

ETH Zürich
Prof. Dr. Walter Kaufmann
Institut für Baustatik und Konstruktion
HIL E42.3
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zürich

Telefon +41 44 633 75 29
kaufmann@ibk.baug.ethz.ch
www.kaufmann.ibk.ethz.ch
www.concrete.ethz.ch

Zürich, 12. Oktober 2026

Spannungsamplitude gebogener Rahmeneckbewehrungen – Mechanisch konsistente Modellierung und experimentelle Validierung

Kurzbericht VK3 und VK4

Zwischenbericht – Vorauswertung der faseroptischen Dehnungsmessungen)

1 Einleitung

Im Projekt «Spannungsamplitude gebogener Rahmeneckbewehrungen – Mechanisch konsistente Modellierung und experimentelle Validierung» wurden an der ETH Zürich vier Versuchskörper (VK1 bis VK4) mit je zwei Rahmenecken im Large Universal Shell Element Tester (LUSSET) zyklisch geprüft. Die Dehnungen der abgebogenen Rahmeneckbewehrung wurden dabei kontinuierlich faseroptisch gemessen.

Der vorliegende Zwischenbericht informiert die Forschungspartner über den Stand der Arbeiten und stellt ausgewählte Resultate der Vorauswertung vor. Im Zentrum steht die Frage, inwieweit die Dehnungen und Dehnungsamplituden bis zu den Abbiegungen abgeklungen sind.

Abgrenzung. Betrachtet werden nur VK3 und VK4, jeweils stellvertretend anhand von Stab 2 und Lastzyklus 150. Dehnungen werden in diesem Zwischenbericht noch nicht in Spannungen umgerechnet (im elastischen Bereich sind die Spannungen proportional zu den Dehnungen, so dass direkte Rückschlüsse auf die Spannungen möglich sind). Auch die Konfiguration, die Werkstoffkennwerte, die Spannungsermittlung und die Folgerungen für die Bemessung folgen im Schlussbericht.

2 Versuchsprogramm und Belastung

VK3 und VK4 unterscheiden sich in folgenden Punkten:

- Stabdurchmesser: Ø18 mm bzw. Ø20 mm
- Geometrie: VK4 mit Vouten in den Innenecken
- Lastniveau

Die Beanspruchung wurde wie im Forschungsgesuch beschrieben aufgebracht, wobei auf die Einleitung von Endmomenten verzichtet wurde. Der Versuchsablauf umfasste eine monotone Erstbelastung, eine zyklische Belastung sowie eine Belastung bis zum Bruch. Dieser Bericht behandelt die zyklische Belastung. Die zyklische Beanspruchung wurde als dreieckige Rampe zwischen F_{min} (Unterlast) und F_{max} (Oberlast) aufgebracht (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zyklische Belastung von VK3 und VK4 (Median über alle Zyklen)

	VK3	VK4
F_{min} Unterlast obere / untere Lasteinleitung	98 / 104 kN	221 / 233 kN
F_{max} Oberlast obere / untere Lasteinleitung	238 / 246 kN	392 / 399 kN
$\Delta F = F_{max} - F_{min}$ obere / untere Lasteinleitung	140 / 142 kN	171 / 166 kN
Zyklusdauer	ca. 4,2 min	ca. 3,7 min
Anzahl Zyklen	1'952	1'434
Dauer der zyklischen Belastung	ca. 6 Tage	ca. 4 Tage

VK4 wurde nicht nur mit höheren Lastgrenzen, sondern auch mit einer um 15 bis 22 % höheren Lastamplitude ΔF geprüft. Die in den Abschnitten 4.2 und 5.2 angegebenen Lastgrenzen gelten für Zyklus 150 und weichen daher geringfügig von Tabelle 1 ab.

3 Messtechnik und Auswertung

Messsystem. Die Glasfasern sind in die Nuten der Bewehrungsstäbe eingeklebt. Das Messsystem erfasste die Dehnung kontinuierlich entlang des Stabes mit einem Messpunktabstand von 1.3 mm und alle 4 s. Die Last der Prüfanlage wurde synchron erfasst.

Datenaufbereitung. Die Messdaten sind von messtechnischen Artefakten bereinigt und über ca. 20 mm geglättet. Darüber hinaus sind sie unverändert dargestellt.

Einheiten und Nullmessung. Dehnungen sind in $\mu\epsilon$ angegeben ($1'000 \mu\epsilon = 1 \text{ mm/m}$). Die Nullmessung erfolgte vor der Erstbelastung. Die Dehnungen umfassen somit auch die bleibenden Dehnungen aus der Erstbelastung sowie aus den vorangehenden Zyklen.

Instrumentierung. Jeder Versuchskörper enthält in seinem oberen und unteren Flansch sowie dem Riegel jeweils fünf instrumentierte Bewehrungsstäbe (Stab 1 bis Stab 5). Jeder Stab ist mit drei Fasern ausgestattet (Abbildung 1):

- **out:** aussen am Abbiegeradius
- **in:** innen am Abbiegeradius
- **center:** seitlich, in der Ebene der Stabachse

Die Faser **center** erfasst die Dehnung in der Stabachse direkt. Der Mittelwert **(out + in)/2** dient als unabhängige Kontrolle. Die Differenz **out – in** ist ein Mass für die Biegung des Stabes im Abbiegeradius. Welche dieser Dehnungen für die Ermüdung massgebend ist, wird im Schlussbericht behandelt.

Zonen und Messstellen. Der Stab ist in folgende Zonen eingeteilt (siehe Abbildung 1 und Abbildung 14):

- A: Abbiegeradius
- B: Eckbereich
- C: Stiel
- D: Flansch
- E: Übergang zur Voute (nur bei VK4)

Die Messstellen 2 und 5 begrenzen den verklebten Bereich, die Messstellen 3' und 4' den Abbiegeradius. In den Abbildungen tragen die Messstellen der oberen Ecke den Vorsatz T, jene der unteren Ecke den Vorsatz B (z. B. T3', B3').

Auswertegrössen. Ausgewertet werden die Dehnung bei Oberlast F_{max} und Unterlast F_{min} sowie die resultierende Dehnungsamplitude $\Delta\epsilon = \epsilon(F_{max}) - \epsilon(F_{min})$. Massgebend ist jeweils die Messreihe, die dem Lastmaximum im betreffenden Zyklus am nächsten liegt, d.h. zwischen den Messreihen wurde nicht interpoliert.

Wahl von Zyklus 150. Zyklus 150 liegt nach dem Abklingen der anfänglichen Dehnungszunahme (Abbildungen 2 und 15). Die verbleibende Zunahme beträgt weniger als $0,5 \mu\epsilon$ pro Zyklus und ist gegenüber $\Delta\epsilon$ vernachlässigbar.

4 Ergebnisse VK3

4.1 Zonen und Messstellen

Abbildung 1 zeigt Geometrie, Auswertungszonen und Messstellen von Stab 2 (Masse in mm) sowie die Lage der drei Fasern im Stabquerschnitt.

