



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

# **Experimentelle Untersuchung der Spannungsamplitude der gebogener Rahmeneckbewehrungen**

Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK)  
Professur für Massiv- und Brückenbau  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)

Version 1.0  
Februar 2026, Zürich

# 1 Projektumfang

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden grossmassstäbliche Rahmeneckversuche durchgeführt, bei denen der Dehnungs- und Spannungsverlauf entlang der abgebogenen Rahmeneckbewehrung mittels kontinuierlicher faseroptischer Dehnungsmessungen (DFOS) experimentell erfasst wird. Die Versuchsreihe umfasst vier Prüfkörper mit insgesamt acht Rahmenecken, die sich hinsichtlich Geometrie und Bewehrungsanordnung unterscheiden und somit eine systematische Untersuchung verschiedener Rahmeneckkonfigurationen ermöglichen. Die Varianten wurden auf Grundlage vorhandener Erfahrungswerte festgelegt. Entsprechend der im Projektantrag beschriebenen Variantenbildung werden unter anderem Biegerollendurchmesser, Querkzugbewehrung im Abbiegungsbereich, die Ausbildung mit bzw. ohne Vouten, mit bzw. Stabdurchmesser variiert.

Sämtliche Prüfkörper werden im Large Universal Shell Element Tester (LUSET) an der ETH Zürich zyklisch geprüft, um eine experimentelle Datengrundlage zum Spannungsverlauf in der abgebogenen Rahmeneckbewehrung zu schaffen. Die DFOS-Erfassung erfolgt dabei hochaufgelöst entlang der Bewehrungsstäbe; aus den gemessenen Stahldehnungen werden über die Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Bewehrungsstäbe die Stahlspannungen entlang der gebogenen Rahmeneckbewehrung abgeleitet. Zur Steigerung des Erkenntnisgewinns ist zudem vorgesehen, die Versuchskörper mit ergänzender Messtechnik auszurüsten, insbesondere LVDTs sowie digitale 3D-Bildkorrelationssysteme (DIC), sodass das Trag- und Verformungs-verhalten detailliert erfasst und zur Validierung mechanischer Modelle genutzt werden kann.

**Abgrenzung:** Der vorliegende Bericht dokumentiert den ersten Versuch an Prüfkörper 1 mit Fokus auf Prüfkörperherstellung, Instrumentierung, Versuchsaufbau und Belastungsprogramm sowie die Funktionsprüfung der Messketten. Eine vollständige Datenauswertung (z. B. detaillierte Bestimmung von Spannungsamplitudenverläufen, rissmechanische Auswertung aus DIC, Vergleich mit mechanischen Modellen und systematische Variantenvergleiche) ist nicht Bestandteil dieses Berichts und erfolgt in nachgelagerten Auswertungsschritten innerhalb des Gesamtprojekts.

