Druck- und Spaltzugproben.

Würfeldruckversuche 1. Etappe							
Bezeichnung	Herstellungsdatum	B	H	L	A	Prüfdatum	Würfeldruckfestigkeit
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
W1	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	28.1
W2	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	27.8
W3	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	27.2
W4	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	26.6
W5	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	26.8
W6	28.06.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	28.3
W7	28.06.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	26.6
W8	28.06.2023	150	150	150	22500	21.09.2023	34.1
W9	28.06.2023	150	150	150	22500	21.09.2023	34.8
Mittelwert							28.9

Tabelle 14: Erste Betonieretappe: Resultate der Würfeldruckproben.

Spaltzugversuche 1. Etappe						
Bezeichnung	Herstellungsdatum	D	H	A-Spalt	Prüfdatum	Spaltzugfestigkeit
		[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
Z1	28.06.2023	150	300	45000	31.07.2023	2.6
Z2	28.06.2023	150	300	45000	31.07.2023	2.2
Z3	28.06.2023	150	300	45000	31.07.2023	2.6
Mittelwert						2.5

Tabelle 15: Erste Betonieretappe: Resultate der Spaltzugproben.

Würfeldruckversuche 2. Etappe							
Bezeichnung	Herstellungsdatum	B	H	L	A	Prüfdatum	Würfeldruckfestigkeit
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
W1	03.07.2023	150	150	150	22500	03.08.2023	36.5
W2	03.07.2023	150	150	150	22500	03.08.2023	35.9
W3	03.07.2023	150	150	150	22500	03.08.2023	36.4
W4	03.07.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	41.7
W5	03.07.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	44.6
W6	03.07.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	43.7
Mittelwert							39.8

Tabelle 16: Zweite Betonieretappe: Resultate der Würfeldruckproben.

Spaltzugversuche 2. Etappe						
Bezeichnung	Herstellungsdatum	D	H	A-Spalt	Prüfdatum	Spaltzugfestigkeit
		[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
Z1	03.07.2023	150	300	45000	03.08.2023	3.0
Z2	03.07.2023	150	300	45000	03.08.2023	3.2
Z3	03.07.2023	150	300	45000	21.09.2023	3.6
Z4	03.07.2023	150	300	45000	21.09.2023	3.3
Mittelwert						3.3

Tabelle 17: Zweite Betonieretappe: Resultate der Spaltzugproben.

Am 22.09.2023 wurden zusätzlich Druckproben mit einem Betonprüfhammer Schmidt durchgeführt. Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse des Betonprüfhammers gewisse Abweichungen zu den Würfeldruckproben aufweisen. Aus diesem Grund sind für einen späteren Zeitpunkt Kernbohrungen geplant, die anschliessend weiteren Prüfungen unterzogen werden sollen. Dies ermöglicht eine genauere Beurteilung der Entwicklung der Betondruckfestigkeit.

## 7 Prognose

### 7.1 Biegewiderstand

Basierend auf den in Kapitel 6.1 durchgeführten Werkstoffprüfungen lässt sich die Prognose des Biegewiderstands der Prüfkörper gemäss Tabelle 18 aktualisieren:

$\omega [-]$	$M_{R.0.2k} [kNm]$
0.426	<b>524</b>

Tabelle 18: Prognostizierter Biegewiderstand der Prüfkörper.

### 7.2 Querkraftwiderstand

Für die Erstellung der Prognose des Querkraftwiderstandes muss zwischen durchbetonierten Prüfkörpern und den Prüfkörpern mit integriertem Abschalungselement unterschieden werden. Bei den durchbetonierten Prüfkörpern ist aufgrund der fundiert vorliegenden Modellvorstellungen mit den in Kapitel 6.2 durchgeführten Werkstoffprüfungen eine relativ präzise Prognose möglich, während bei den Prüfkörpern mit Abschalungselement die fehlende Modellvorstellung lediglich eine Einschätzung zulässt.

Für die durchbetonierten Prüfkörper kann der Querkraftwiderstand nebst der in Kapitel 2.3 erläuterten Grundlage der SIA-Norm auch auf der Basis der Modellvorstellung CSCT berechnet werden. Hierfür wird der Beton der ersten Betonieretappe gemäss DIN EN 13791 der Festigkeitsklasse C20/25 - C25/30 zugeordnet.

Daraus resultiert ein Querkraftwiderstand auf Mittelwertniveau von 316 kN – 340 kN.

$V_{Rm} [kN]$
316 - 340

Tabelle 19: Prognostizierter Querkraftwiderstand der Prüfkörper.

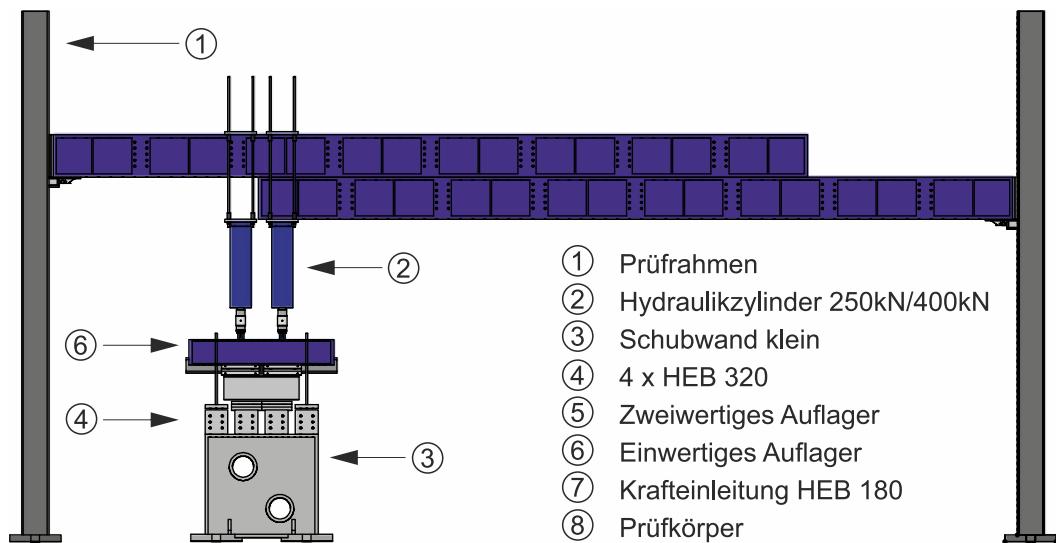
Für die Prüfkörper mit einem Abschalungselement ohne Querkraftverstärkung wird erwartet, dass der Querkraftwiderstand etwas niedriger ausfällt. Hingegen wird für Prüfkörper mit einem Abschalungselement mit Querkraftverstärkung ein leicht höherer Querkraftwiderstand erwartet.

## 8 Versuchsvorbereitung

### 8.1 Versuchseinrichtung

Die Entwicklung der Versuchseinrichtung erfolgt auf der Basis eines virtuellen 3D-Modells vom gesamten Aufbau des Baulabors sowie den bestehenden Stahlbauelementen; er wird in der Planungsphase mit Hilfe des Softwarepaketes Inventor von Autodesk konstruiert. Der für die Versuchsdurchführung ausgewählte Universalprüfrahmen 2 x 400 kN in Bild 14, besteht aus zwei Stahlstützen des Walzprofils HEB 360 mit einer Höhe von 6.48 m und einer auf dem Stützenlochraster von 80 mm höhenverstellbaren Traverse aus zwei 10 m langen, durch eine Längsfuge verbundenen HEM 560. Die beiden Stützen sind über je zwei Schubhülsen und vorgespannte Schraubenverbindungen kraft- sowie in horizontaler Richtung formschlüssig mit dem Aufspannfeld verbunden.

a)



b)

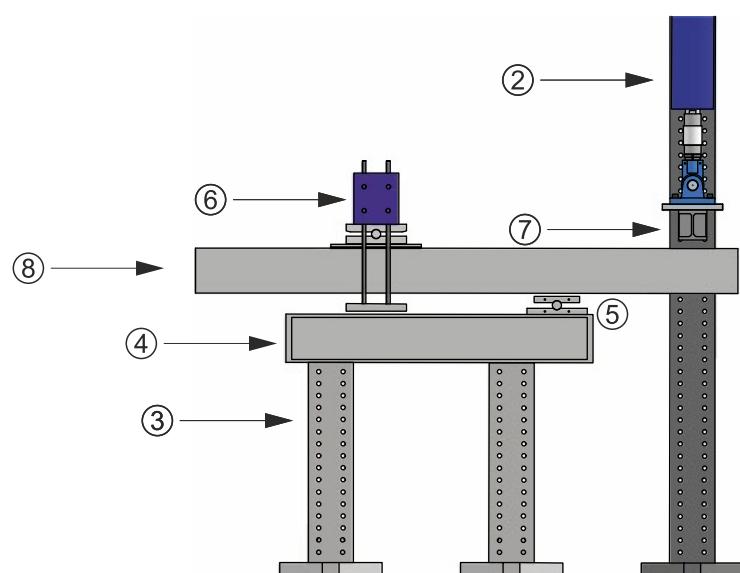


Bild 14: a) Frontale Ansicht Prüfstand Mst: 1:100, b) Seitliche Ansicht Prüfstand Mst:1:50.

Die Belastung erfolgt über zwei nebeneinander angeordneten Hydraulikzylinder mit je einer Kraftkapazität von 400 kN auf Druck bzw. 200 kN auf Zug, welche über eine schraubbare Klemmverbindung auf der Traverse stufenlos verschieblich angebracht sind. Die Hydraulikeinheiten sind jeweils mit einer Kraftmessdose (basierend auf Dehnmessstreifen) sowie einem internen Wegaufnehmer (Glasmassstab) ausgestattet und können über die Ventileinheit auf diese beiden Größen geregelt werden. Die zweifach gelenkig gelagerten Hydraulikeinheiten erreichen einen maximalen Hub von 250 mm. Die aus den beiden Hydraulikzylinder resultierende Einzellasten werden über ein Walzprofil des Typs HEB 180 auf die gesamte Breite des Prüfkörpers als gleichmäßig verteilte Linienlast eingeleitet.

Für die Auflager wurde eine Unterkonstruktion verwendet, die aus zwei kleinen Schubwänden und vier Stahlträgern besteht. Die Schubwände sind identisch zu den Stützen über Schuhhülsen und vorgespannte Schraubenverbindungen mit dem Aufspannfeld kraftschlüssig verbunden. Das positive Auflager im vorderen Bereich, welches zweiwertig ausgeführt ist, besteht aus einem Gelenkkörper, welches auf den vier Stahlträgern angeschraubt ist.

Für das negative Auflager im hinteren Bereich ist ein Walzprofil des Typs HEB 340 mit acht Gewindestangen ( $d = 24$  mm) auf die äusseren zwei Stahlträger heruntergeschraubt. Unter dem Walzprofil HEB 340 ist das verschiebbliche Gelenkkörper auf den Kopf gestellt angeordnet. Für die Sicherstellung des Freiheitsgrades in horizontaler Richtung befindet sich zwischen Versuchsträger und Gelenkkörper ein Aufbau aus Elastomerlager, lastverteilender Stahlplatte und Teflongleitschicht.

## 8.2 Versuchsvorbereitung

Die Prüfkörper wurden mit dem Hallenkran in den Prüfstand eingehoben. Nach dem Absetzen und Ausrichten sind zunächst in den Bereichen des negativen Auflagers und der Krafteinleitung grössere Unebenheiten mittels Betonschleifer beseitigt worden. Die beiden Seitenflächen sind mit einem Dispersionsanstrich versehen, welcher das Erkennen und Erfassen von Rissen im Prüfkörper während des Versuchs ermöglichen soll.

Im Bereich zwischen der Krafteinleitung und dem positiven Auflager wurde auf den Dispersionsanstrich ein feines Messraster mit einer Maschenweite von 5 cm aufgetragen. Dieses Messraster dient gleichzeitig als Raster für die Deformettermessungen; die Deformeterpunkte sind in den Kreuzungspunkten angeordnet, wie dies in Bild 15 zu erkennen ist. Das feine Messraster dient zusätzlich bei der Auswertung der Filmaufnahmen zur photogrammetrischen Ortsbestimmung.