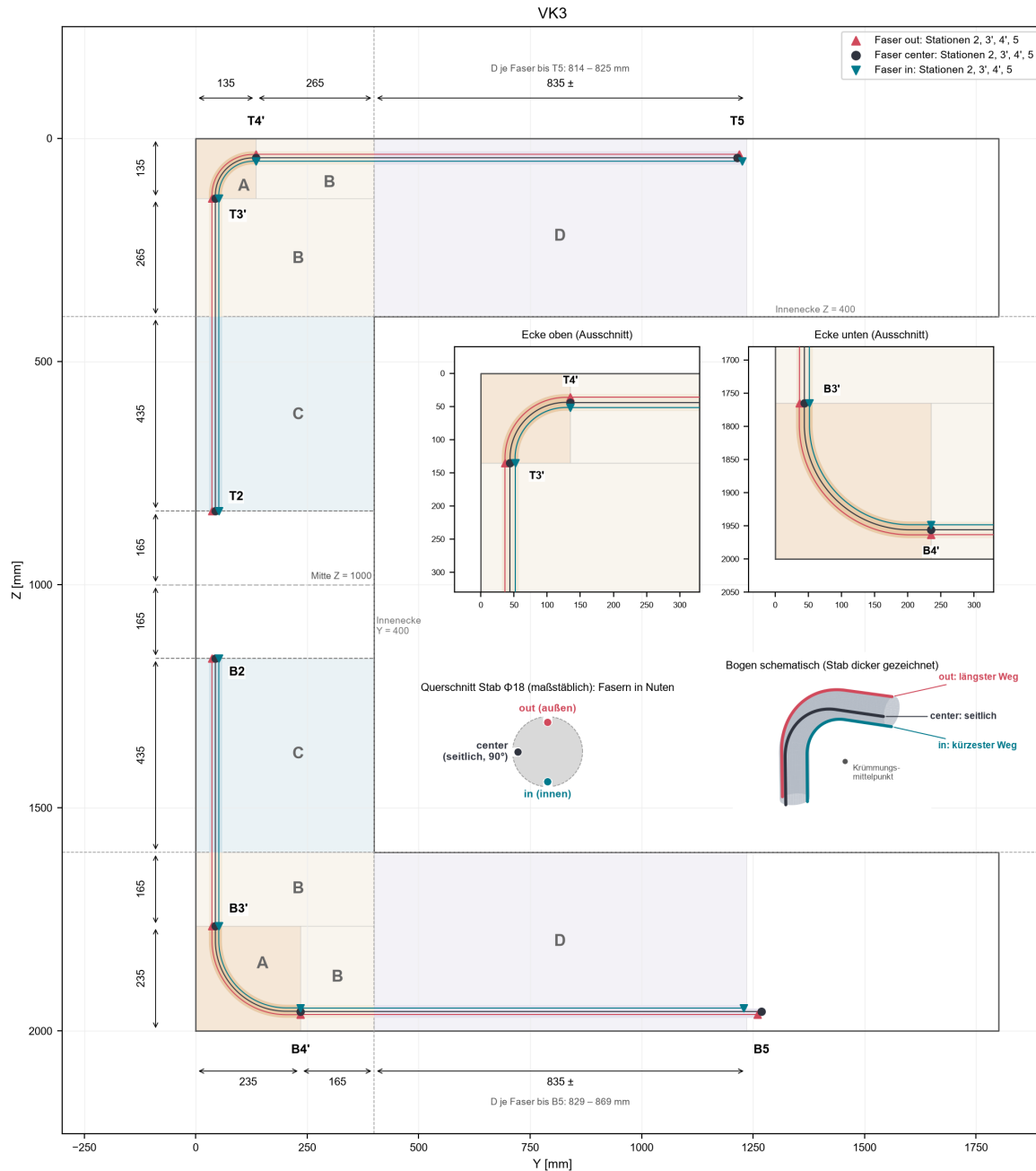


Abbildung 1: VK3, Stab 2: Zonen, Messstellen und Lage der Fasern

4.2 Verlauf der Belastung

Abbildung 2 zeigt Last und Dehnung während der ersten 21 h der zyklischen Belastung. Als Referenz dient die Faser **center** von Stab 3, dem mittleren Stab im unteren Flansch. Bei konstanten Lastgrenzen nimmt die Dehnung zunächst rasch zu, nach einigen Stunden flacht die Zunahme ab. In Zyklus 150 (nach 10.4 h) beträgt sie noch ca. 6 $\mu\epsilon/h$, also ca. 0.4 $\mu\epsilon$ pro Zyklus.

Lastgrenzen in Zyklus 150:

- untere Lasteinleitung: 104...247 kN ($\Delta F = 143$ kN)
- obere Lasteinleitung: 98...238 kN ($\Delta F = 140$ kN)

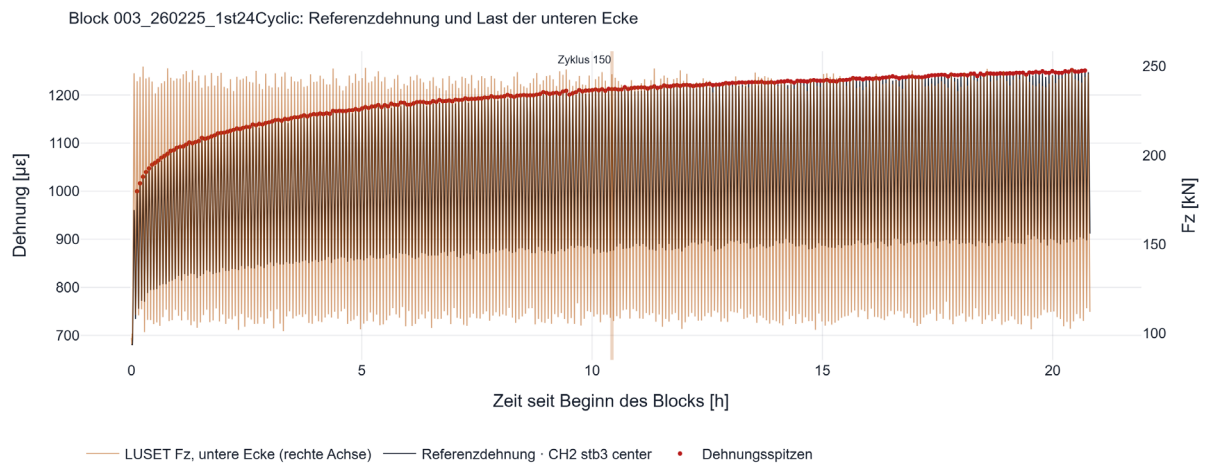


Abbildung 2: VK3: Last und Dehnung zu Beginn der zyklischen Belastung (Stab 3 unten, Faser center)

4.3 Alle Stäbe im Überblick

Abbildung 3 zeigt repräsentativ für VK3 die Dehnung aller zehn Stäbe bei der Oberlast F_{max} . Das Dehnungsbild ist bei allen Stäben qualitativ ähnlich: Grosse Dehnungen in den geraden Abschnitten nahe der Rahmenecke, deutlich kleinere im Biegeradius der Bewehrung. Stab 2, der 2. Stab von hinten, ist damit repräsentativ.

Alle Stäbe bei Fmax, Zyklus 150 (Fz unten = 245 kN)

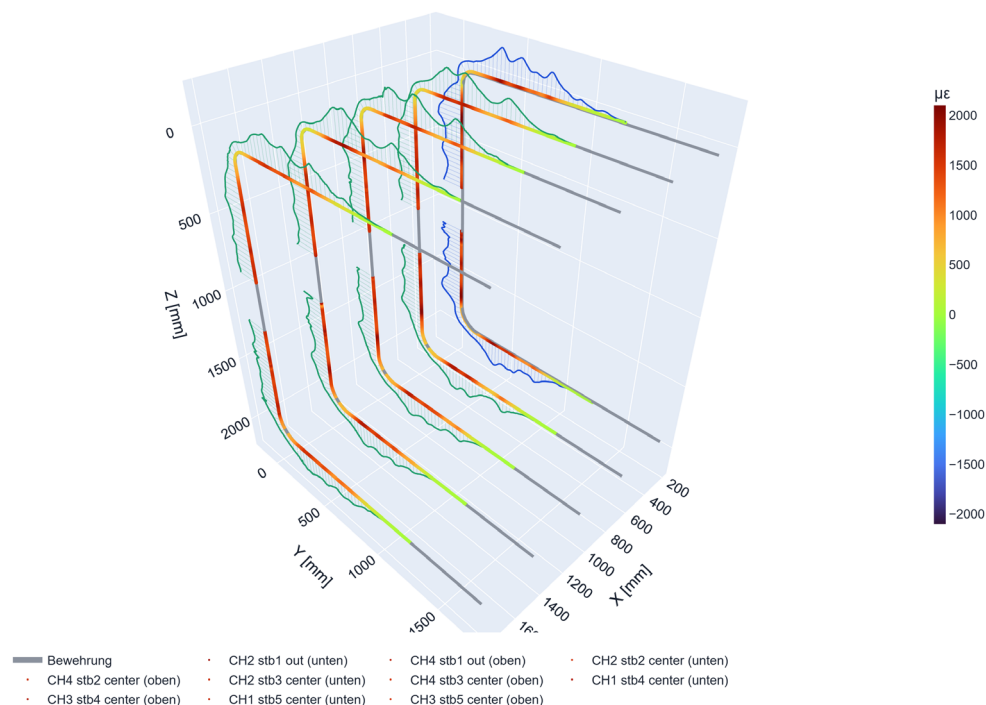


Abbildung 3: VK3: Dehnung aller Stäbe bei Fmax (3D-Darstellung)

4.4 Stab 2 bei F_{max}

Die Abbildungen 4 bis 7 zeigen die Dehnung bei F_{max} entlang des Bewehrungsstabes, je Faser und als Mittelwert (**out** + **in**)/2. Markiert ist das Maximum der Dehnung je Schenkel, d. h. je einmal im Stiel und im Flansch, jeweils einschliesslich des angrenzenden Eckbereichs (Zone B).