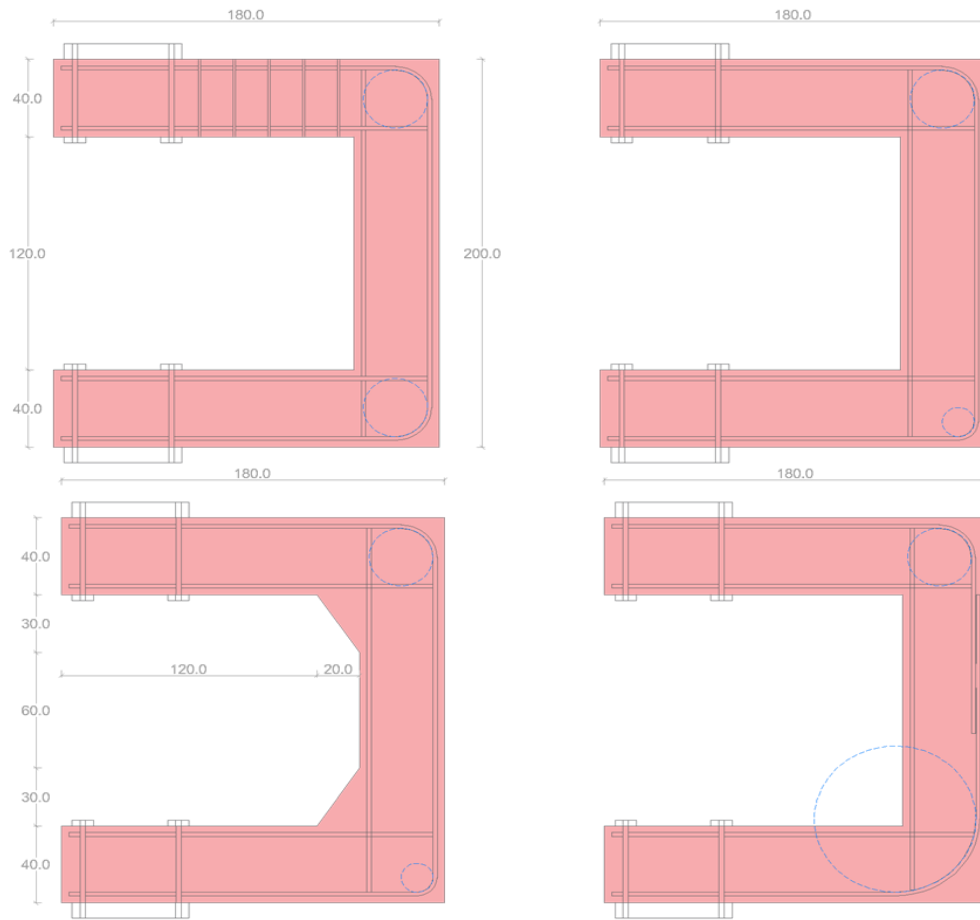


Abb. 1: Vier Prüfkörper

## 2 Prüfkörper 1

Der Prüfkörper besteht aus Rahmenstäben (Riegel/Stütze), deren Abmessungen Abb. 2: Geometrie (2D), Bewehrungslayout dargestellt sind.

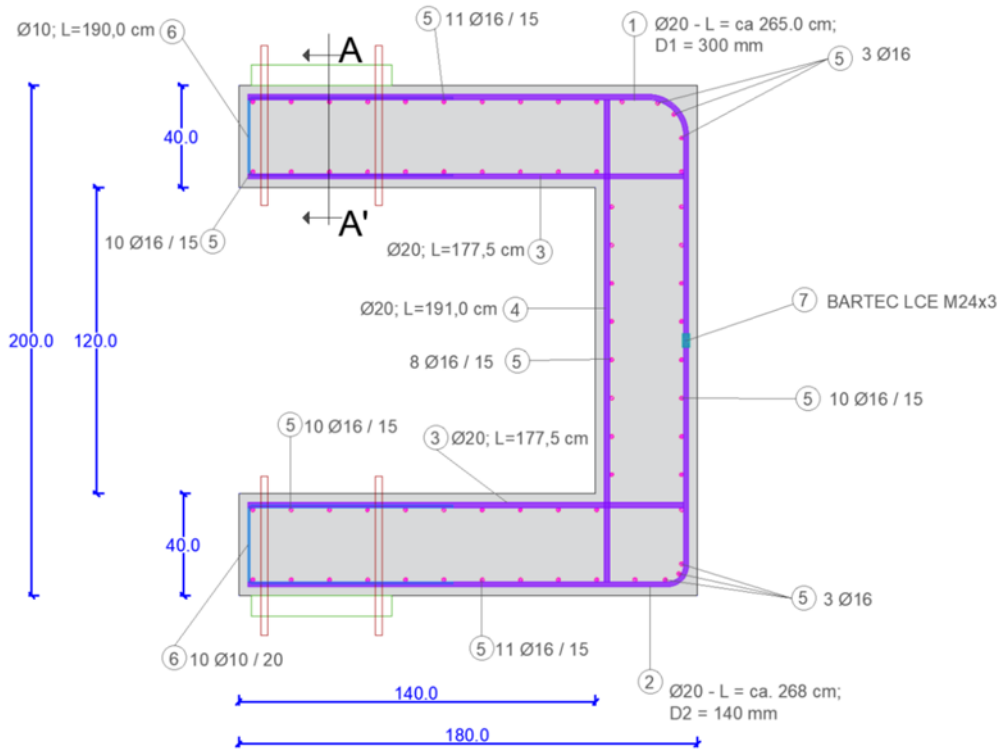


Abb. 2: Prüfkörper 1 - Abmessungen

### 2.1 Herstellung

Die Herstellung von Prüfkörper 1 erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner DSE Systems. DSE Systems übernahm die Erstellung der Schalung und die Betonage des Prüfkörpers. Als projektbegleitender Partner bringt DSE Systems ausgewiesene Erfahrung im Bereich Betonbau und in der praktischen Umsetzung komplexer Stahlbetonbauteile ein, wodurch eine qualitativ hochwertige und reproduzierbare Ausführung des Prüfkörpers sichergestellt wurde.

Der Herstellprozess umfasste im Wesentlichen:

- die Anfertigung und Montage der Schalung gemäss den projektseitigen Vorgaben,
- den Zusammenbau und Einbau des Bewehrungskorbs inklusive der Rahmeneckbewehrung,
- die Betonage des Prüfkörpers sowie die erforderlichen Massnahmen zur Nachbehandlung,

- anschließende Schritte zur Vorbereitung für Transport, Instrumentierung und Versuchsdurchführung.

Die konkrete Dokumentation (z. B. Herstellprotokolle, Fotodokumentation, Betonliefer- und Nachbehandlungsangaben) wird im endgültigen Versuchsbericht ergänzend aufgeführt, sobald alle projektinternen Protokolle konsolidiert sind.