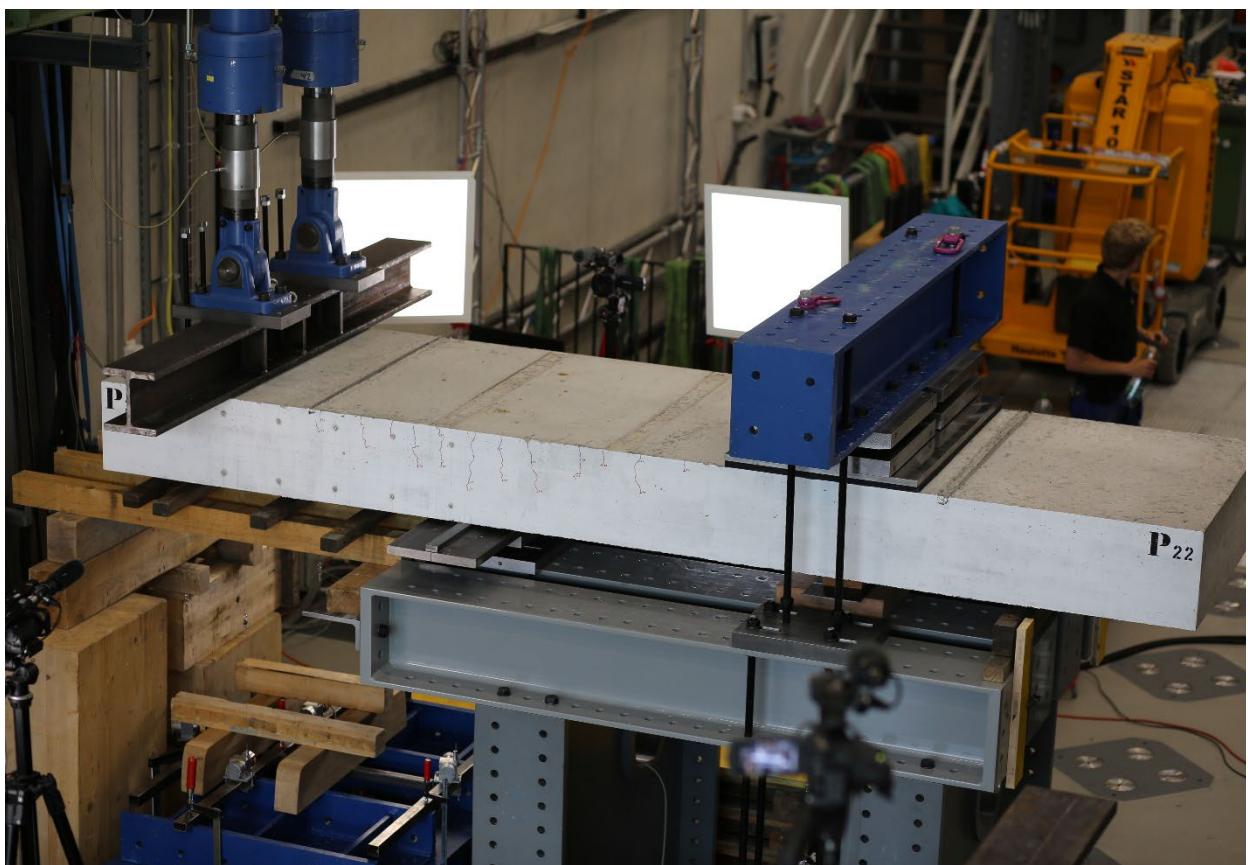
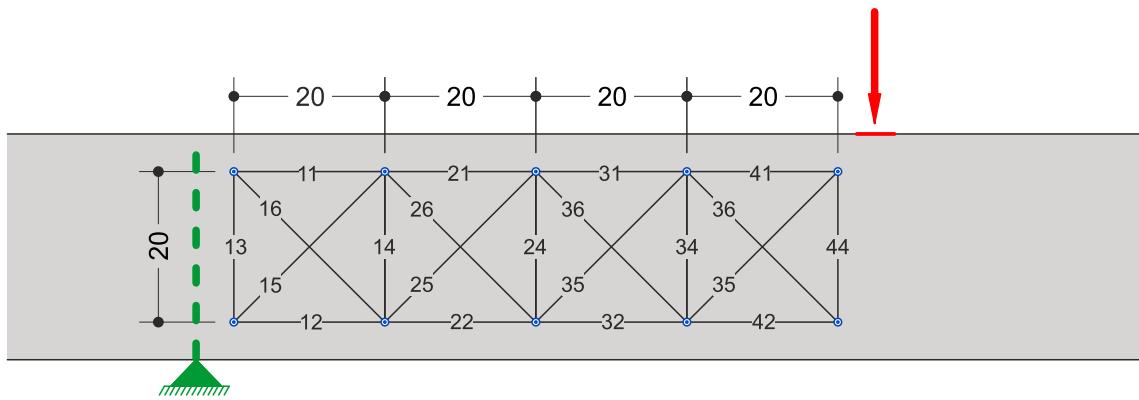


Bild 15: Übersicht: Prüfkörper im Versuchsstand.

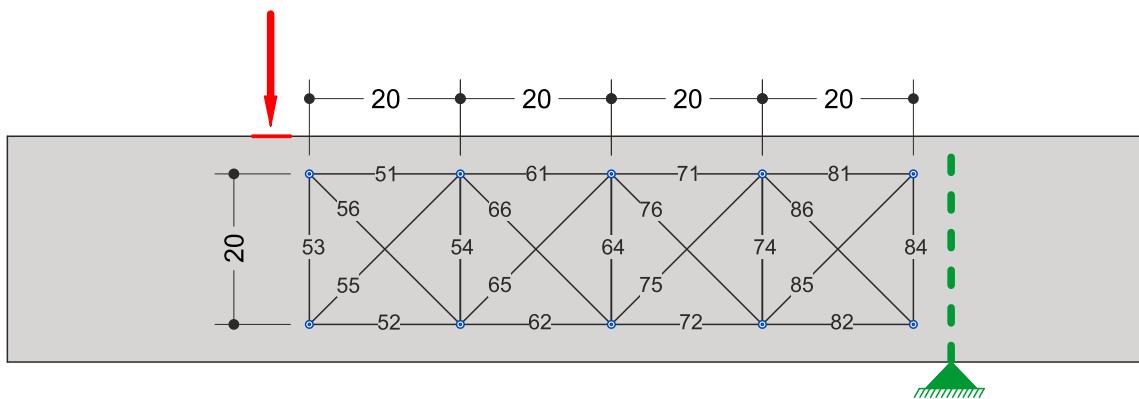
## 8.3 Messkonzept

Die kontinuierliche Aufzeichnung der vertikalen Gesamtverformung entlang der z-Achse erfolgt mithilfe von fünf Seilzugsensoren (CD 60) mit einem maximalen Messbereich von 600 mm. Dabei wurden zwei Seilzugsensoren zentrisch unter den beiden Hydraulikzylindern platziert. Um die Verformungen des negativen Auflagers zu überwachen, wurde unter dem Auflager ein weiterer Seilzugsensor positioniert. Zusätzlich wurden Seilzugsensoren in einem Abstand von 250 mm nach dem positiven Auflager und 280 mm nach der Lasteinleitungslinie platziert, siehe hierzu die Darstellung in Bild 16 c).

a)



b)



c)

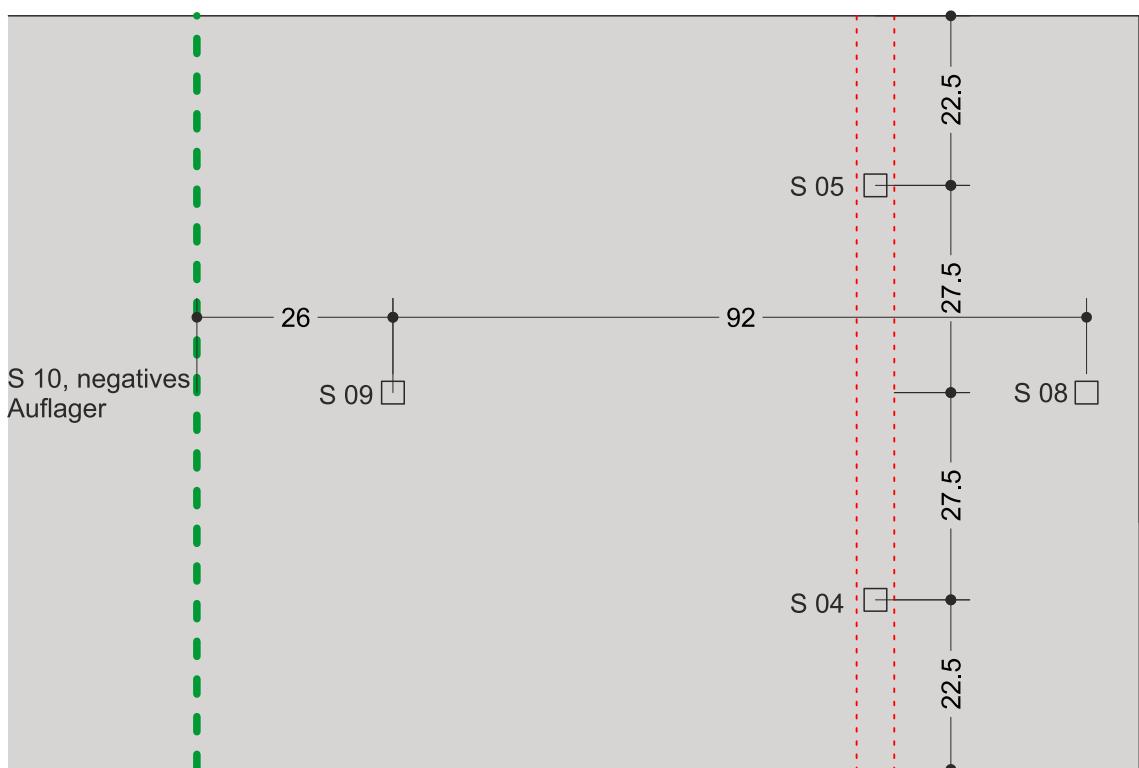


Bild 16: Messkonzept Massstab 1:10; a) Ansicht Hallenbüro, b) Ansicht Hallentor; c) Untersicht.

Zwischen den Laststufen wurden zeitlich diskrete Messungen mithilfe von zwei Deformatoren durchgeführt. Aus den erfassten Deformatormessungen lassen sich die vorhandenen Verzerrungen der Betonoberfläche rechnerisch ermitteln. Zu diesem Zweck wurden auf beiden Seiten zehn Deformatorenpunkte auf das Messraster geklebt, woraus sich jeweils vier quadratische Messfelder in Bild 16 a) und b) ergeben.

#### 8.4 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm gemäss Tabelle 20 ist in vier Teile gestaffelt. Gestartet wurde mit der Prüfung der zwei durchbetonierten Prüfkörpern P 1.1 und P 1.2, welche wie in Kapitel 4.1 beschrieben für die weiteren Versuche als Referenzwerte dienen sollen. Aus der Auswertung der Videoaufzeichnungen lassen sich die Stellen der Rissinitiierung ermitteln. Daraufhin wurden im zweiten Teil die drei Prüfkörper mit dem Abschalungselement aber ohne Querkraftverstärkung P 3.1, P 3.2 und P 4.1 getestet.

Nach einer kurzen Unterbrechung aufgrund von Ferienabwesenheiten wurde das Versuchsprogramm mit dem dritten Teil fortgesetzt. Dabei wurden die zwei restlichen, durchbetonierte Prüfkörper P 2.1 und P 2.2 wiederum als Referenzversuche für die Bestimmung der Stellen der Rissinitiierung durchgeführt.

Zum Schluss wurden im letzten Teil die drei Prüfkörper mit Abschalungselement und integrierter Querkraftverstärkung P 4.2, P 5.1 und P 5.2 geprüft.

Im Verlauf der Versuche wurden fortlaufend Werkstoffprüfungen für die Festigkeitsentwicklung des Betons durchgeführt.

Datum des Versuches	Versuchskörper	Gestaltung der Arbeitsfuge
01.08.2023	P 1.1	Durchbetoniert
03.08.2023	P 1.2	Durchbetoniert
04.08.2023	P 3.1	Ohne Querkraftbewehrung
08.08.2023	P 3.2	Ohne Querkraftbewehrung
14.08.2023	P 4.1	Ohne Querkraftbewehrung
Unterbruch Ferien		
31.08.2023	P 2.1	Durchbetoniert
04.09.2023	P 2.2	Durchbetoniert
07.09.2023	P 4.2	Mit Querkraftbewehrung
12.09.2023	P 5.1	Mit Querkraftbewehrung
20.09.2023	P 5.2	Mit Querkraftbewehrung

Tabelle 20: Versuchsprogramm.

## 8.5 Ablauf Traglastversuch

Damit zu jedem Zeitpunkt des Versuches über beide Hydraulikzylinder die identische Last auf den Prüfkörper ausgeübt werden, sind die beiden Hydraulikzylinder gemäss dem Prinzip „Master and Slave“ geregelt. Hydraulikzylinder Nr. 1 folgt dabei als Master dem programmierten Belastungsablauf. Hydraulikzylinder Nr. 2 erhält als Eingangsparameter hingegen nur die aktuelle Last des Hydraulikzylinder Nr. 1 in der Einheit [kN], mit welcher er gesteuert wird.

Der Ablauf des Versuches P 1.1 wird nachfolgend in Teilschritten mit entsprechender Erläuterung beschrieben. Die weiteren Versuche unterscheiden sich lediglich in der Anzahl der Laststufen.

- Schritt 1: Einzeichnen der Messfelder im 5 cm Raster zwischen Auflager und Lasteinleitungsreich (beidseitig).
- Schritt 2: Einmessen und Anzeichnen der Messfelderpositionen und -punkte.
- Schritt 3: Aufkleben der Messpunkte sowie Anbringen und ausrichten der Messinstrumente.
- Schritt 4: Nullmessung 1 mit Deformeter.
- Schritt 5: Nullmessung 2 mit Deformeter.
- Schritt 6: Nullabgleich der Kraftmessdosen und anschliessendes Absetzen der Hydraulik.
- Schritt 7: Nullabgleich aller Seilzugsensoren.
- Schritt 8: Kraftgesteuertes Aufbringen der Vorlast von 5 kN pro Hydraulikzylinder mit anschliessendem Halten der 5 kN.
- Schritt 9: Manuelle Freigabe für die erste Belastungsstufe.
- Schritt 10: Weggesteuerte Belastung des Prüfkörpers mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis auf 25 kN pro Hydraulikzylinder.
- Schritt 11: Deformettermessung Laststufe 1.
- Schritt 12: Erfassen von Rissen.
- Schritt 13: Weggesteuerte Belastung des Prüfkörpers mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis auf 50 kN pro Hydraulikzylinder.
- Schritt 14: Deformettermessung Laststufe 2.
- Schritt 15: Erfassen von Rissen.
- Schritt 16: Weggesteuerte Belastung des Prüfkörpers mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis auf 75 kN pro Hydraulikzylinder.
- Schritt 17: Deformettermessung Laststufe 3.
- Schritt 18: Erfassen von Rissen.
- Schritt 19: Weggesteuerte Belastung des Prüfkörpers mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis auf 100 kN pro Hydraulikzylinder.
- Schritt 20: Deformettermessung Laststufe 4.
- Schritt 21: Erfassen von Rissen.
- Schritt 22: Weggesteuerte Belastung des Prüfkörpers mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis auf 125 kN pro Hydraulikzylinder.
- Schritt 23: Deformettermessung Laststufe 5.
- Schritt 24: Erfassen von Rissen.

- Schritt 25: Weggesteuerte Belastung des Prüfkörpers mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis auf 150 kN pro Hydraulikzylinder.
- Schritt 26: Deformettermessung Laststufe 6.
- Schritt 27: Erfassen von Rissen.
- Schritt 28: Weggesteuerte Belastung des Prüfkörpers mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis zum Erreichen der maximalen Traglast.
- Schritt 29: Ende des Versuches nach Bruch des Prüfkörpers.
- Schritt 30: Speichern der Versuchsdaten.
- Schritt 31: Ausbau des Prüfkörpers.

## 9 Versuchsresultate

Die Versuche sind gemäss Versuchsprogramm in Kapitel 8.4 und den damit festgelegten Laststufen durchgeführt worden. Die während den Versuchen mit den Seilzugsensoren aufgezeichneten Kraft- und Weggrößen sind jeweils mit einem Diagramm grafisch dargestellt. Die Deformettermessungen sind für vertiefte Abklärungen punktuell ausgewertet worden. Eine vollständige Auswertung über alle Laststufen und Messpunkte ist nicht erfolgt; dies lässt sich für vertiefte wissenschaftliche Untersuchungen erneut aufgreifen. Der Aufbau der nachstehenden Kapitel entspricht dem chronologischen Ablauf des Versuchsprogrammes.