Entlang der Bewehrungen liegen die Maximalwerte der Dehnungen in den geraden Stababschnitten nahe der Rahmenecke. Die Abbiegung ist deutlich weniger beansprucht. Maximalwerte der Faser **out**:

- obere Rahmenecke: 2'009 $\mu\epsilon$ (Stiel), 1'937 $\mu\epsilon$ (Flansch)
- untere Rahmenecke: 2'017 $\mu\epsilon$ (Stiel), 2'100 $\mu\epsilon$ (Flansch)

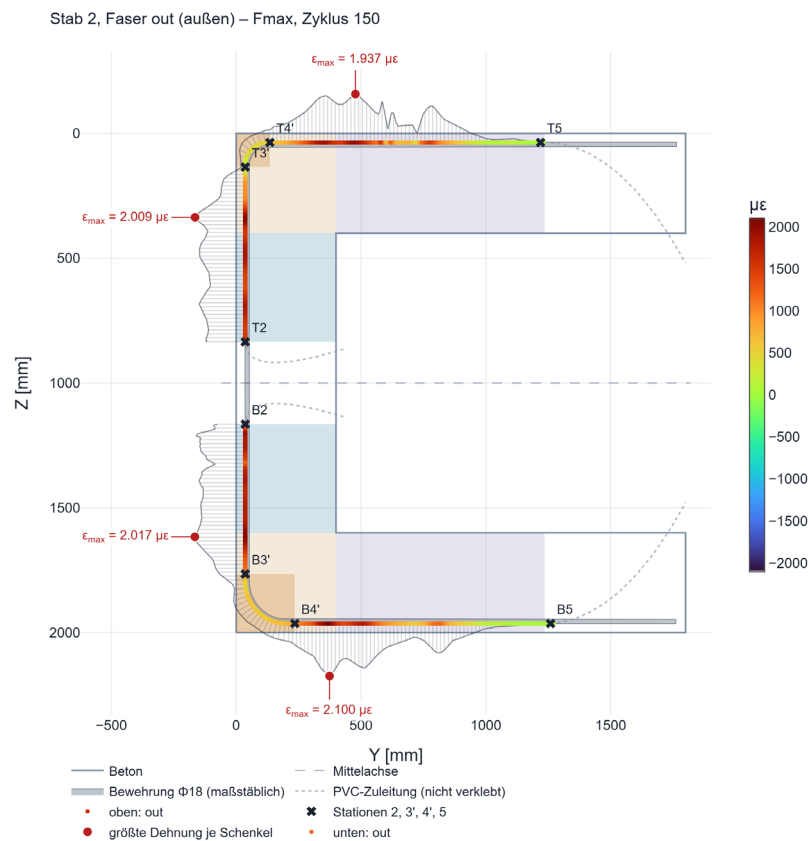


Abbildung 4: VK3, Stab 2: Faser **out** bei F_{max}

Stab 2, Faser center (Mitte) – F_{max} , Zyklus 150

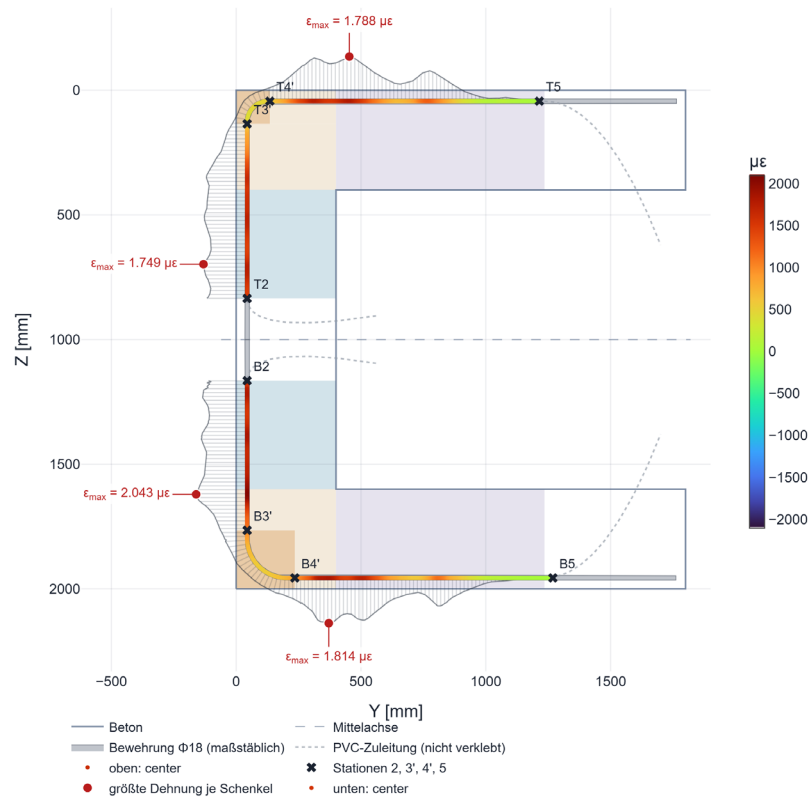


Abbildung 5: VK3, Stab 2: Faser center bei F_{max}

Stab 2, Faser in (innen) – F_{max} , Zyklus 150

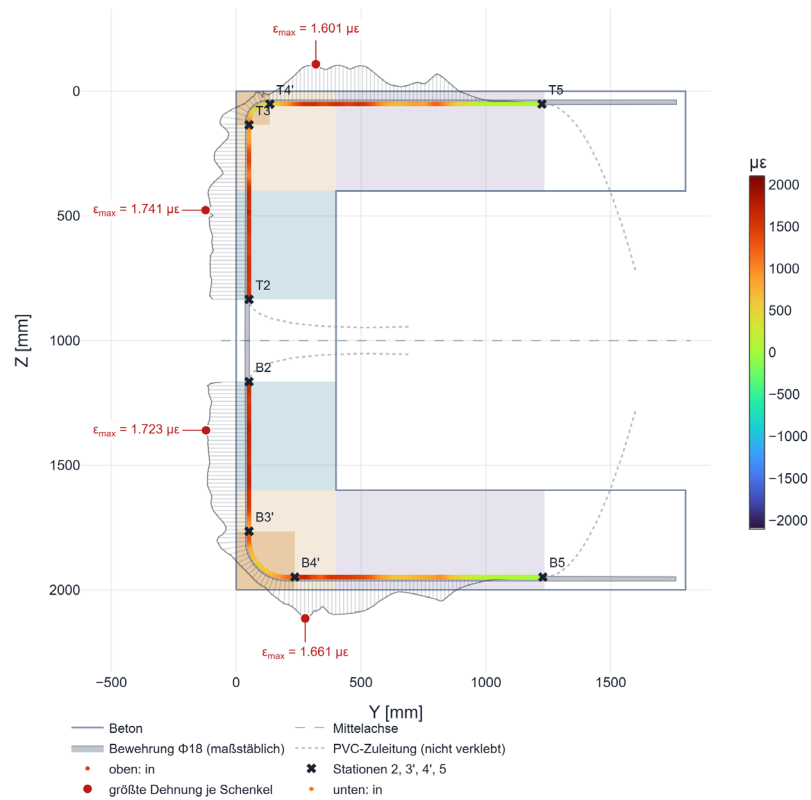


Abbildung 6: VK3, Stab 2: Faser in bei F_{max}

Stab 2, mittlere Dehnung (out + in)/2 – Fmax, Zyklus 150

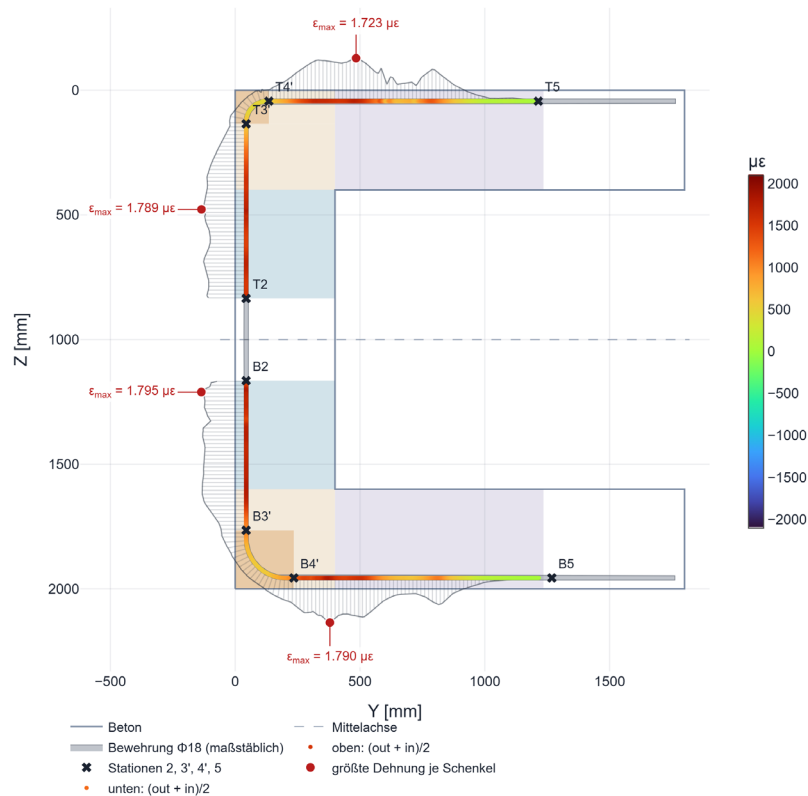


Abbildung 7: VK3, Stab 2: Mittelwert (out + in)/2 bei Fmax

4.5 Dehnungen entlang Stab 2

Die Abbildungen 8 bis 13 zeigen je Faser den Verlauf der Dehnungen bei Maximallast $\varepsilon(F_{max})$, bei Minimallast $\varepsilon(F_{min})$ und die resultierende Dehnungsamplitude $\Delta\varepsilon = \varepsilon(F_{max}) - \varepsilon(F_{min})$ entlang des Bewehrungsstabes. Markiert sind der Maximalwert sowie die Werte an den Messstellen 3' und 4' d.h. am Übergang zur Abbiegung.

Die Dehnungsamplitude ist bis zu den Abbiegungen weitgehend abgeklungen:

- **Obere Rahmenecke** (Abbildung 8): $\Delta\varepsilon$ der Faser **out** beträgt an den Messstellen 3' und 4' je rund 40 $\mu\varepsilon$, d. h. ca. 5% des Maximalwertes von 782 $\mu\varepsilon$ im Flansch (Zone D).
- **Untere Rahmenecke** (Abbildung 11): $\Delta\varepsilon$ beträgt 147 bzw. 208 $\mu\varepsilon$, d. h. 17% bzw. 24% des Maximalwertes von 868 $\mu\varepsilon$ im Eckbereich (Zone B). Die Abnahme ist hier deutlich schwächer, jedoch weiterhin ausgeprägt.

Der Maximalwert der Dehnung bei F_{max} (Faser **out**, 2'100 $\mu\varepsilon$) liegt am Übergang vom unteren Rahmeneck zum unteren Flansch (Zone B).

Stab 2 oben (obere Rahmenecke)