Abb. 3: Schalung

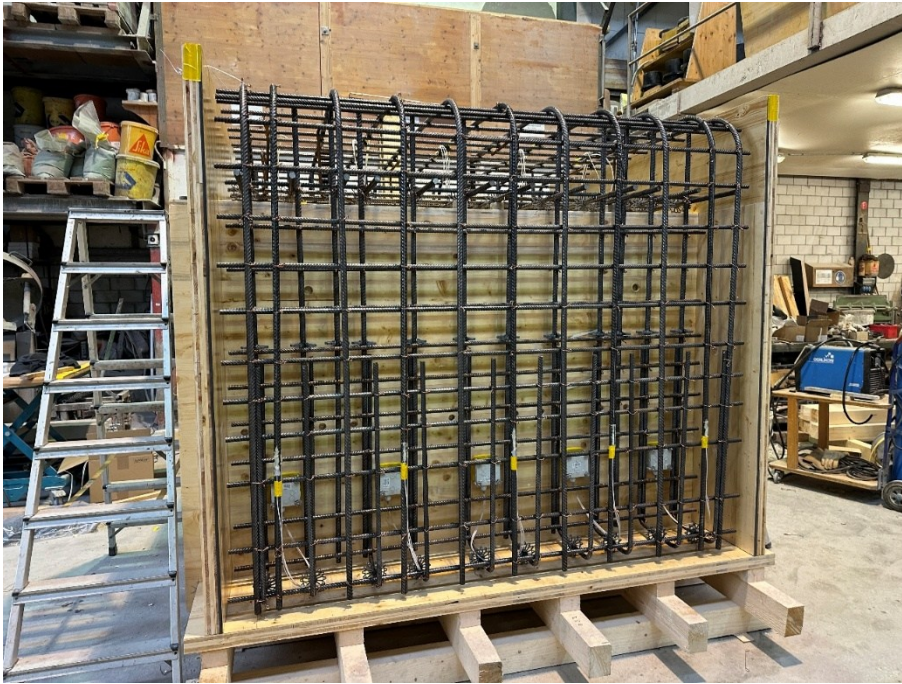


Abb. 4: Bewehrungskorb

## 3 Messtechnik und Instrumentierung

### 3.1 Faseroptische Dehnungsmessung (DFOS)

Zur Erfassung der Spannungsentwicklung in der Rahmeneckbewehrung wurde bei Prüfkörper 1 eine faseroptische Dehnungsmessung (FOS/DFOS) als primäres Messsystem eingesetzt. Der Fokus lag auf der kontinuierlichen Erfassung entlang der abgebogenen Bewehrungsstäbe, um räumliche Gradienten und lokale Maxima – insbesondere im Abbiegungsbereich der Rahmenecken – experimentell abbilden zu können.

Für den ersten Versuch wurden insgesamt 10 Bewehrungsstäbe instrumentiert, entsprechend 5 Stäben pro Rahmenecke. Jeder instrumentierte Stab wurde dreifach entlang der Stabachse mit FOS ausgestattet, wodurch eine erhöhte Redundanz und Auswertesicherheit erzielt wird (z. B. zur Überprüfung der Messkonsistenz, zur Robustheit gegenüber lokalen Störungen sowie zur verbesserten Erfassung möglicher lokaler Effekte). Insgesamt wurden mehr als 250 m faseroptische Sensorlänge installiert.

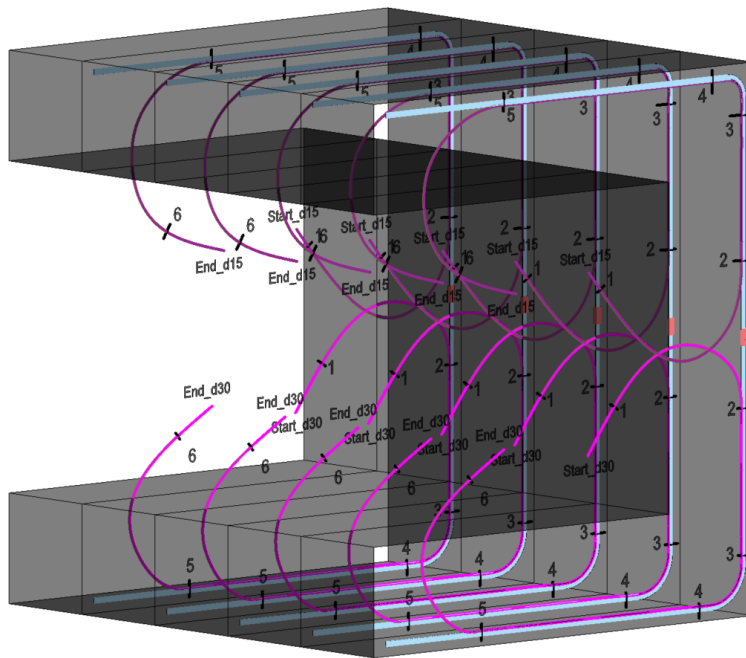


Abb. 5: DFOS Mapping

Die Installation umfasste die Aufbringung der Faser auf bzw. an der Bewehrung, geeignete Schutz- und Fixierungsmassnahmen sowie eine robuste Leitungsführung bis zur Messausrüstung. Damit wurde sichergestellt, dass die FOS-Messkette unter den Bedingungen des LUSSET-Versuchs (Montage, Belastung, mögliche Rissbildung und lokale Schädigungsvorgänge) funktionsfähig bleibt und eine kontinuierliche Datenerfassung ermöglicht.