### 9.1 Prüfkörper P 1.1

Der Prüfkörper P 1.1 machte den Beginn der insgesamt zehn Versuche und war der erste von vier durchbetonierten Versuchen. Er dient als Referenzwert für die Prüfkörper mit den verbauten Abschaltungselementen. Bild 17 zeigt schematisch den Prüfkörper P 1.1 mit der Anordnung im Prüfstand und der Angabe der wichtigsten Abmessungen.

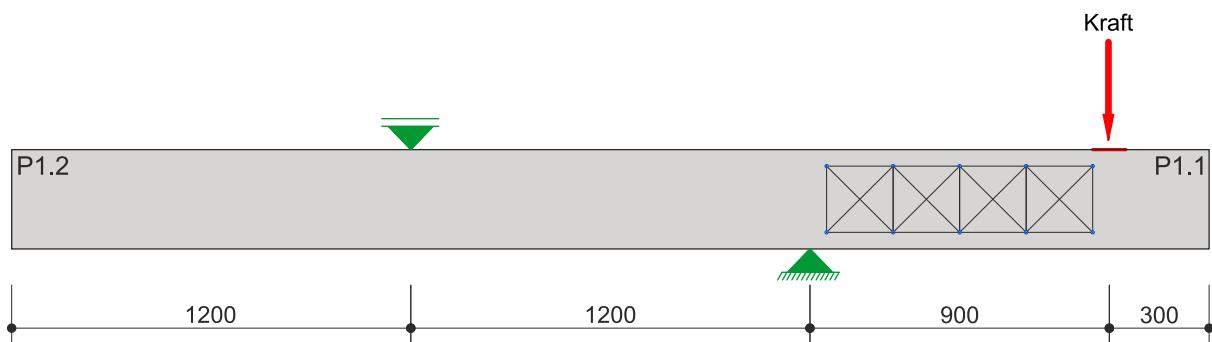


Bild 17: Positionierung des Prüfkörpers P 1.1 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Risse zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 3 – LS 5: Die bestehenden Biegerisse sind schräg Richtung Auflager weitergewachsen. Dazu haben sich neue Biegerisse im Abstand bis ca. 30 cm von der Krafteinleitung gebildet.
- LS 6: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter.
- LS 7: Entstehung eines Querkraftrisses gefolgt von einem schlagartigen Versagen des Prüfkörpers. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 320 kN. Bild 19 zeigt den Prüfkörper nach Erreichen der Bruchlast.

Kraft [kN]

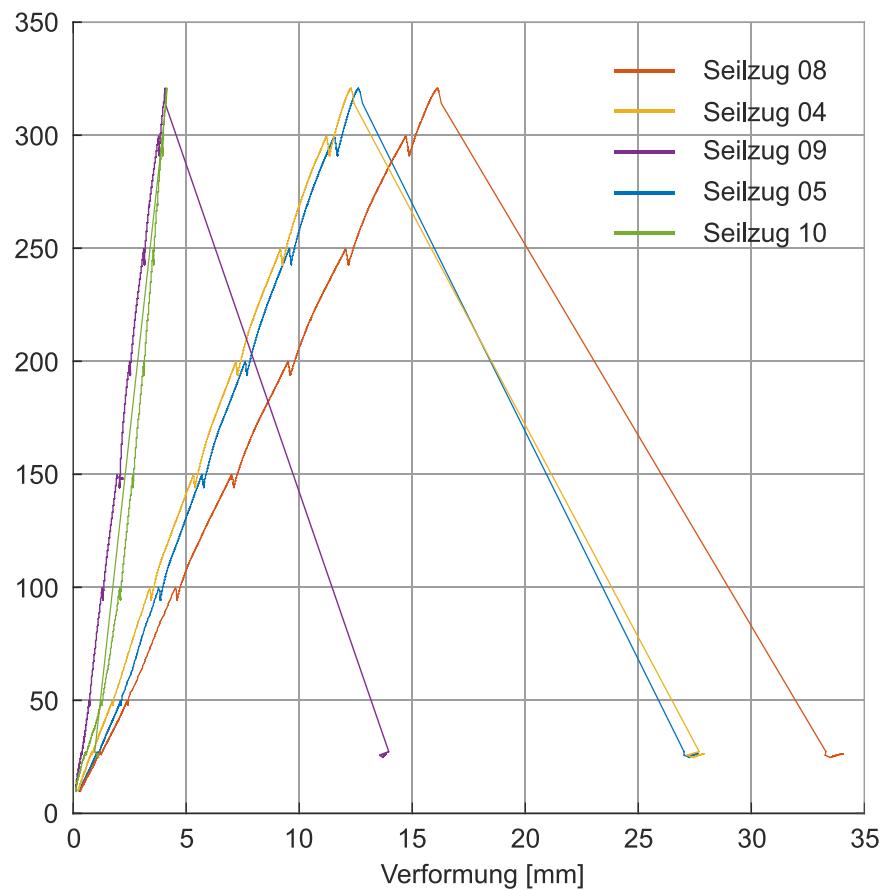


Bild 18: Prüfkörper P1.1: Kraft- Verformungsdiagramm

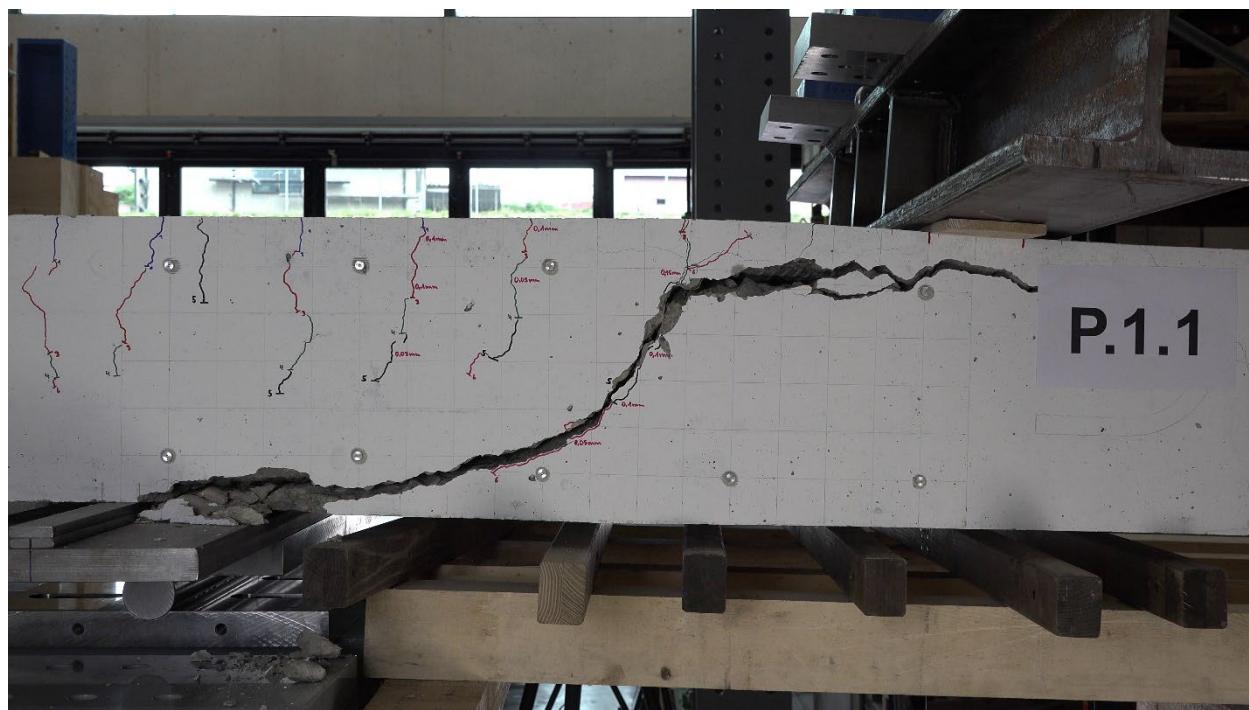


Bild 19: Prüfkörper P 1.1: Querkraftriss nach Versuchsende.

## 9.2 Prüfkörper P 1.2

Der Prüfkörper P 1.2 war der zweite von zehn Versuchen. Er dient ebenfalls als Referenzwert für die weiteren Versuche.

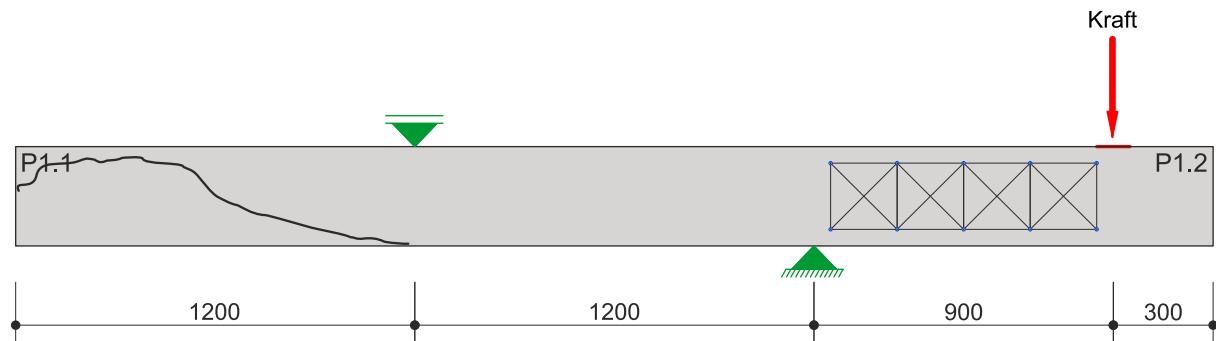


Bild 20: Positionierung des Prüfkörpers P 1.2 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Risse zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 3 – LS 5: Die bestehenden Biegerisse vergrössern sich fortlaufend schräg in Richtung Auflager. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 30 cm von der Krafteinleitung entfernt.
- LS 6: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter.
- LS 7: Entstehung eines Querkraftrisses gefolgt von einem schlagartigen Versagen des Prüfkörpers. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 342 kN.

Kraft [kN]

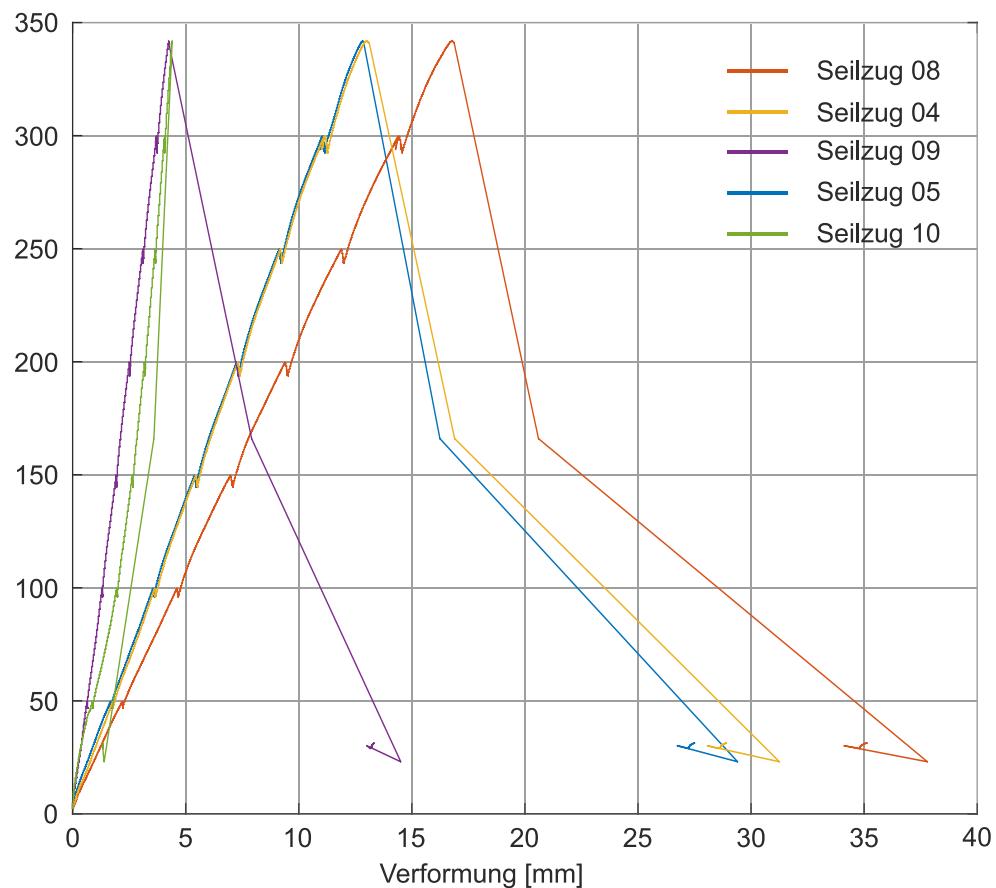


Bild 21: Prüfkörper P1.2: Kraft- Verformungsdiagramm.

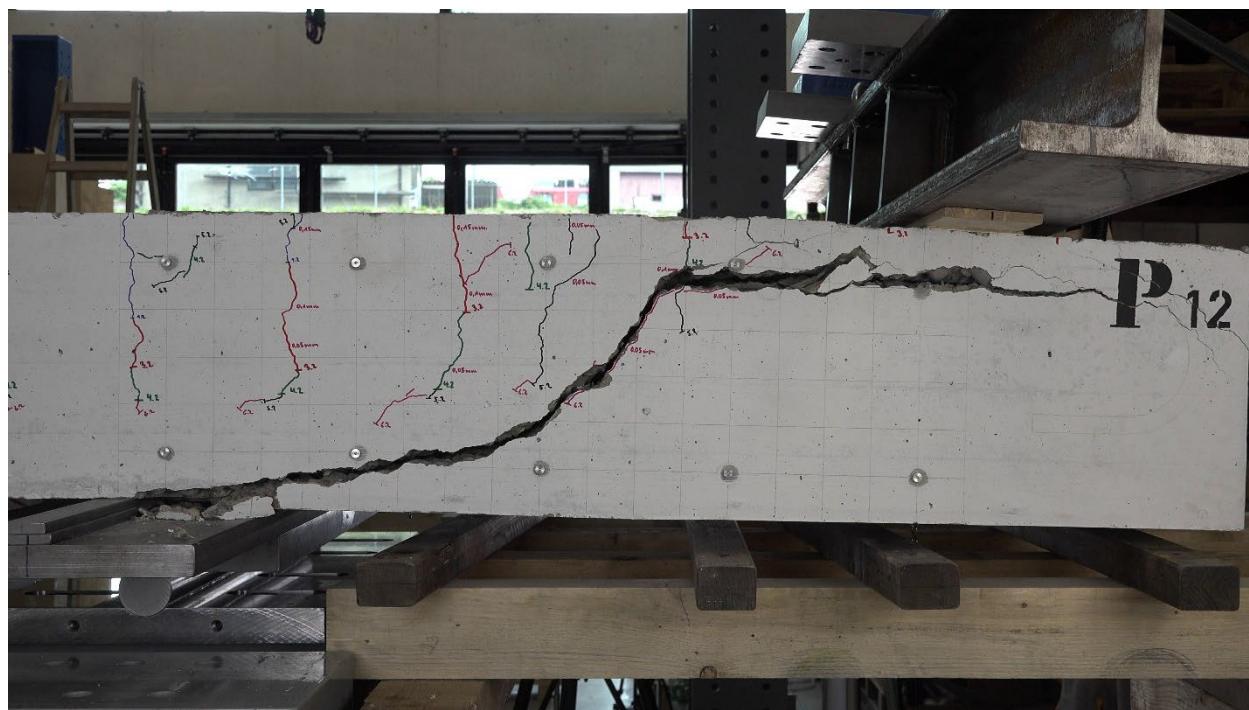


Bild 22: Prüfkörper P 1.2: Querkraftriss nach Versuchsende.