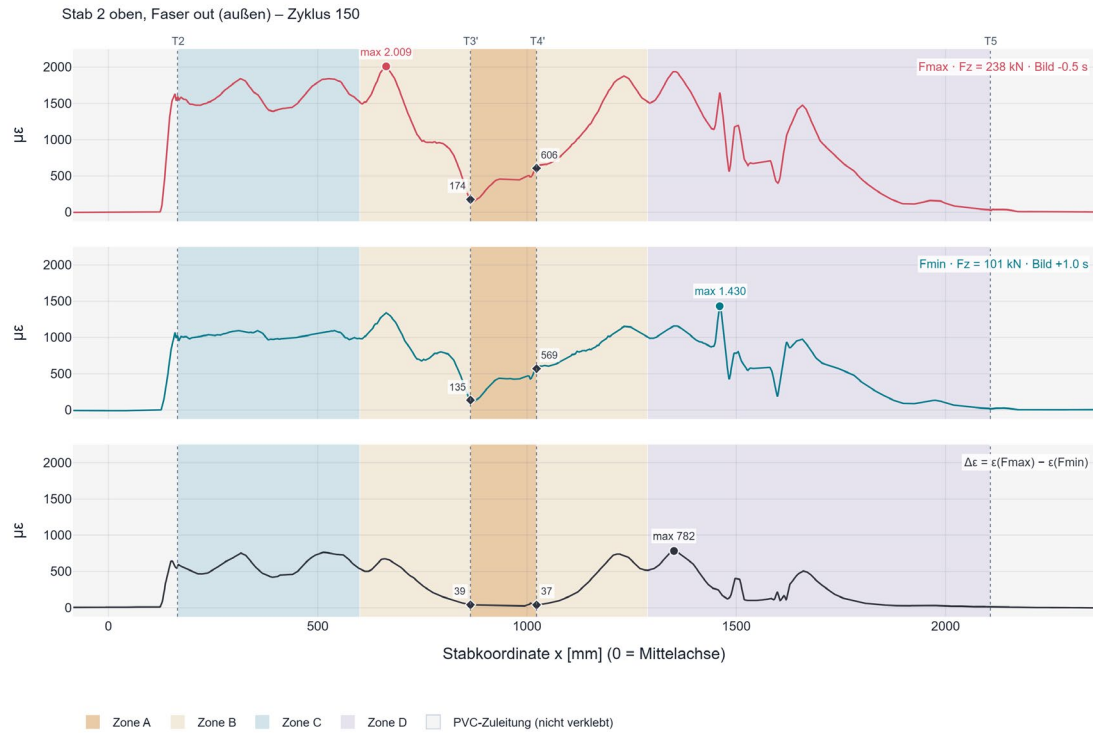


Abbildung 8: VK3, Stab 2 oben, Faser out: Dehnungsverlauf

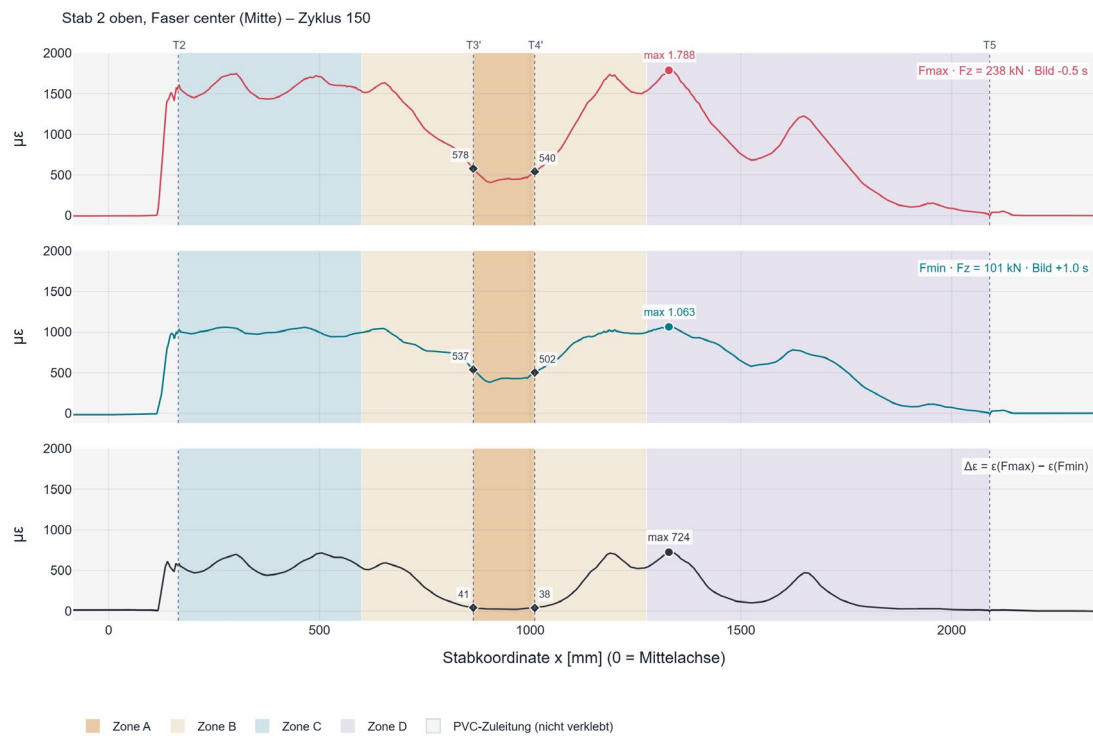


Abbildung 9: VK3, Stab 2 oben, Faser center: Dehnungsverlauf

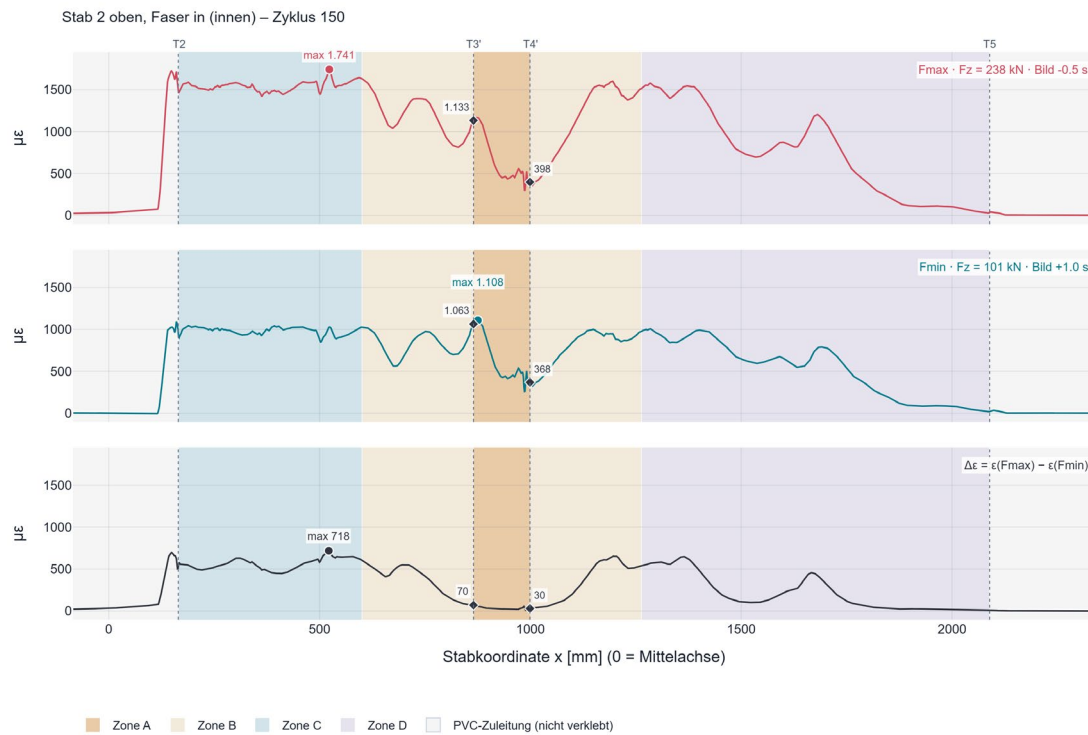


Abbildung 10: VK3, Stab 2 oben, Faser in: Dehnungsverlauf

Stab 2 unten (untere Rahmenecke)