Abb. 6: Instrumentierung FOS

Zur eindeutigen räumlichen Zuordnung der FOS-Messwerte wurde für jeden Sensorstrang vor dem Einbetonieren ein Referenzschema mit sechs definierten Kontrollpunkten aufgenommen und dokumentiert. Von diesen Kontrollpunkten verbleiben zwei ausserhalb des Prüfkörpers und bleiben damit auch nach der

Betonage dauerhaft zugänglich, während vier Kontrollpunkte innerhalb des Prüfkörpers liegen und nach dem Einbetonieren nicht mehr direkt inspizierbar sind. Durch die beiden extern zugänglichen Kontrollpunkte pro Sensor kann die Sensor- bzw. Stabkoordinate auch nach der Betonage zuverlässig rekonstruiert und überprüft werden. Da die Abstände zwischen sämtlichen Kontrollkoordinaten vor der Betonage vermessen und festgehalten wurden, ist eine präzise Lokalisierung der gemessenen Dehnungen entlang der Bewehrung weiterhin möglich.

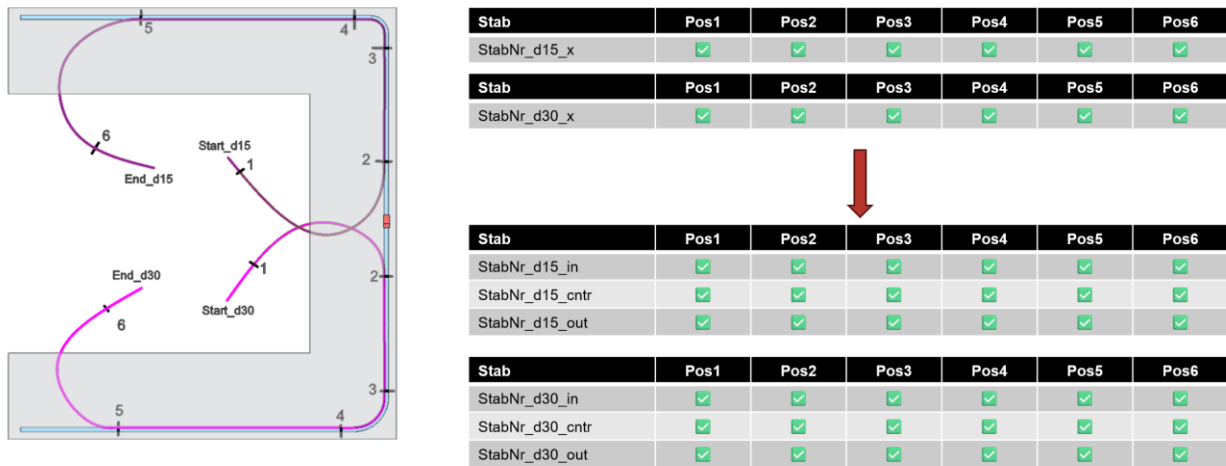


Abb. 7: FOS Kontrollpunkte pro Sensor

Der erfolgreiche Messbetrieb im ersten Versuch zeigte bereits qualitativ, dass mit der installierten FOS-Instrumentierung Dehnungen und daraus abgeleitete Spannungen entlang der gebogenen Rahmeneckbewehrung erfasst werden können; die vollständige quantitative Auswertung der Messdaten erfolgt in einem nachgelagerten Auswertungsschritt.

### 3.2 Digitale Bildkorrelation (DIC)

Zur flächenhaften Erfassung des Verformungs- und Dehnungszustands sowie zur visuellen Dokumentation der Rissinitiation und Rissentwicklung wurde bei Prüfkörper 1 ein Digital Image Correlation (DIC)-System eingesetzt. DIC ermöglicht die kontaktlose Messung von Verschiebungsfeldern und daraus abgeleiteten Dehnungsfeldern auf der Bauteiloberfläche und ergänzt damit die punkt- bzw. linienbezogenen Messungen der übrigen Sensorik.