### 9.3 Prüfkörper P 3.1

Der Prüfkörper P 3.1 war der dritte von insgesamt zehn Versuchen und der erste, bei dem ein Abschalungselement ohne Querkraftverstärkung verwendet wurde. Die Auswertung der Referenzversuche hat für die Stelle der Rissinitiierung eine Position im Bereich von 35 – 40 cm im Abstand zur Krafteinleitung ergeben. Die Positionierung des Abschalungselementes für den ersten Versuch ist deshalb auf den Abstand von 35 cm von der Krafteinleitung festgelegt worden. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Prüfkörper fälschlicherweise mit P 2.1 statt P 3.1 beschriftet ist. Dies gilt es insbesondere bei den Fotografien zu beachten.

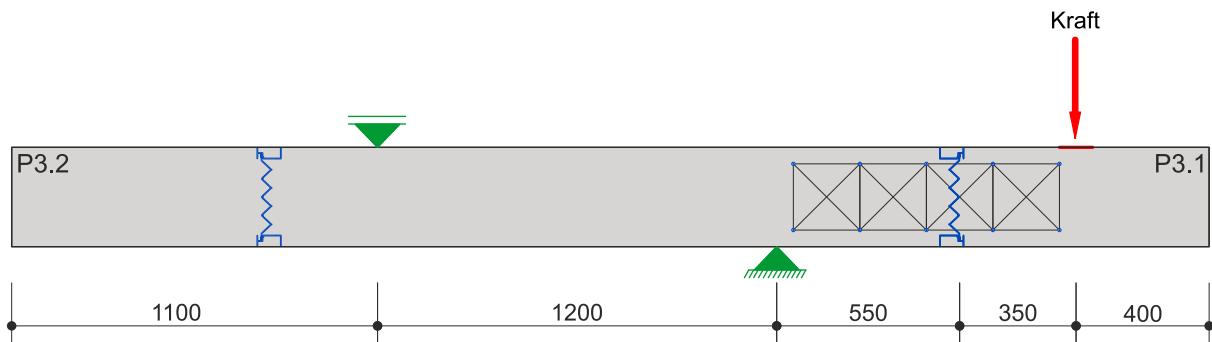


Bild 23: Positionierung des Prüfkörpers P 3.1 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Risse zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 3: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 40 cm von der Krafteinleitung entfernt.
- LS 4-5: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Zusätzlich bildet sich ein neuer Riss, der etwa 30 cm von der Krafteinleitung entfernt beginnt und quer durch das Abschalungselement entlang eines Nockens verläuft.
- LS 6: Entstehung eines Querkraftrisses, gefolgt von einem Versagen des Prüfkörpers. Der Prüfkörper versagt im Vergleich zu den durchbetonierten Prüfkörpern deutlich weniger schlagartig. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 289 kN.

Kraft [kN]

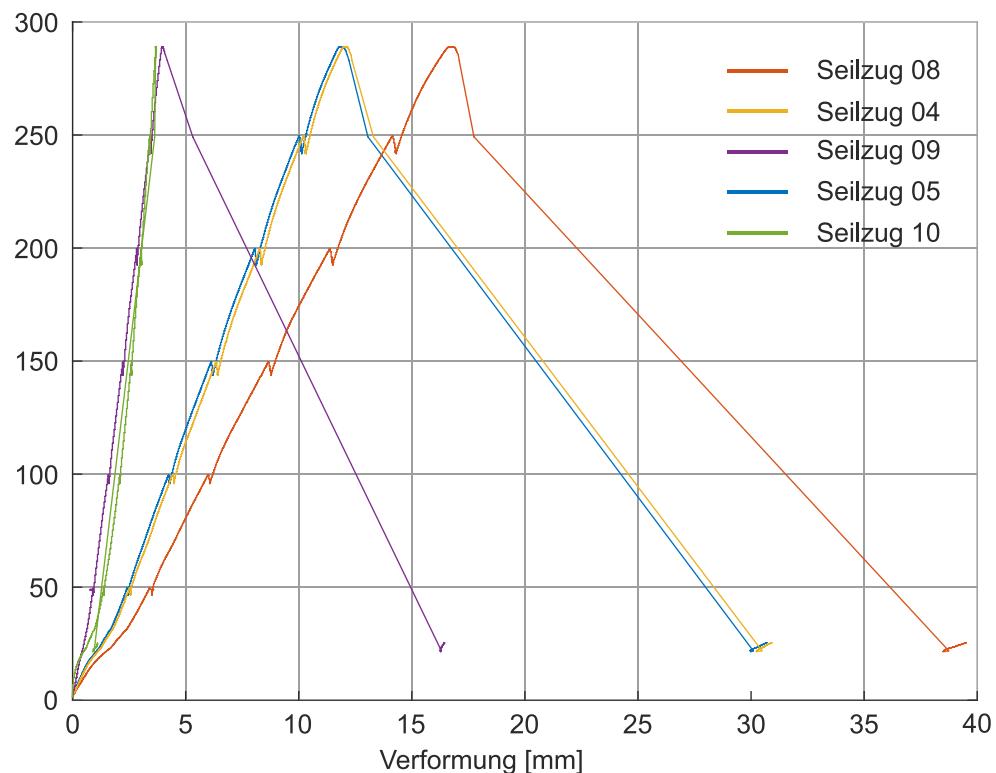


Bild 24: Prüfkörper P3.1: Kraft- Verformungsdiagramm.



Bild 25: Prüfkörper P 3.1: Querkraftriss nach Versuchsende.

## 9.4 Prüfkörper P 3.2

Der Prüfkörper P 3.2 war der vierte von insgesamt zehn Versuchen und der zweite, bei dem ein Abschalungselement ohne Querkraftverstärkung verwendet wurde. Die Positionierung des Abschalungselementes erfolgte 40 cm von der Krafteinleitung entfernt. Diese Position wurde nach Auswertung der Versuche P 1.1 und P 1.2 festgelegt. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Prüfkörper fälschlicherweise mit P 2.2 statt P 3.2 beschriftet ist. Dies gilt es insbesondere bei den Fotografien zu beachten.

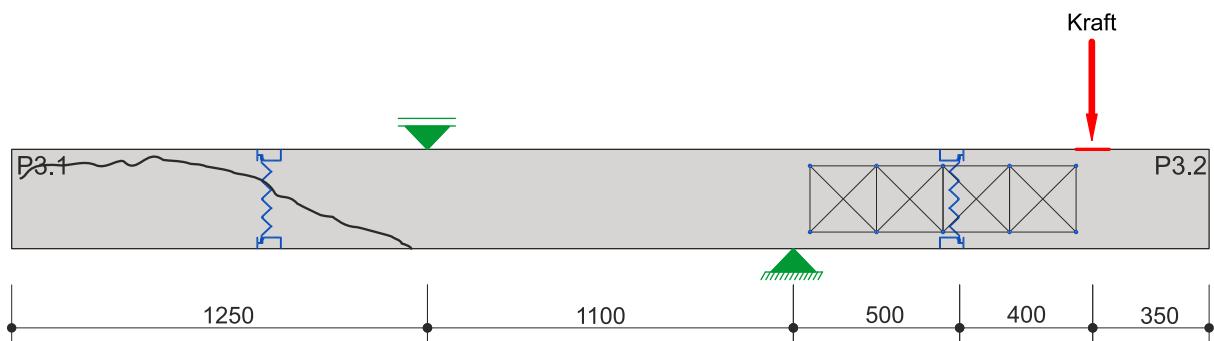


Bild 26: Positionierung des Prüfkörpers P 3.2 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Risse zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 3: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 30 cm von der Krafteinleitung entfernt.
- LS 4-5: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Zusätzlich bildet sich ein Riss entlang der Nocken im Abschalungselement.
- LS 6: Entstehung eines Querkraftrisses, gefolgt von einem Versagen des Prüfkörpers. Der Prüfkörper versagt im Vergleich zu den durchbetonierten Prüfkörpern deutlich weniger schlagartig. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 291 kN.

Kraft [kN]

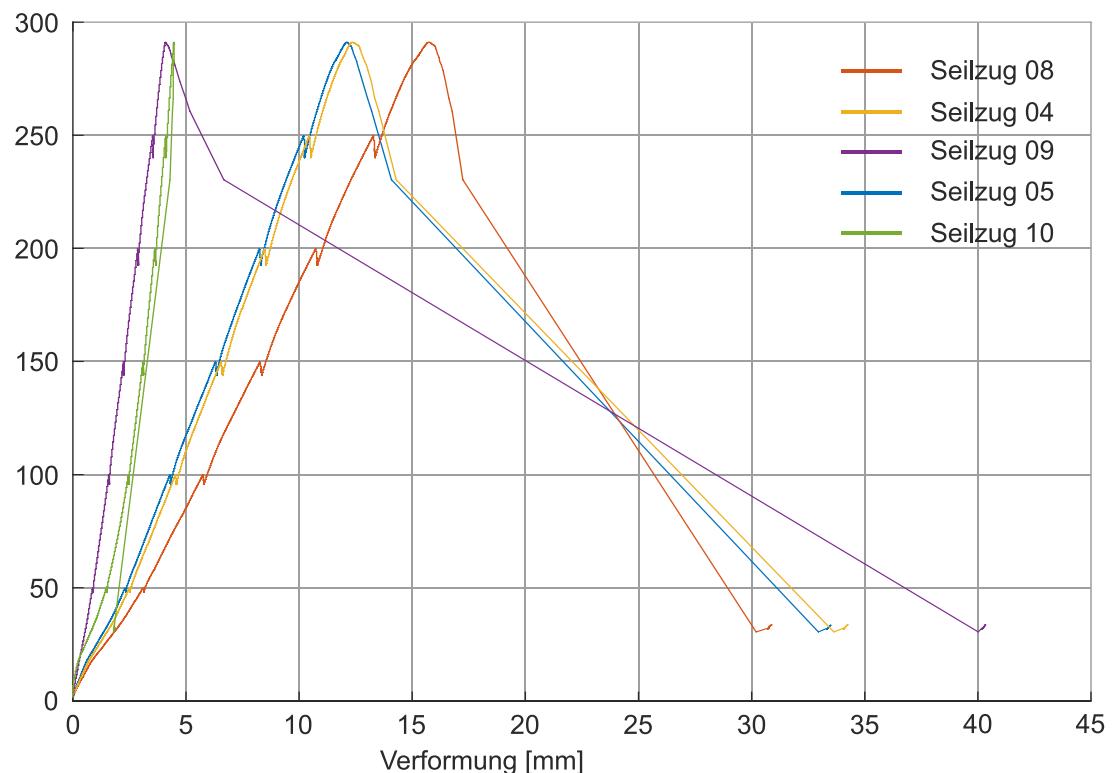


Bild 27: Prüfkörper P3.2: Kraft- Verformungsdiagramm.



Bild 28: Prüfkörper P 3.2: Querkraftriss nach Versuchsende.

## 9.5 Prüfkörper P 4.1

Der Prüfkörper P 4.1 war der fünfte von insgesamt zehn Versuchen und der dritte, bei dem ein Abschaltungselement ohne Querkraftverstärkung verwendet wurde. Die Positionierung des Abschaltungselementes erfolgte 37.5 cm von der Krafteinleitung entfernt. Diese Position wurde nach Auswertung der Versuche P 1.1 und P 1.2 festgelegt.

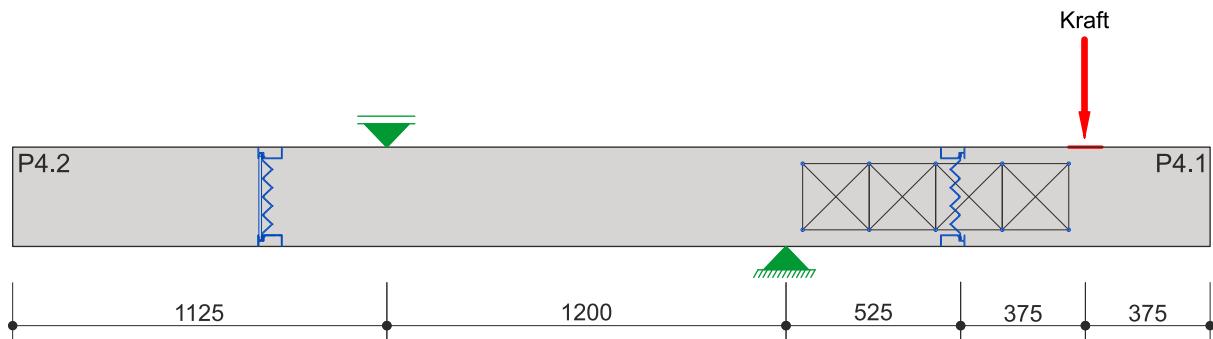


Bild 29: Positionierung des Prüfkörpers P 4.1 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Risse zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 3-4: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 40 cm von der Krafteinleitung entfernt.
- LS 5: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Zusätzlich bildet sich ein Riss quer durch das Abschaltungselement entlang eines Nocken.
- LS 6: Entstehung eines Querkrafrisses, gefolgt von einem Versagen des Prüfkörpers. Der Prüfkörper versagt im Vergleich zu den durchbetonierten Prüfkörpern deutlich weniger schlagartig. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 278 kN.