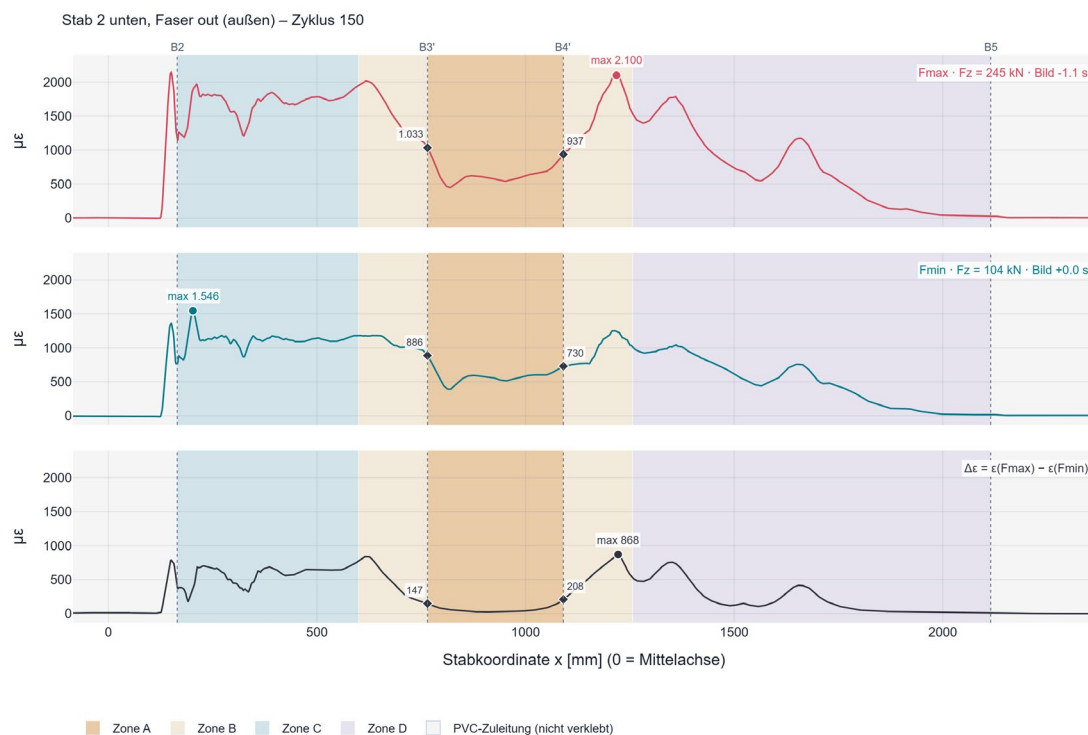


Abbildung 11: VK3, Stab 2 unten, Faser out: Dehnungsverlauf

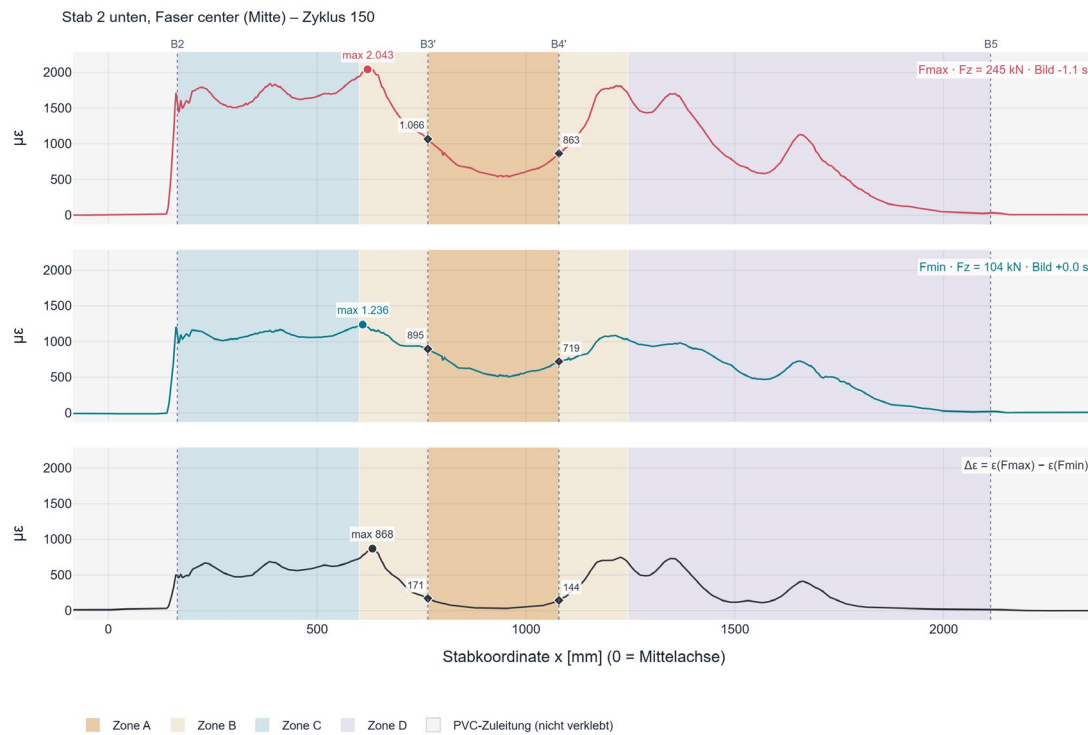


Abbildung 12: VK3, Stab 2 unten, Faser center: Dehnungsverlauf

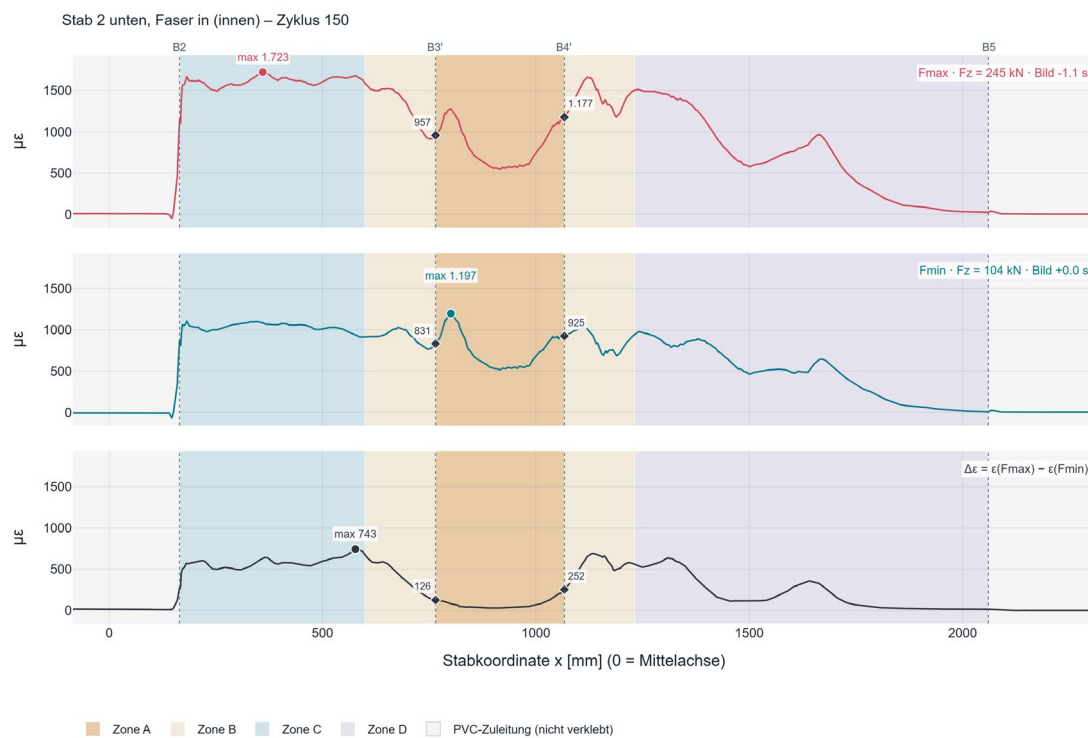


Abbildung 13: VK3, Stab 2 unten, Faser in: Dehnungsverlauf

5 Ergebnisse VK4

5.1 Zonen und Messstellen

Abbildung 14 zeigt die Geometrie, Zonen und Messstellen von Stab 2. Gegenüber VK3 kommt Zone E hinzu, die den Bereich der Voute umfasst.