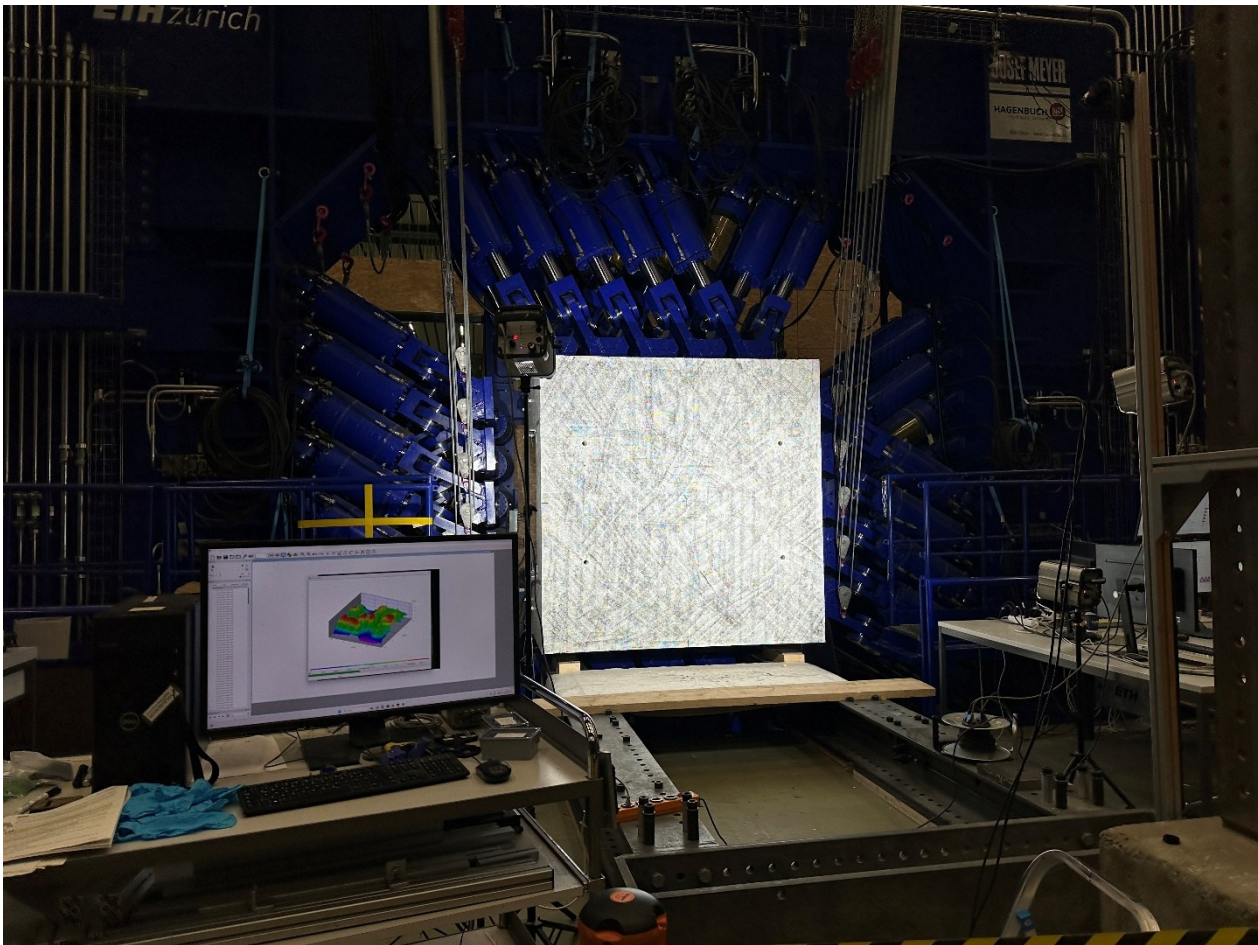


Abb. 8: DIC Einrichtung

Für den Versuch wurde der relevante Beobachtungsbereich im Umfeld der Rahmenecken so vorbereitet, dass eine stabile Bildauswertung möglich ist. Dazu wurden die Oberflächen im Messbereich entsprechend den DIC-Anforderungen konditioniert (insbesondere durch ein geeignetes Kontrastmuster). Das DIC-System wurde so positioniert, dass die für die Versuchsauswertung massgebenden Zonen der Rahmenecke sowie angrenzende Stababschnitte im Sichtfeld liegen und während der Belastung kontinuierlich aufgezeichnet werden konnten.

*Die detaillierte quantitative Auswertung der DIC-Daten (z. B. Risskarten, Dehnungsfelder zu charakteristischen Laststufen, Vergleich mit LVDT-/LUSET-Wegen) erfolgt in einem nachgelagerten Auswertungsschritt; im Rahmen dieses Berichts wird der Fokus auf die Installation und erfolgreiche Datenerfassung während des ersten Versuchs gelegt.*

### 3.3 Wegmessung mittels LVDTs

Zur Erfassung ausgewählter globaler und lokaler Verformungsgrößen wurde Prüfkörper 1 zusätzlich mit induktiven Wegaufnehmern (LVDTs) instrumentiert. Die LVDTs liefern hochgenaue, kontinuierliche

Wegmessungen an definierten Messpunkten und dienen als komplementäre Messkette zur faseroptischen Dehnungsmessung (FOS/DFOS) sowie zur flächenhaften DIC-Erfassung.