Kraft [kN]

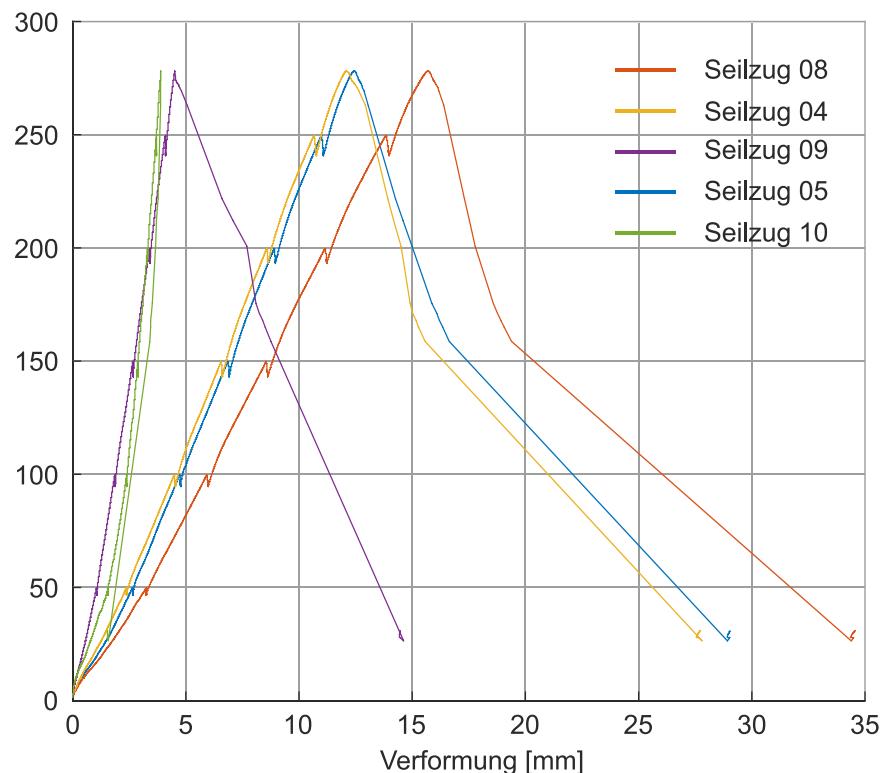


Bild 30: Prüfkörper P4.1: Kraft- Verformungsdiagramm.



Bild 31: Prüfkörper P 4.1: Querkraftriss nach Versuchsende.

## 9.6 Prüfkörper P 2.1

Der Prüfkörper P 2.1 war der sechste von insgesamt zehn Versuchen und war der dritte von vier durchbetonierten Prüfkörpern. Zusätzlich ist zu bemerken, dass der Prüfkörper fälschlicherweise mit P 1.3 statt P 2.1 beschriftet wurde.

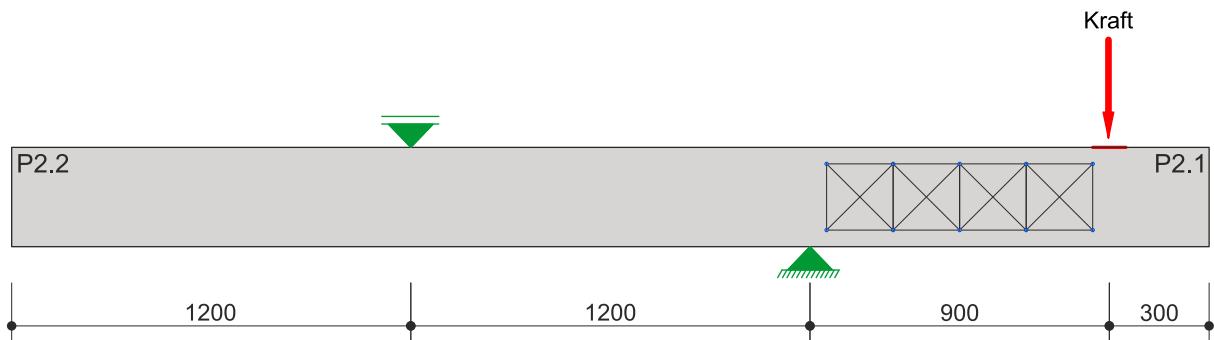


Bild 32: Positionierung des Prüfkörpers P 2.1 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:  
Es muss festgehalten werden, dass das negative Auflager aufgrund von Unebenheiten auf der Prüfkörperoberfläche nicht sauber auflag, was möglicherweise einen Einfluss auf das Versuchsergebnis hatte.

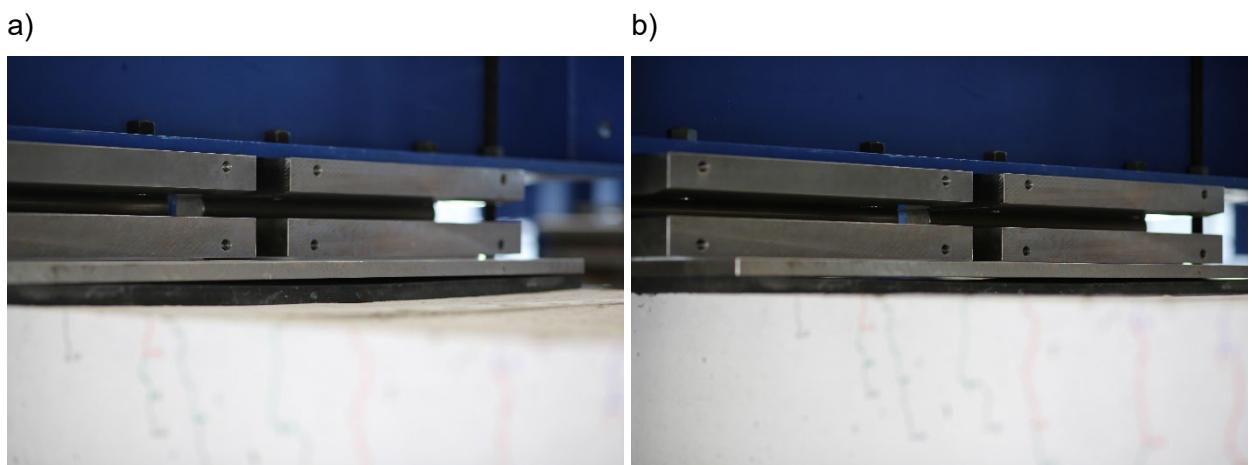


Bild 33: Prüfkörper P 2.1: Unebenheiten im Bereich des negativen Auflagers.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Riss e zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 3 – LS 5: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 25 cm von der Krafteinleitung entfernt.
- LS 5: Entstehung eines Querkraftrisses gefolgt von einem Schlagartigen Versagen des Prüfkörpers. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 279 kN.

Kraft [kN]

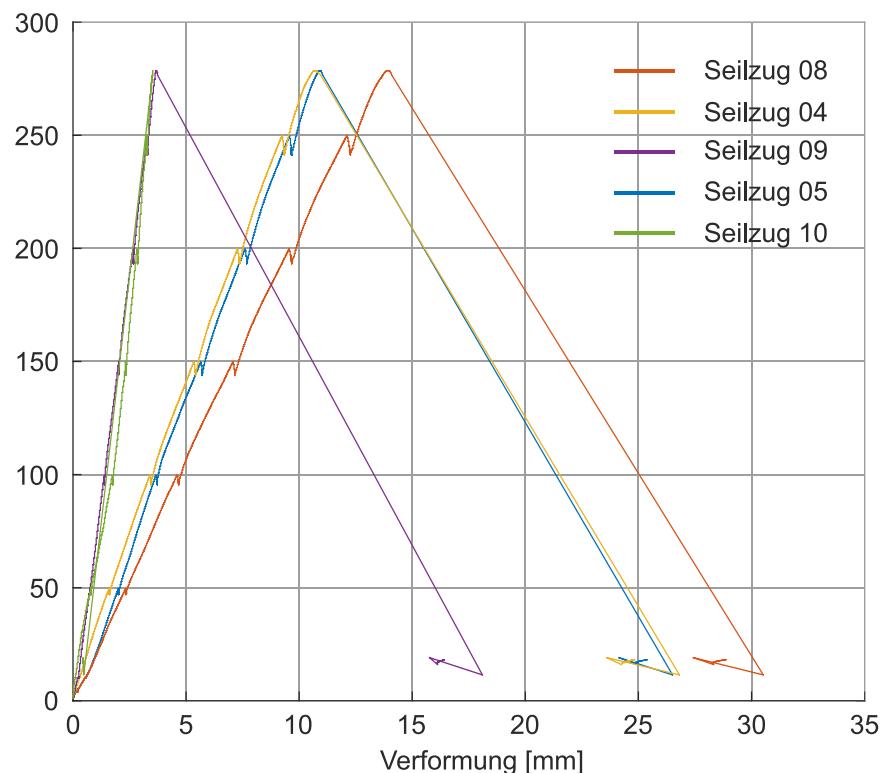


Bild 34: Prüfkörper P2.1: Kraft- Verformungsdiagramm.

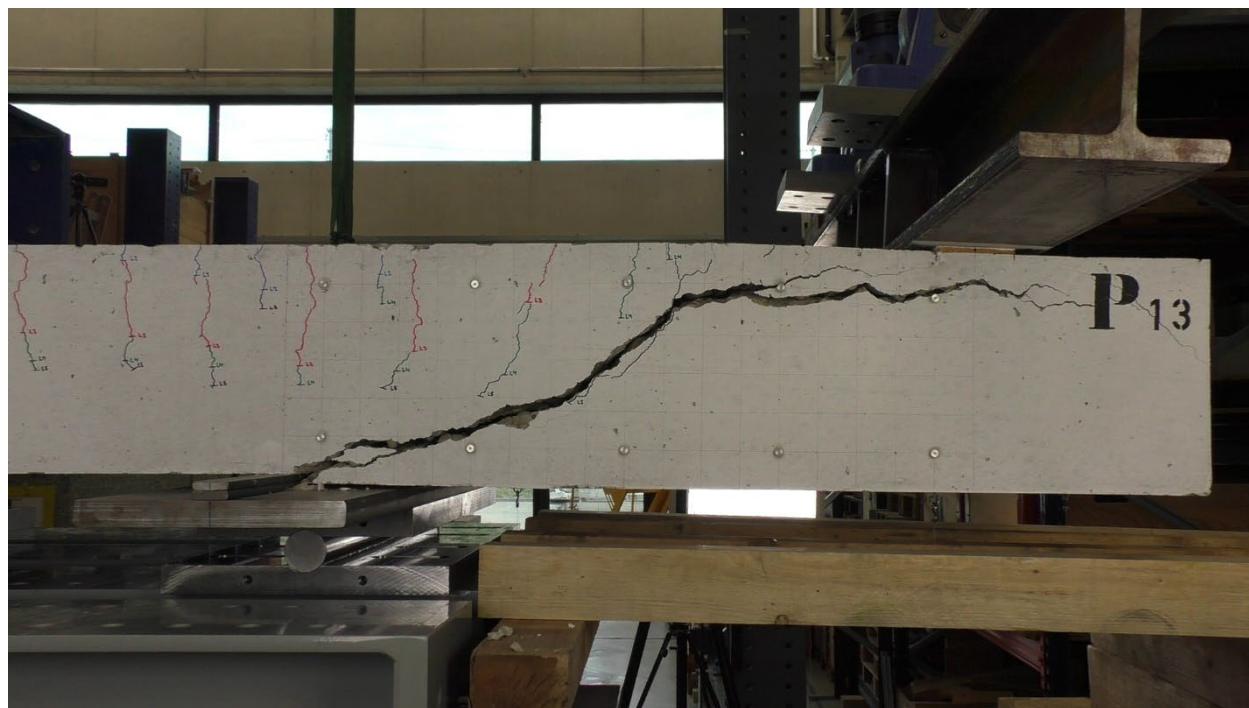


Bild 35: Prüfkörper P 2.1: Querkraftriss nach Versuchsende.

## 9.7 Prüfkörper P 2.2

Der Prüfkörper P 2.2 war der siebte von insgesamt zehn Versuchen und war der vierte von vier durchbetonierten Prüfkörpern. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Prüfkörper fälschlicherweise mit P 1.4 statt P 2.2 beschriftet ist.

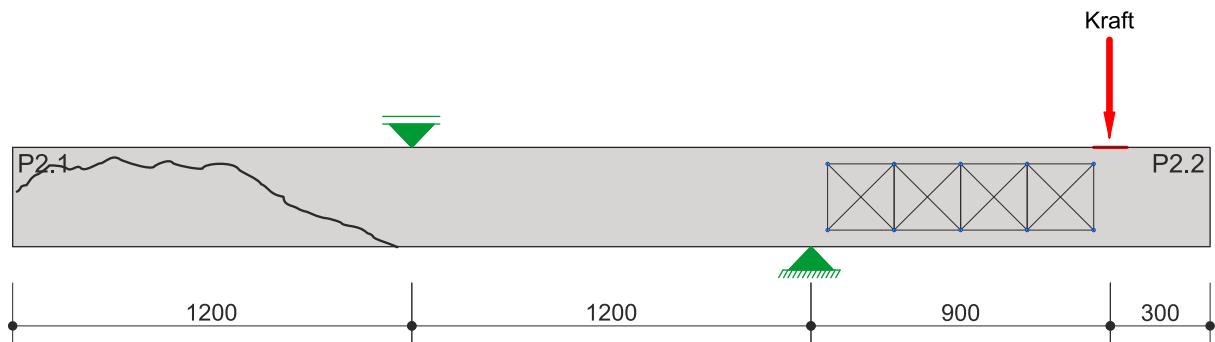


Bild 36: Positionierung des Prüfkörpers P 2.2 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Risse zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 3 – LS 6: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 30 cm von der Krafteinleitung entfernt.
- LS 7: Entstehung eines Querkraftrisses gefolgt von einem Schlagartigen Versagen des Prüfkörpers. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 329 kN.