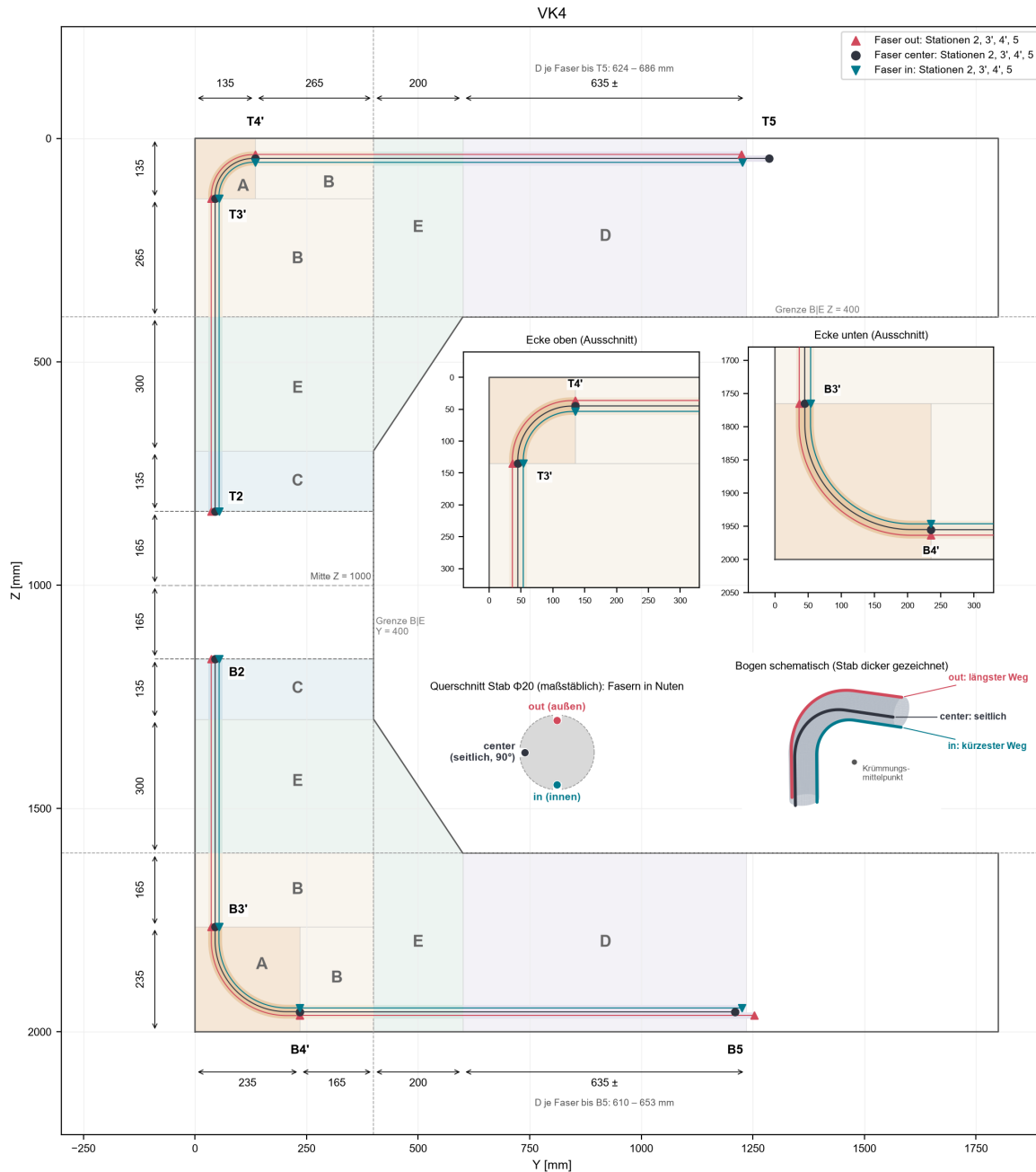


Abbildung 14: VK4, Stab 2: Zonen, Messstellen und Lage der Fasern

5.2 Verlauf der Belastung

Abbildung 15 zeigt Last und Dehnung über die ersten 18 h der zyklischen Belastung, mit derselben Referenz wie in Abschnitt 4.2. Der Verlauf entspricht qualitativ dem von VK3. In Zyklus 150 (nach 9.4 h) beträgt die Zunahme noch ca. $3 \mu\epsilon/h$, also ca. $0.2 \mu\epsilon$ pro Zyklus.