Insgesamt wurden vier LVDTs installiert. Die Sensoren wurden so angeordnet, dass die für die Versuchsdurchführung relevanten Relativverschiebungen und Verformungen des Prüfkörpers erfasst werden können (z. B. charakteristische Durchbiegungen, Relativrotationen bzw. Öffnungs-/Schliessbewegungen im Bereich der Rahmenecke sowie Referenzwege zur Kontrolle der Lager- und Einspannbedingungen). Die Messpositionen wurden dabei mit Blick auf eine robuste Montage, eine eindeutige Messrichtung sowie eine möglichst geringe Beeinflussung durch lokale Betonabplatzungen oder Rissöffnungen gewählt.

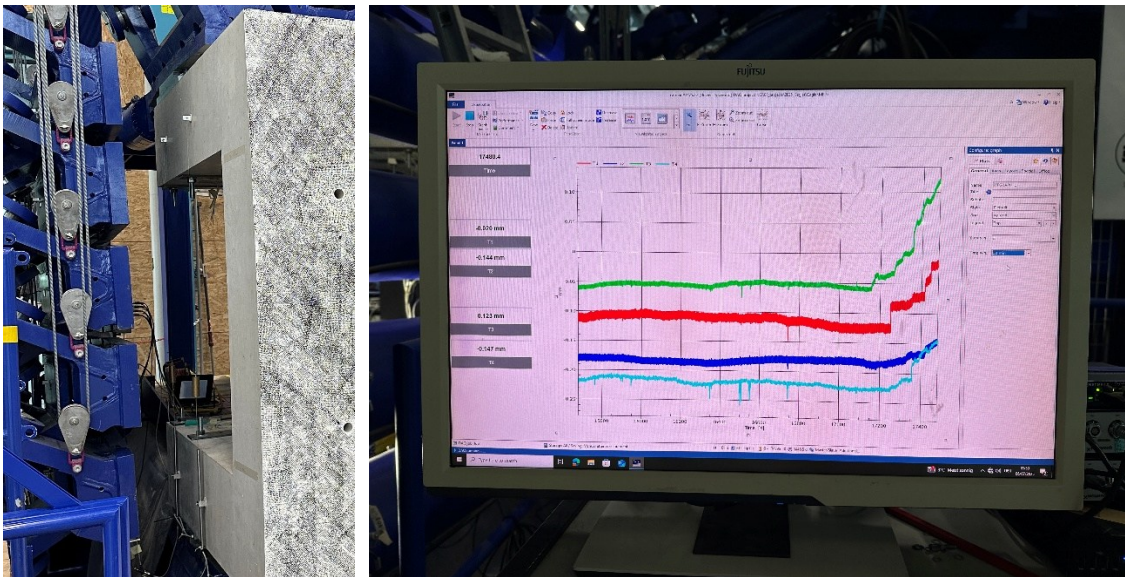


Abb. 9: LVDT Einrichtung

*Die detaillierte Auswertung (z. B. Weg-Zeit- und Weg-Last-Diagramme, Vergleich zwischen LVDT und LUSSET-Wegen, Zuordnung zu charakteristischen Laststufen) erfolgt nach Abschluss der vollständigen Datensichtung und ist nicht Bestandteil dieses Kurzberichts.*

### 3.4 LUSSET – Anlage Sensorik

Neben der externen Messtechnik (FOS/DFOS, DIC, LVDTs) wurde für Prüfkörper 1 die in der Versuchsanlage LUSSET integrierte Sensorik zur Erfassung der Maschinenzustände und der eingeleiteten Lasten genutzt. Die Anlage ist hierfür mit einem umfassenden Messsystem ausgestattet, das insbesondere die Aktuatorwege, Aktuatorkräfte sowie zusätzliche Zustandsgrößen der Lasteinleitung kontinuierlich erfasst.

- Wegaufnehmer in jedem der 100 Hydraulikaktoren (interne Wegmessung), wodurch die Aktuatorhöhe bzw. Stellwege während des Versuchs vollständig aufgezeichnet werden.
- Kraftmessung pro Aktuator über bidirektionale Kraftmessbolzen (Load Pins); ergänzend können Aktuatorkräfte aus den Drucksensoren in den Ventilkammern indirekt bestimmt werden.

- Neigungssensoren an den Jochgruppen, welche die Orientierung der Lasteinleitungselemente überwachen und damit die Bestimmung der Jochkinematik unterstützen

Die Messwerte werden durch das LUNET-Steuer- und Logging-System fortlaufend aufgezeichnet (u. a. Aktuatorwege, Aktuatorkräfte, Jochneigungen). Zusätzlich werden Synchronisationssignale externer Messsysteme (z. B. DIC und faseroptische Messung) mitgeführt, um eine zeitliche Zuordnung der Datensätze zu ermöglichen

## 4 Versuchsaufbau und Belastungsprogramm

### 4.1 Versuchsaufbau im LUNET

Prüfkörper 1 wurde im LUNET in einer um  $90^\circ$  gedrehten Einbaulage installiert, sodass die Rahmenecke im Prüfstand unter vertikaler Lasteinleitung geprüft werden konnte. Die Anbindung des Prüfkörpers an die Anlage erfolgte über die Bottom- und Top-Joche, welche an den Stützenbereichen kraftschlüssig mit dem Prüfkörper verbunden wurden. Durch diese Einbausituation wird die vertikal eingeleitete Anlagenlast  $F_z$  (LUNET-Terminologie: Normalkraft) in das System übertragen und führt aufgrund der Rahmengenometrie bzw. des Hebelarms zu einer gezielten negativen Momentenbeanspruchung (Zug aussen) im Bereich der Rahmenecken.