Kraft [kN]

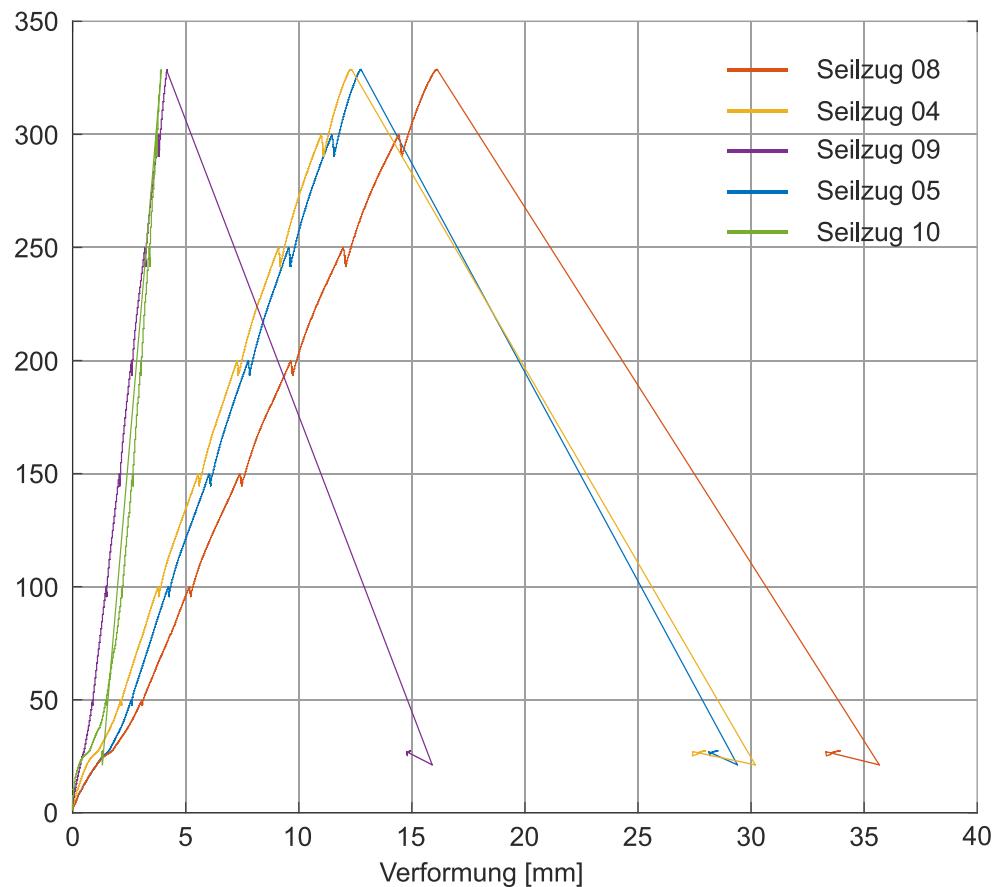


Bild 37: Prüfkörper P2.2: Kraft- Verformungsdiagramm.

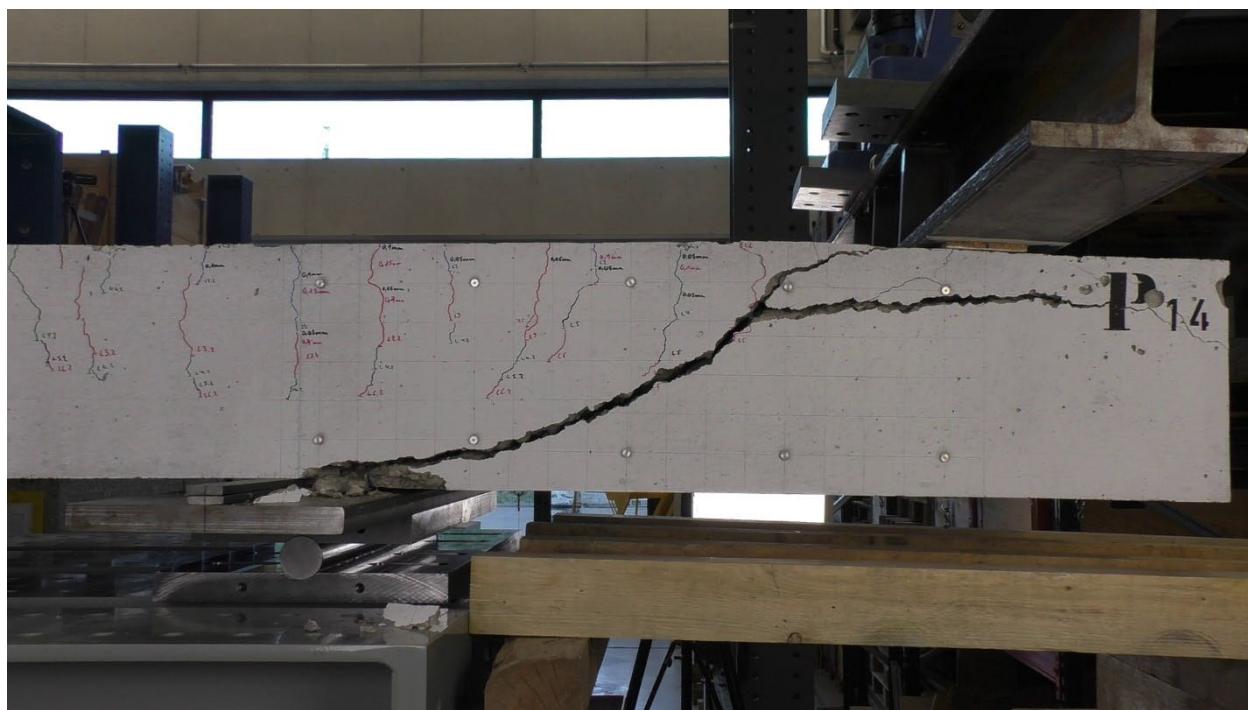


Bild 38: Prüfkörper P 2.2: Querkraftriss nach Versuchsende

## 9.8 Prüfkörper P 4.2

Der Prüfkörper P 4.2 war der achte von insgesamt zehn Versuchen und der erste, bei dem ein Abschaltungselement mit Querkraftverstärkung verwendet wurde. Die Positionierung des Abschaltungselementes erfolgte 35 cm von der Krafteinleitung entfernt.

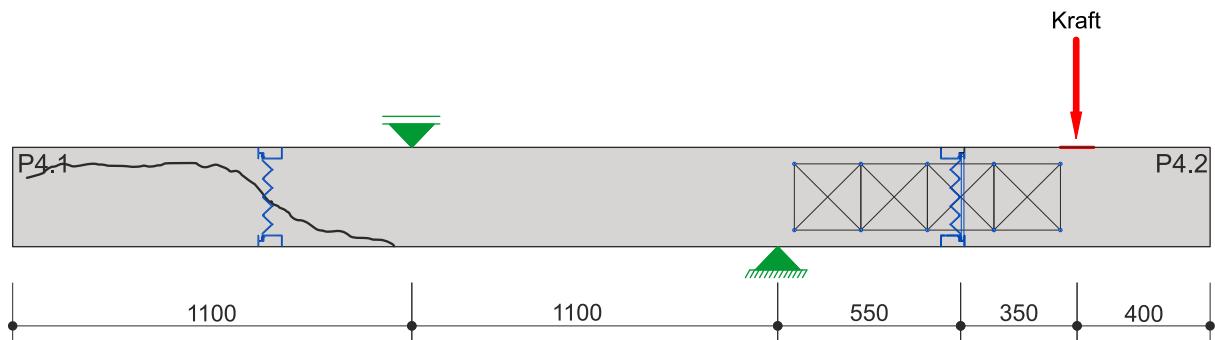


Bild 39: Positionierung des Prüfkörpers P 4.2 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 2 – LS 7: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 15 cm von der Krafteinleitung entfernt.
- LS 8: Entstehung eines Schubrisses, der sich von der Krafteinleitung quer bis zum positiven Auflager erstreckt. Darüber hinaus bilden sich weitere neue kleinere Risse. Schubriss öffnet sich durch das Abschaltungselement, siehe erste rote Markierung in Bild 40.
- LS 9: Die kleineren Risse aus LS 8 breiten sich weiter aus. Direkt beim Abschaltungselement entsteht ein neuer Riss, der in Richtung des positiven Auflagers verläuft. Zweiter Schubriss öffnet sich ausserhalb des Abschaltungselementes, siehe zweite rote Markierung in Bild 40.
- LS 10: Der Riss aus LS 9 breitet sich weiter in Richtung des Auflagers aus, bis es zum Versagen des Prüfkörpers kommt. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 469 kN.

Kraft [kN]

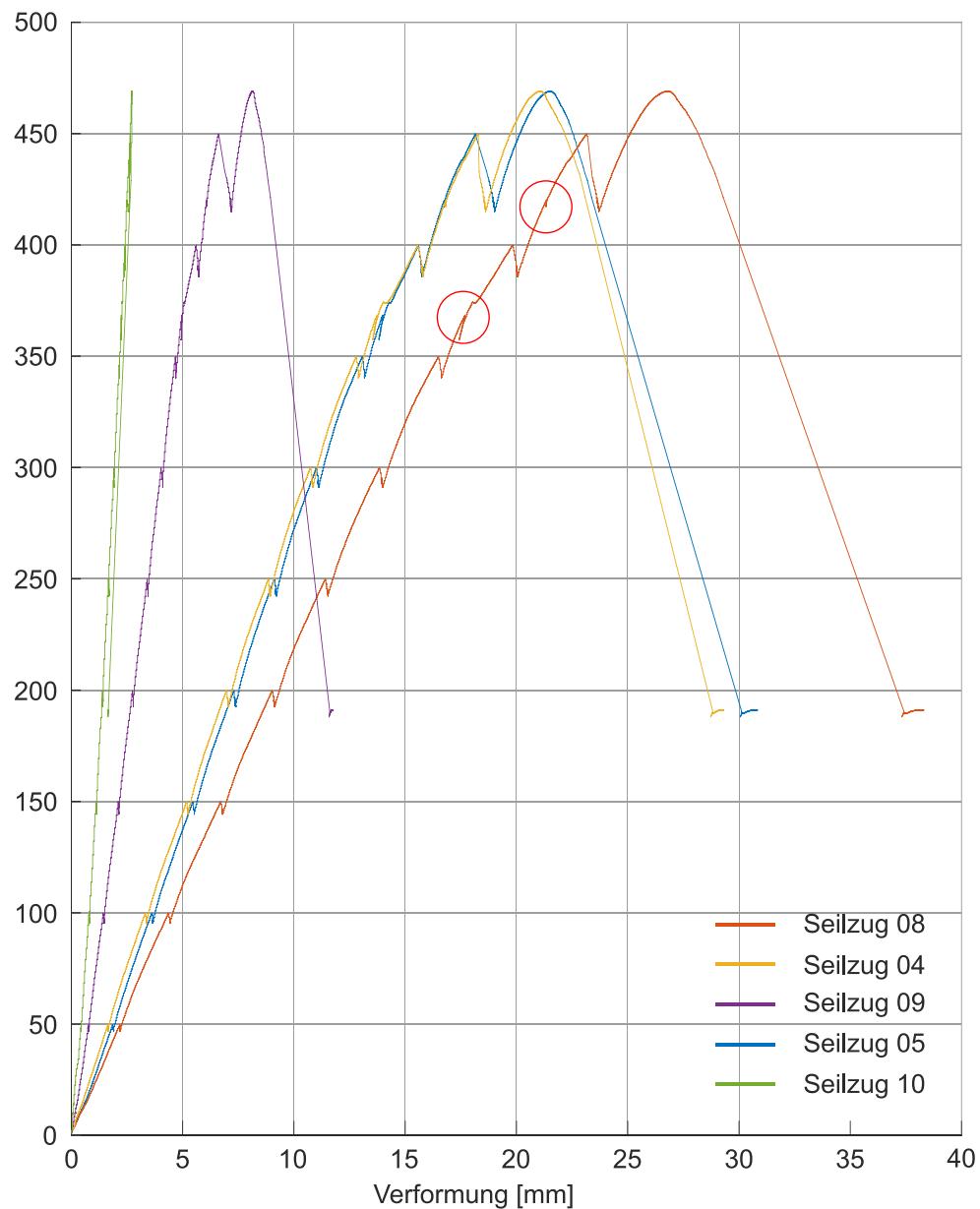


Bild 40: Prüfkörper P4.2: Kraft- Verformungsdiagramm.

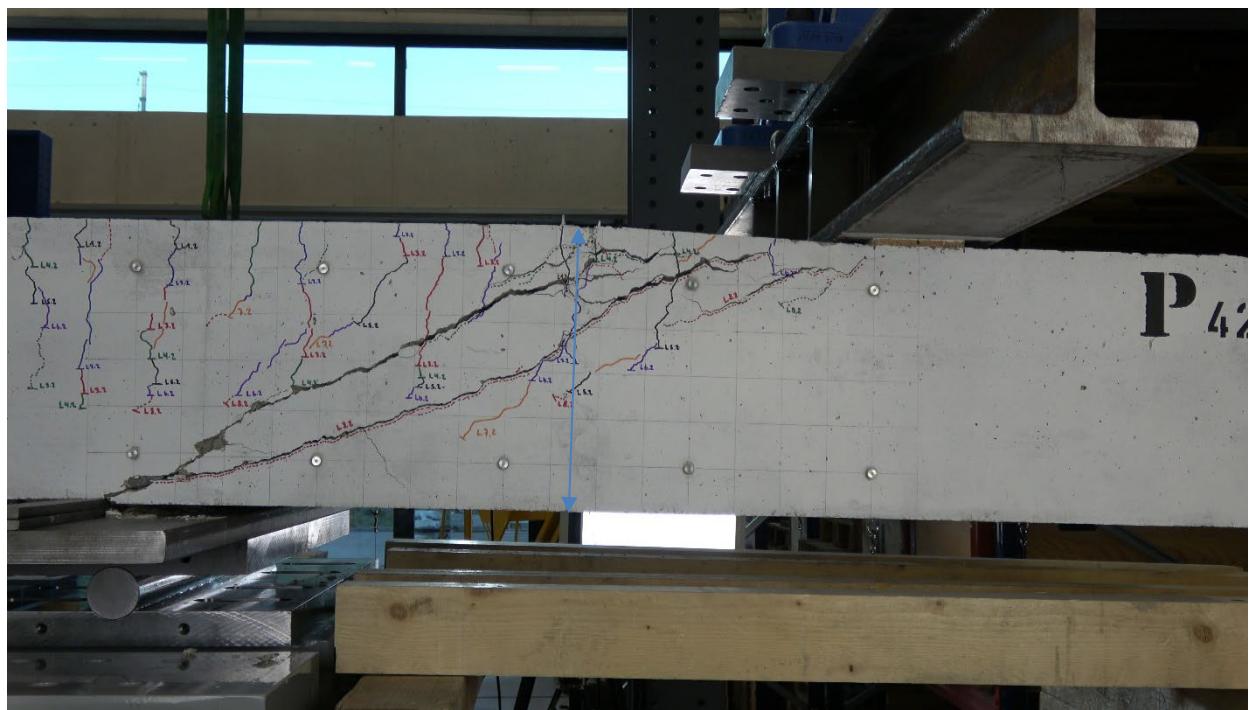


Bild 41: Prüfkörper P 4.2: Querkraftriss nach Versuchsende.