Lastgrenzen in Zyklus 150:

- untere Lasteinleitung: 234...399 kN ($\Delta F = 165$ kN)
- obere Lasteinleitung: 221...392 kN ($\Delta F = 171$ kN)

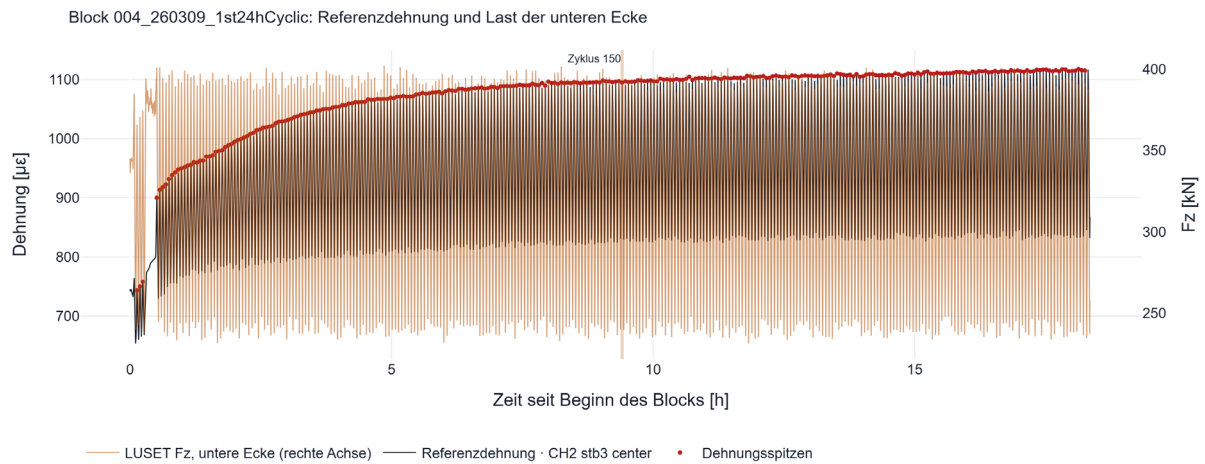


Abbildung 15: VK4: Last und Dehnung zu Beginn der zyklischen Belastung (Stab 3 unten, Faser center)

5.3 Alle Stäbe im Überblick

Abbildung 16 zeigt die Dehnung aller zehn Stäbe bei F_{max} . Das Dehnungsbild entspricht qualitativ dem von VK3, und es wird ebenfalls Stab 2 (der 2. Stab von hinten) detailliert ausgewertet.

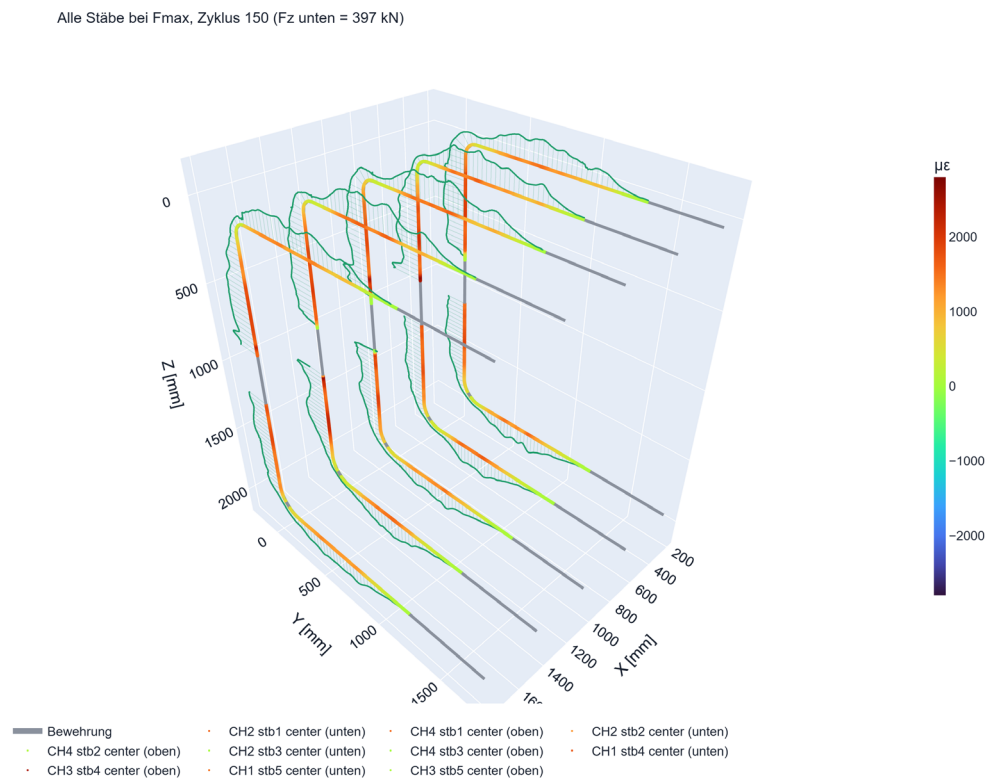


Abbildung 16: VK4: Dehnung aller Stäbe bei Fmax (3D-Darstellung)

5.4 Stab 2 bei F_{max}

Die Abbildungen 17 bis 20 sind in gleicher Weise aufgebaut wie in Abschnitt 4.4. Maximalwerte der Faser **out**:

- obere Rahmenecke: 2'254 $\mu\epsilon$ (Stiel), 1'939 $\mu\epsilon$ (Flansch)
- untere Rahmenecke: 2'781 $\mu\epsilon$ (Stiel), 1'725 $\mu\epsilon$ (Flansch)

Die Maximalwerte liegen weiter von der Abbiegung entfernt als bei VK3, im Bereich der Voute (Zone E) bzw. an deren Übergang zum Flansch. Der Wert von 2'781 $\mu\epsilon$ liegt im Bereich der Fließdehnung üblicher Betonstähle.