### 4.2 Belastungsprogramm

Die Beanspruchung von Prüfkörper 1 erfolgte ausschliesslich über  $F_z$  und wurde kraftgesteuert durchgeführt. Das Belastungsprogramm bestand aus einer zyklischen Variation der Kraft zwischen einem Minimal- und einem Maximalwert mit folgenden Parametern:

- Mindestkraft:  $F_{\min} = 80 \text{ kN}$
- Höchstkraft (maximal angefahren):  $F_{\max} = 200 \text{ kN}$
- Zyklisches Lastfenster:  $80 \leftrightarrow 125 \text{ kN}$
- Periodendauer:  $T = 3 \text{ min}$  pro Zyklus
- Anzahl erfasster Zyklen:  $N = 1086$

Die Kraft wurde dabei wiederholt zwischen  $80 \text{ kN}$  und  $125 \text{ kN}$  angefahren und zurückgeführt. Während des Belastungsprogramms wurden die Messdaten parallel mit der externen Messtechnik (FOS/DFOS, DIC, LVDTs) sowie über die LUNET-Anlagensensorik aufgezeichnet.

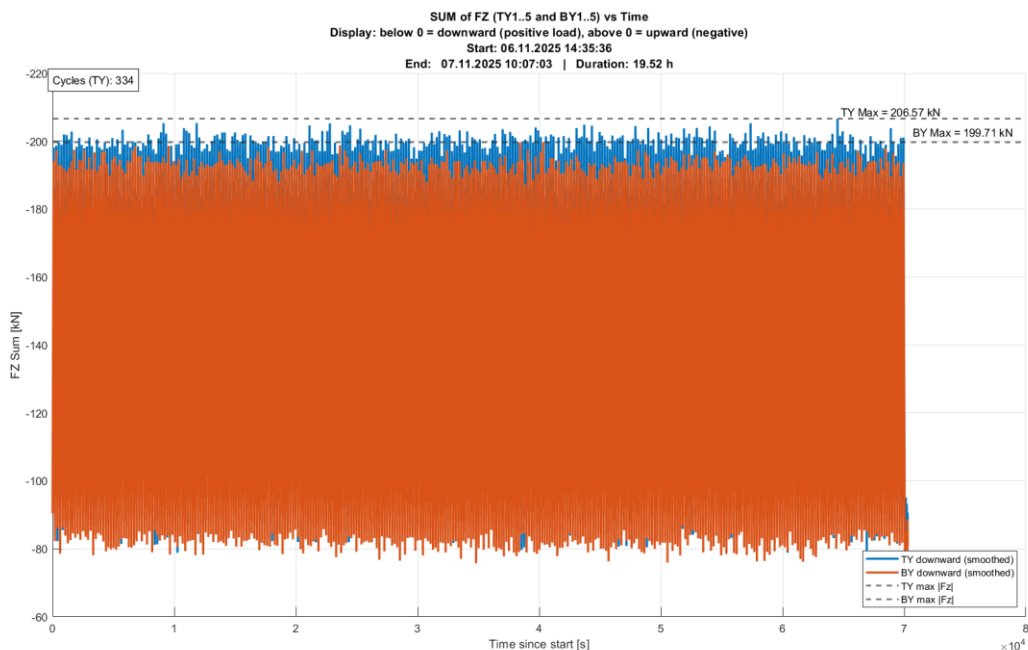


Abb. 10: Belastungsprogramm

Aus den vorgegebenen Lasten resultieren in der Rahmeneckbewehrung Dehnungen, aus denen über die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Bewehrungsstahls die zugehörigen Stahlspannungen abgeleitet werden können. Entsprechend ist die spätere Bestimmung einer Spannungsamplitude  $\Delta\sigma_s$  in der Rahmeneckbewehrung vorgesehen, welche auf den gemessenen Dehnungen basiert und auf ein normgerechtes Beanspruchungsniveau ausgerichtet ist. Eine detaillierte quantitative Auswertung der resultierenden Dehnungen, Spannungen und Spannungsamplituden wird im Rahmen dieses Kurzberichts nicht vorgenommen und erfolgt in einem nachgelagerten Auswertungsschritt.

## 5 Zusammenfassung und Erkenntnisse aus dem Test 1 (Prüfkörper 1)

Der erste Versuch an Prüfkörper 1 zeigte, dass die faseroptische Dehnungsmessung (FOS/DFOS) unter den Versuchsbedingungen zuverlässig funktioniert und die beabsichtigte Erfassung von Dehnungen bzw. daraus ableitbaren Spannungen entlang der instrumentierten Rahmeneckbewehrung möglich ist. Auch die Kombination der Messketten (FOS/DFOS, DIC, LVDTs sowie LUSSET-Anlagensensorik) erwies sich im Grundsatz als funktionsfähig.