## 9.9 Prüfkörper P 5.1

Der Prüfkörper P 5.1 war der neunte von insgesamt zehn Versuchen und der zweite, bei dem ein Abschalungselement mit Querkraftverstärkung verwendet wurde. Die Positionierung des Abschalungselementes erfolgte 40 cm von der Krafteinleitung entfernt.

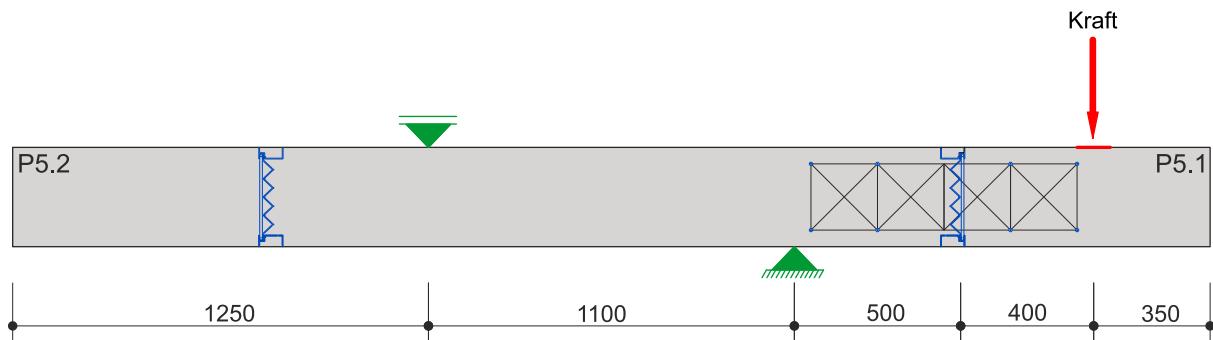


Bild 42: Positionierung des Prüfkörpers P 5.1 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Risse zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 2 – LS 6: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 35 cm von der Krafteinleitung entfernt. In LS 4 bildete sich ein Riss, der quer durch das Abschalungselement verlief. Schubriss öffnet sich ausserhalb des Abschaltungselementes, siehe erste rote Markierung in Bild 43Bild 40.
- LS 7: Direkt beim Abschalungselement entsteht ein Schubriss, der quer in Richtung des positiven Auflagers verläuft.
- LS 8: Der Riss aus LS 7 öffnet sich weiter, bis es zum Versagen des Prüfkörpers kommt. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 374 kN.

Kraft [kN]

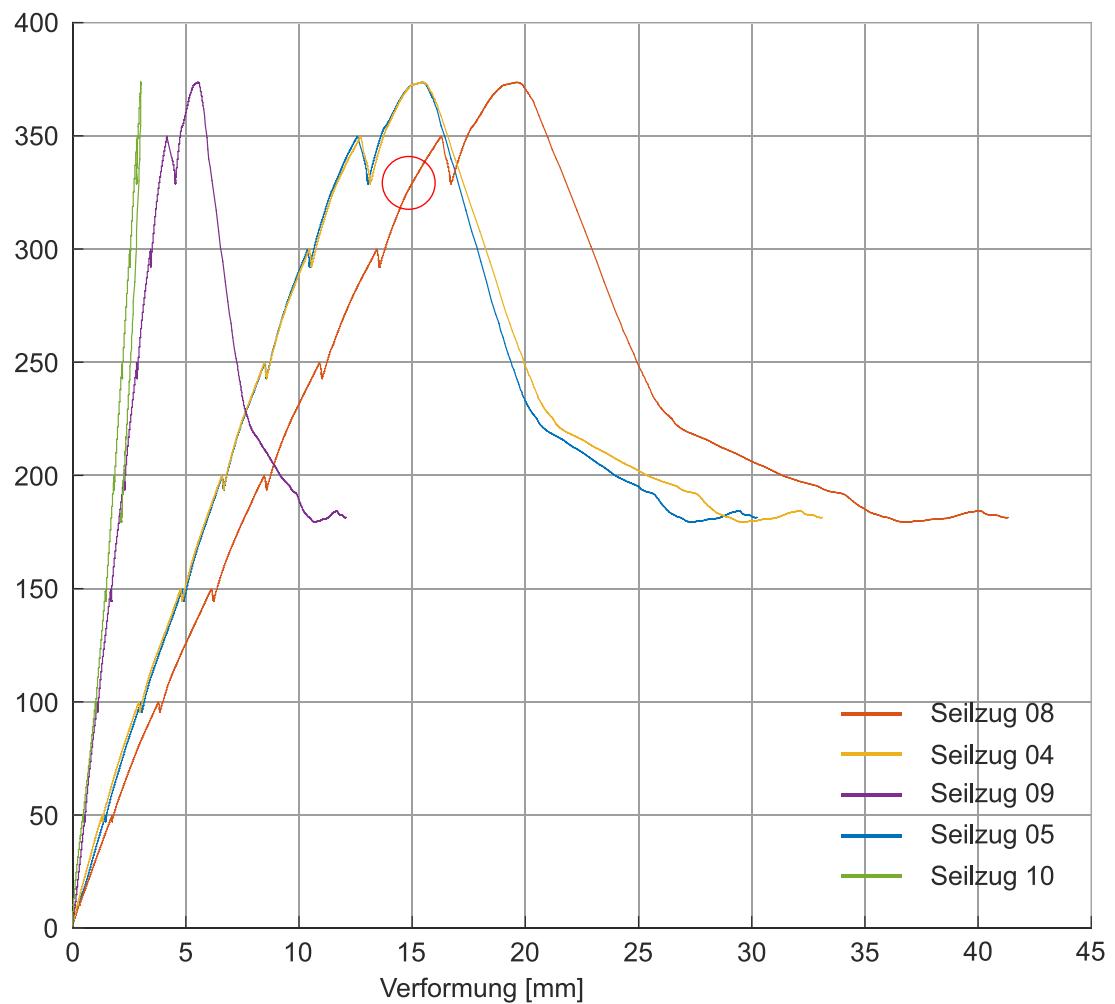


Bild 43: Prüfkörper P5.1: Kraft- Verformungsdiagramm.

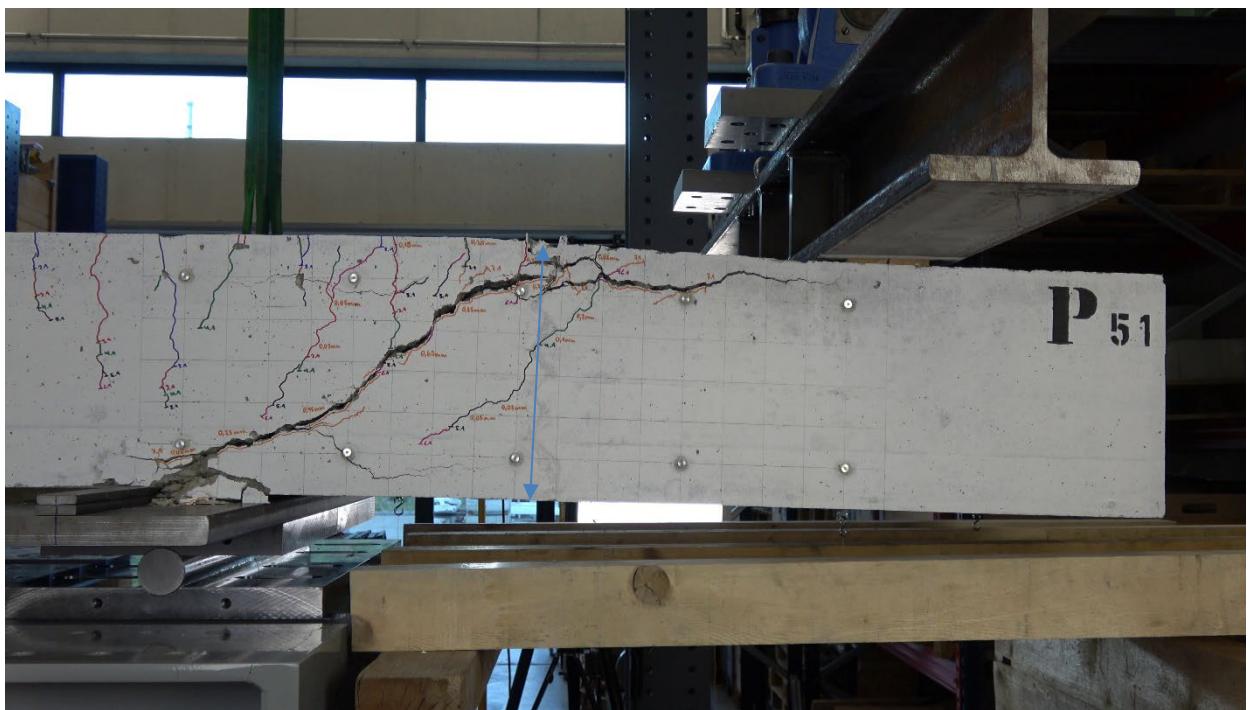


Bild 44: Prüfkörper P 5.1: Querkraftriss nach Versuchsende.

## 9.10 Prüfkörper P 5.2

Der Prüfkörper P 5.1 war der zehnte von insgesamt zehn Versuchen und der dritte, bei dem ein Abschalungselement mit Querkraftverstärkung verwendet wurde. Die Positionierung des Abschalungselementes erfolgte 37.5 cm von der Krafteinleitung entfernt.

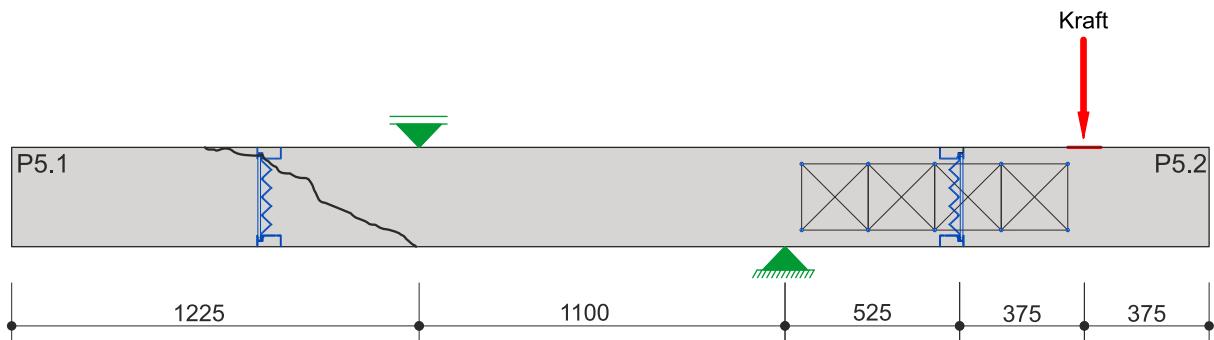


Bild 45: Positionierung des Prüfkörpers P 5.2 im Versuchsstand vor dem Versuch.

Während des Versuches konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- LS 1: Beim Erreichen der Laststufe 1 waren keine Risse zu erkennen.
- LS 2: Erste erkennbare Biegerisse im Bereich des positiven Auflagers.
- LS 2 – LS 6: Die bestehenden Biegerisse wuchsen schräg Richtung Auflager weiter. Dazu kamen neue Biegerisse bis ca. 20 cm von der Krafteinleitung entfernt. In LS 6 bildete sich ein Riss, der quer durch das Abschalungselement verlief.
- LS 7: Direkt beim Abschalungselement entsteht ein Schubriss, der quer in Richtung des positiven Auflagers verläuft. Schubriss öffnet sich weiter, während die Last gehalten wird. Schubriss öffnet sich leicht, siehe erste rote Markierung in Bild 46. Nach Erreichen der Laststufe: Schubriss öffnet sich weiter während die Last gehalten wird, siehe zweite rote Markierung in Bild 46.
- LS 8: Der Riss aus LS 7 breitete sich etwas weiter aus. Es entstehen weitere kleine Risse.
- LS 9: Der Riss aus LS 7 öffnet sich weiter, bis es zum Versagen des Prüfkörpers kommt. Kurz vor dem Versagen erreichte der Prüfkörper eine Höchstlast von 430 kN.

Kraft [kN]

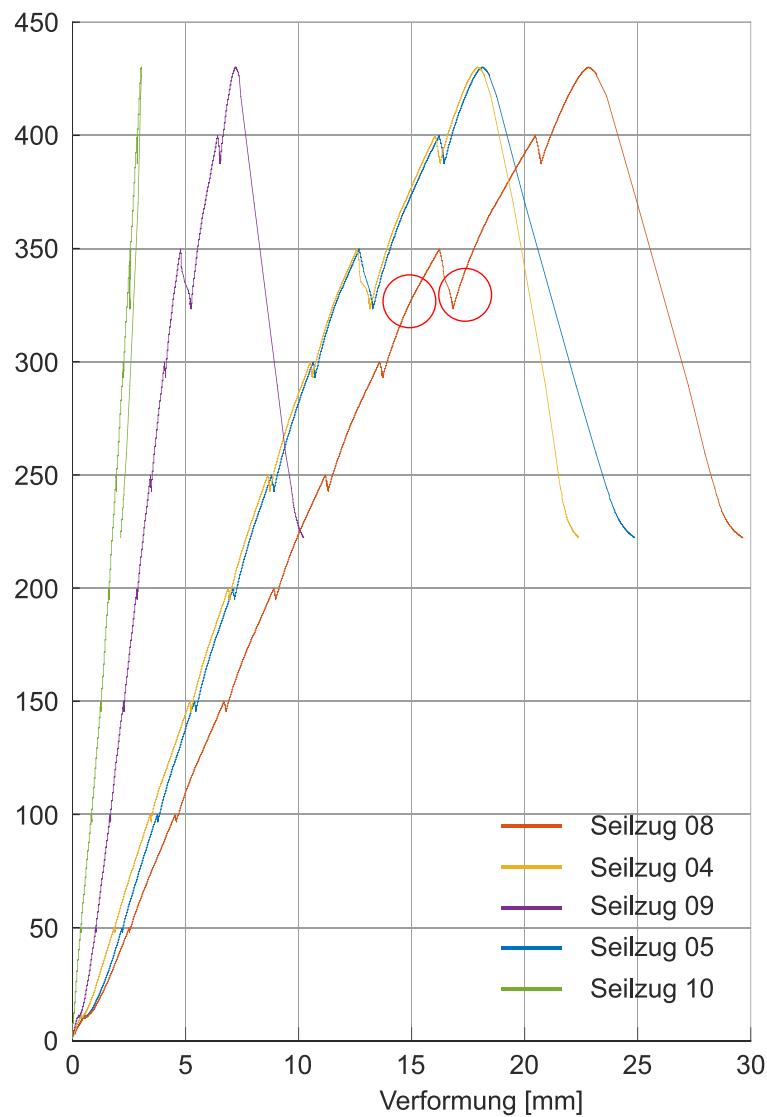


Bild 46: Prüfkörper P5.2: Kraft- Verformungsdiagramm.

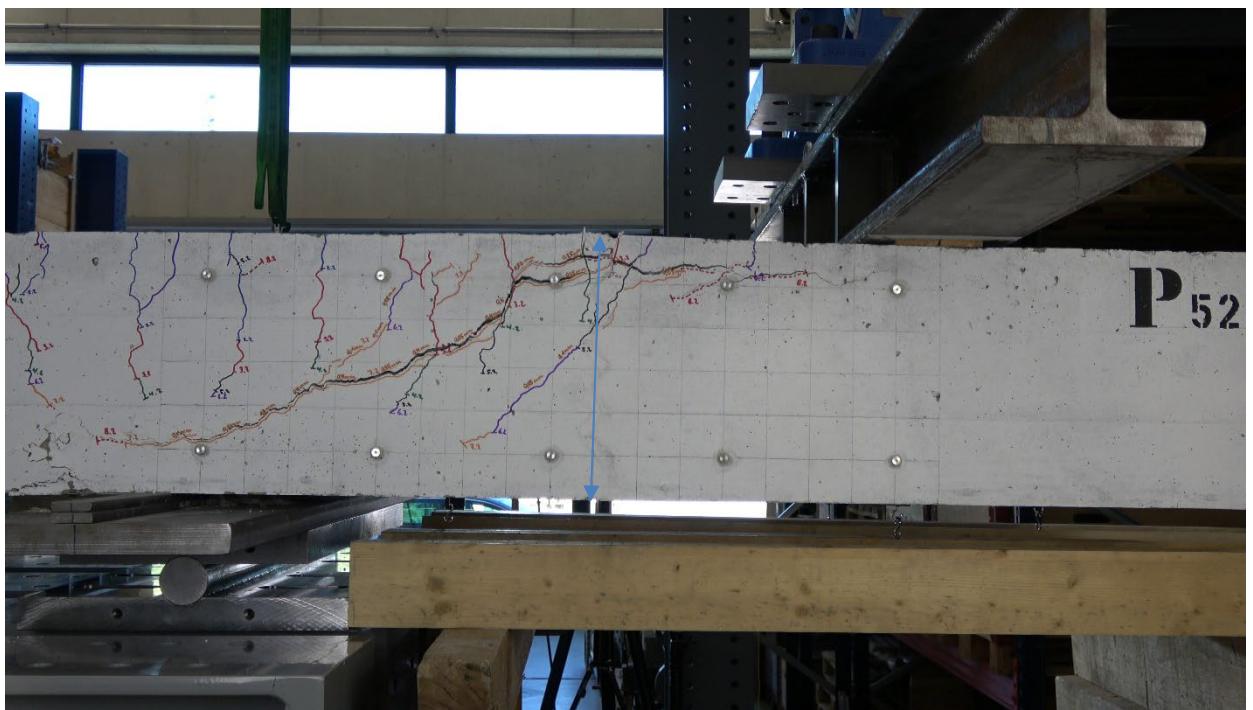


Bild 47: Prüfkörper P 5.2: Querkraftriss nach Versuchsende.

## 10 Zusammenfassung

### 10.1 Vergleich der Bruchlasten

Bild 48 zeigt die Zusammenfassung der Bruchlasten aller Prüfkörper in chronologischer Reihenfolge. In Rot sind die Resultate der durchbetonierten Prüfkörper als Referenzwerte dargestellt. Der aus den Versuchen P 1.1, P 1.2 und P 2.2 rechnerisch bestimmte Mittelwert von 330 kN zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Mittelwert von 328 kN des prognostizierten Erwartungsbereiches von 316 – 340 kN. Dabei ist das Resultat des Prüfkörpers P 2.1 nicht in die Berechnung des Mittelwerts einbezogen worden. Grund dafür ist die während des Versuches festgestellte, ungünstige Lagerung im Bereich des negativen Auflagers, was die Höchstlast bei P 2.1 deutlich niedriger ausfallen liess (Stichwort: Eigenspannungen).

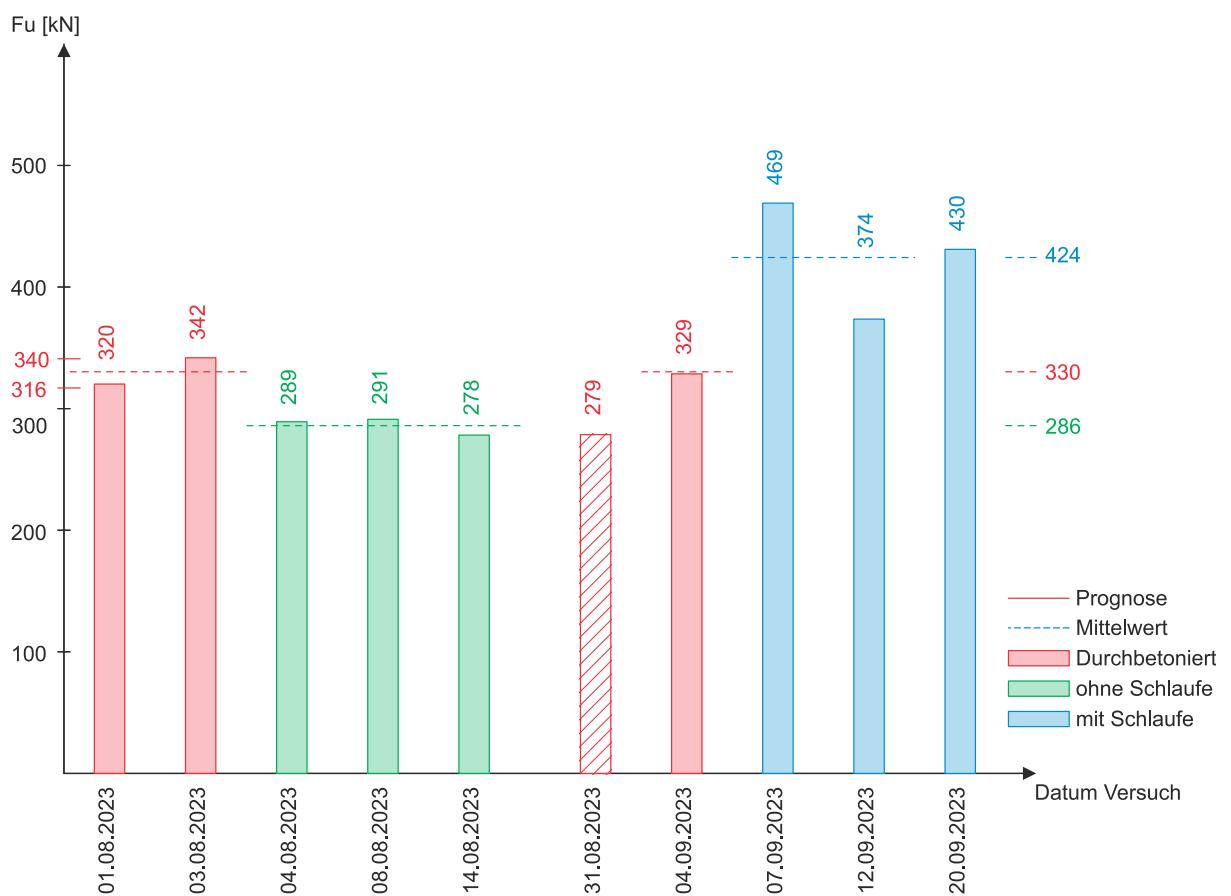


Bild 48: Übersicht der Höchstlast der einzelnen Prüfkörper.

Die zweite Gruppe bildet die in Grün dargestellten Bruchlasten der Prüfkörper dar, in welchen ein Abschalungselement ohne Querkraftbewehrung verbaut worden ist. Die Bruchlasten der drei Versuche mit einem Mittelwert von 286 kN fallen im Vergleich zu den Referenzwerten niedriger aus; das Ergebnis entspricht der Erwartung folgend aus der Prognose in Kapitel 7.2.

Die dritte Gruppe fasst die in Blau dargestellten Resultate der Prüfkörpern zusammen, welche ein Abschalungselement inklusive Querkraftverstärkung vorweisen. Die im Vergleich zu den Referenzversuche deutlich höher ausfallenden Bruchlasten mit einem Mittelwert von 424 kN bestätigen unter Berücksichtigung der in den Versuchen festgestellten Versagensmechanismen ausserhalb des Abschalungsbereiche (Ausbilden eines zweiten Querkraftrisses) vollumfänglich die Wirksamkeit der Querkraftverstärkung bzw. Querkraftsicherung. Weiter zeigt sich, dass die Rissverzahnung effektiv einen wesentlichen Beitrag liefern muss. Mit dem in Kapitel 6.1 für die Schlaufenbewehrung ermittelten Werkstoffgrössen lässt sich für die zehn Vertikaleisen der Schlaufenbewehrung eine Bruchkraft von 322 kN berechnen; die Differenz zur Bruchlast von 424 kN hat durch die Rissverzahnung zu erfolgen.

## 10.2 Schlussfolgerung

Zusammenfassend zeigen die Versuche und Untersuchungen an Betonplatten mit einer Höhe von 30 cm, dass für durch die Querkraftverstärkung des Abschalungselementes mit einer Wellenbewehrung kein verminderter Querkraftwiderstand bei der vorliegenden Betonqualität entsteht. Bei diesen Versuchen ist der für das Bruchversagen verantwortliche Querkraftriss immer ausserhalb des Abschalungselementes aufgetreten, was sich in einer erhöhten Querkrafttragfähigkeit bemerkbar macht. Die übliche Erstrissbildung wird durch die Querkraftbewehrung arrestiert. Dies zeigt, dass der Querkrafttragwiderstand in diesem Bereich durch das Zusammenspiel von Rissverzahnung und Wellenbewehrung gesteigert werden kann.

Mit dem Abschalungselement, welches ohne Querkraftverstärkung verbaut wurde, konnte der Referenzwert der durchbetonierten Versuche nicht ganz erreicht werden, was die Relevanz der Querkraftverstärkung im Abschalungselement zusätzlich untermauert.

Insgesamt zeigt die Machbarkeitsstudie, dass das entwickelte Abschalungselement inklusive Schlaufenbewehrung eine vielversprechende Lösung für Arbeitsfugen in Platten ohne Querkraftbewehrung durch eine nicht vorhandene Minderung des Querkraftwiderstandes in der Fuge darstellt. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Ergebnisse nur für Betonplatten mit einer Höhe von 30 cm und dem untersuchten Beton gelten. Für andere Plattenstärken oder Betone mit abweichenden Eigenschaften sind weitere Untersuchungen erforderlich.

## Literaturverzeichnis

- [1] AASHTO LRFD, Bridge design specifications and commentary, 5. Ausgabe, 2010, 301 Seiten.
- [2] Amer, E.; Masterarbeit, Vergleich unterschiedlicher Modellvorstellungen zum Querkrafttragverhalten von Stahlbetonbauteilen, 2024, 88 Seiten.
- [3] Amer, E.; Bachelorarbeit, Schubtragfähigkeit von Beton, 2021, 90 Seiten.
- [4] Amer, E.; Vertiefungsarbeit 2, Machbarkeitsstudie zur Entwicklung eines Abschalungselements ohne Querkrafttragverlust in Platten ohne Querkraftbewehrung, 2023, 56 Seiten.
- [5] Bentz, E. C., Vecchio, F. J. und Collins, M. P., ACI Structural Journal, Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements, 2006, Bd. 103, Seiten 2235-2350.
- [6] CEB-fib, fib Model Code for Concrete Structures, 2010, 436 Seiten.
- [7] CSA Committee, Design of concrete structures, A23.3-19, 2019, 301 Seiten.
- [8] Collins, M.P. und Vecchio, F.J.; ACI Structural Journal, The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, 1986, Bd. 83, pp., Nr. 2, Seiten 219-231.
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; Heft 525 – Erläuterungen zu DIN 1045-1; 2010; 162 Seiten.
- [10] Deutsches Institut für Normung, DIN 1045-1, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton -Teil 1: Bemessung und Konstruktion; 2001; 148 Seiten.
- [11] Deutsches Institut für Normung, DIN 1045-1, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton -Teil 1: Bemessung und Konstruktion; 2008; 183 Seiten.
- [12] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010; 2011; 241 Seiten.
- [13] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1992-1-1/NA, National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau(Gilt in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1 (2011-01)); 2011; 201 Seiten.
- [14] Deutsches Institut für Normung, DIN 1045-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010; 2011; 241 Seiten.
- [15] Europäische Norm, Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken und in Bauwerksteilen; Deutsche Fassung DIN EN 13791:2020-02; 2020, 48 Seiten.

- [16] Muttoni, A.; Beton- und Stahlbetonbau, Schubfestigkeit und Durchstanzen ohne Querkraftbewehrung, 2003, Bd. 2, Nr. 98, Seiten 74-84.
- [17] Muttoni, A. und Ruiz, M.F., ACI Structural Journal, Shear Strength of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width, 2008, Bd. 105, Seiten 163-172.
- [18] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA; SIA-Norm 262 – Betonbau; 2013; 102 Seiten.
- [19] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA; SIA-Norm 262 – Betonbau; 2003; 90 Seiten.
- [20] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA; SIA-Norm 162 – Betonbauten (Teilrevision der Ausgabe 1989); 1993; 86 Seiten.
- [21] Walraven, J.C., G; ASCE, Fundamental Analysis of Aggregate Interlock, 1981, Nr. 107, Seiten 2256-2270.
- [22] Zilch, K und Fingerloos, F; Bauingenieur, Schubkraftübertragung in Verbundfugen nach DIN 1045-1:2008, 2008, Bd. 83, Nr. 5, Seiten 212-219.
- [23] Zilch, K und Zehetmaier, G; Bemessung im konstruktiven Betonbau, 2010, 627 Seiten.