Aus der Durchführung des ersten Tests konnten zudem wesentliche praktische Erkenntnisse gewonnen werden, insbesondere hinsichtlich Installation, Handling und Ablauf der Mess- und Datenerfassung. Diese Erfahrungen werden für die nachfolgenden Versuche direkt übernommen und in den weiteren Tests entsprechend angewendet.

Zur internen Kontrolle wurde eine kurzfristig erstellte Schnell-Auswertung durchgeführt. In einem dazugehörigen Diagramm (Abb.11) ist beispielhaft dargestellt, dass die Messungen in den relevanten Bereichen plausibel und stabil erfasst werden. Dieses Diagramm enthält zwar bereits mehrere aussagekräftige Aspekte, ist jedoch ausdrücklich als qualitative Funktions- und Plausibilitätskontrolle zu verstehen und stellt keine abschliessende Versuchsauswertung dar. Die detaillierte, quantitative Auswertung der Messdaten erfolgt in einem nachgelagerten Arbeitsschritt.

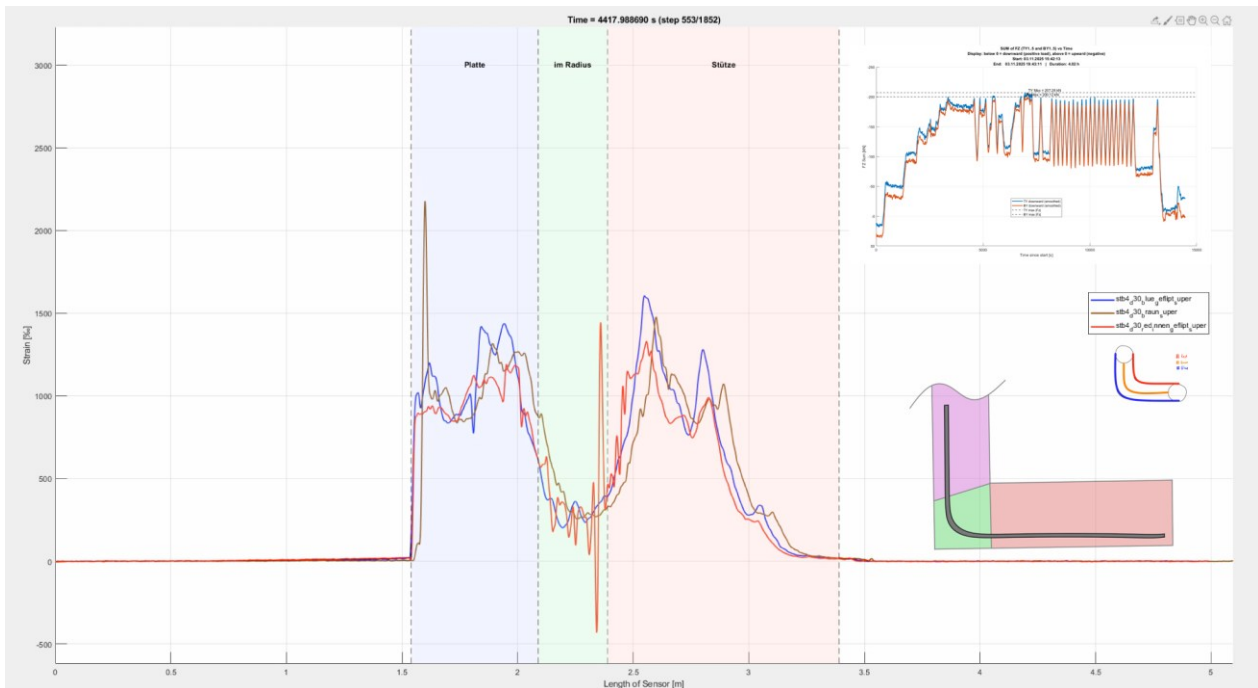


Abb. 11: Schnell-Auswertung (zur Kontrolle)

**Zum Zeitpunkt der Berichterstellung liegt der Schwerpunkt auf der Durchführung der weiteren Tests; die umfassende Auswertung von Test 1 wird anschliessend vertieft und systematisch durchgeführt.**

# 6 Outlook

## **Durchführung der restlichen Tests**

Prüfkörper 3: 23.02.2026 – 27.03.2026

Prüfkörper 4: 09.03.2026 – 13.03.2026

## **Auswertung**

Phase 1: 15.04.2026 – 30.04.2026 (Aussortierung, Erste Resultate)

Phase 2: 01.05.2026 – 15.07.2026 (Austausch, Kolloquium, Literatur)

Phase 3: 15.08.2026 – 15.11.2026 (Auswerten, Visualisieren)

Phase 4: 15.11.2026 – 15.12.2026 (Auswerten, Erstellung des Schlussberichts)