Stab 2, Faser out (außen) – F_{max} , Zyklus 150

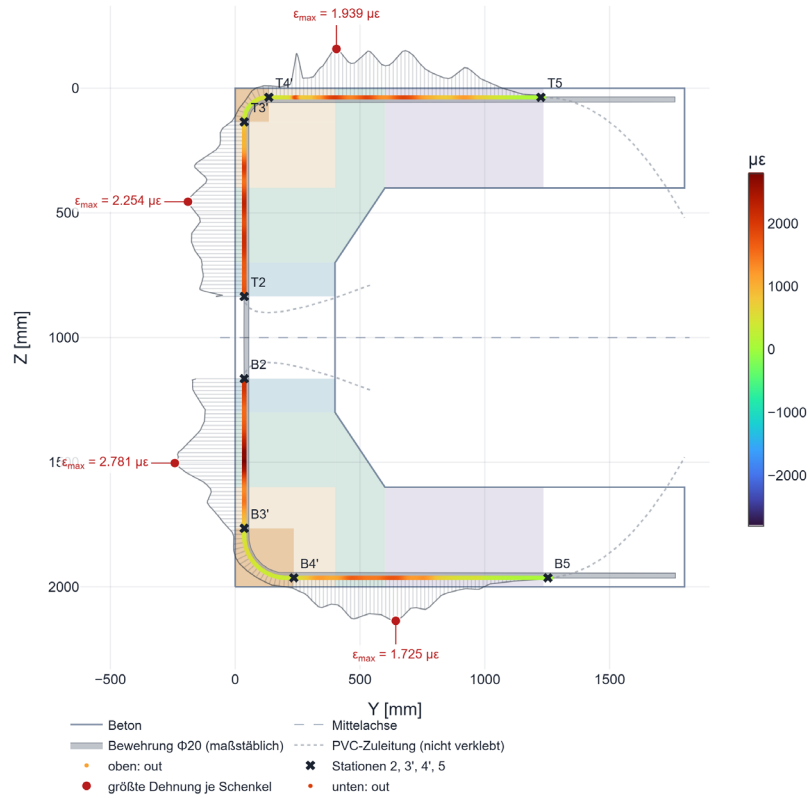


Abbildung 17: VK4, Stab 2: Faser out bei F_{max}

Stab 2, Faser center (Mitte) – F_{max} , Zyklus 150

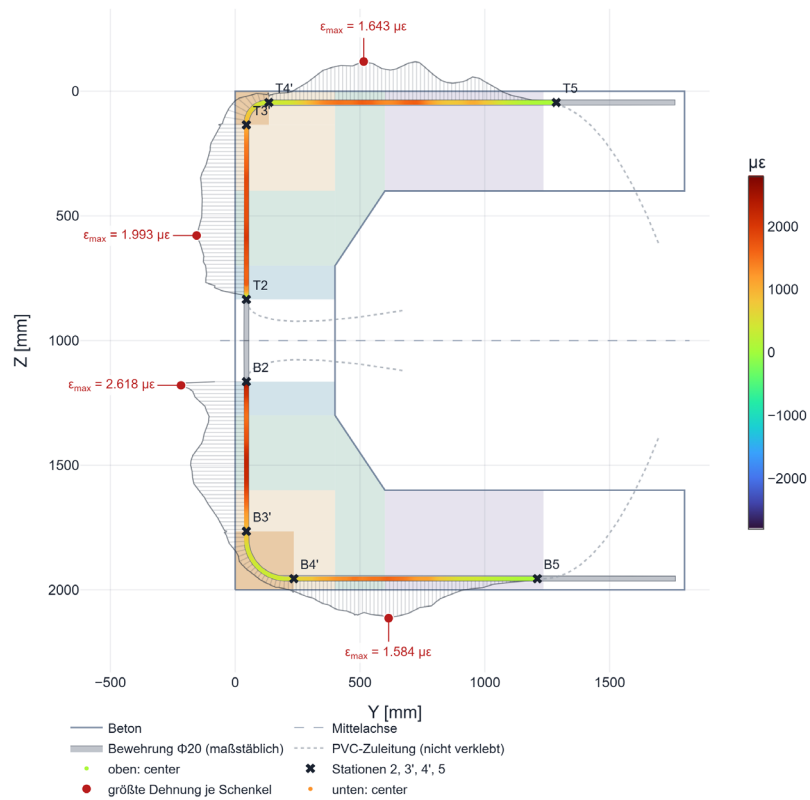


Abbildung 18: VK4, Stab 2: Faser center bei F_{max}

Stab 2, Faser in (innen) – F_{max} , Zyklus 150

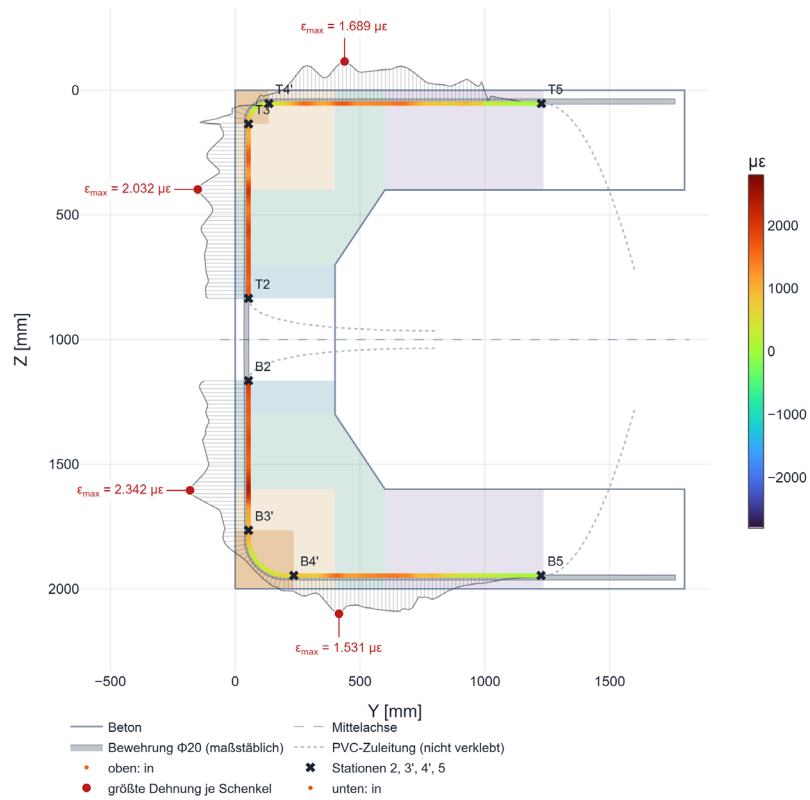


Abbildung 19: VK4, Stab 2: Faser in bei F_{max}

Stab 2, mittlere Dehnung (out + in)/2 – F_{max} , Zyklus 150

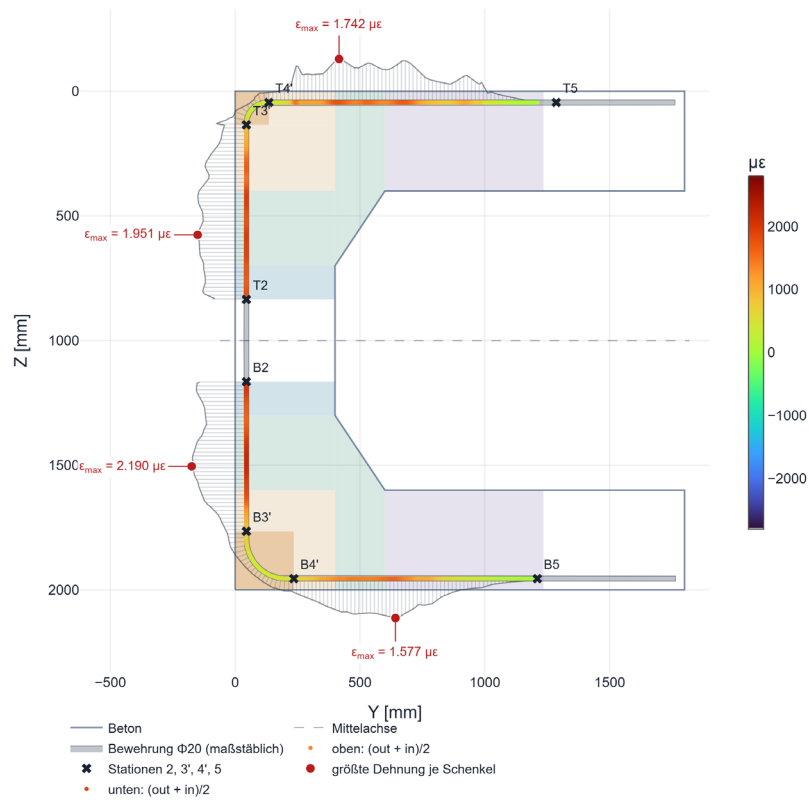


Abbildung 20: VK4, Stab 2: Mittelwert (out + in)/2 bei F_{max}

5.5 Dehnung entlang des Stabes

Die Abbildungen 21 bis 26 sind in gleicher Weise aufgebaut wie in Abschnitt 4.5. Die Dehnungsamplitude ist bis zu den Abbiegungen an beiden Ecken weitgehend abgeklungen:

- **Obere Rahmenecke** (Abbildung 21): $\Delta\epsilon$ der Faser **out** beträgt an den Messstellen 3' und 4' 63 bzw. 8 $\mu\epsilon$, d. h. 10% bzw. 1% des Maximalwerts von 655 $\mu\epsilon$ in Zone E.
- **Untere Rahmenecke** (Abbildung 24): $\Delta\epsilon$ beträgt 43 bzw. 78 $\mu\epsilon$, d. h. 6% bzw. 10% des Maximalwerts von 761 $\mu\epsilon$ in Zone E.

Der Maximalwert der Dehnung bei F_{max} (Faser **out**, 2'781 $\mu\epsilon$) liegt an der unteren Ecke des Flanschs in Zone E.

Stab 2 oben (obere Rahmenecke)

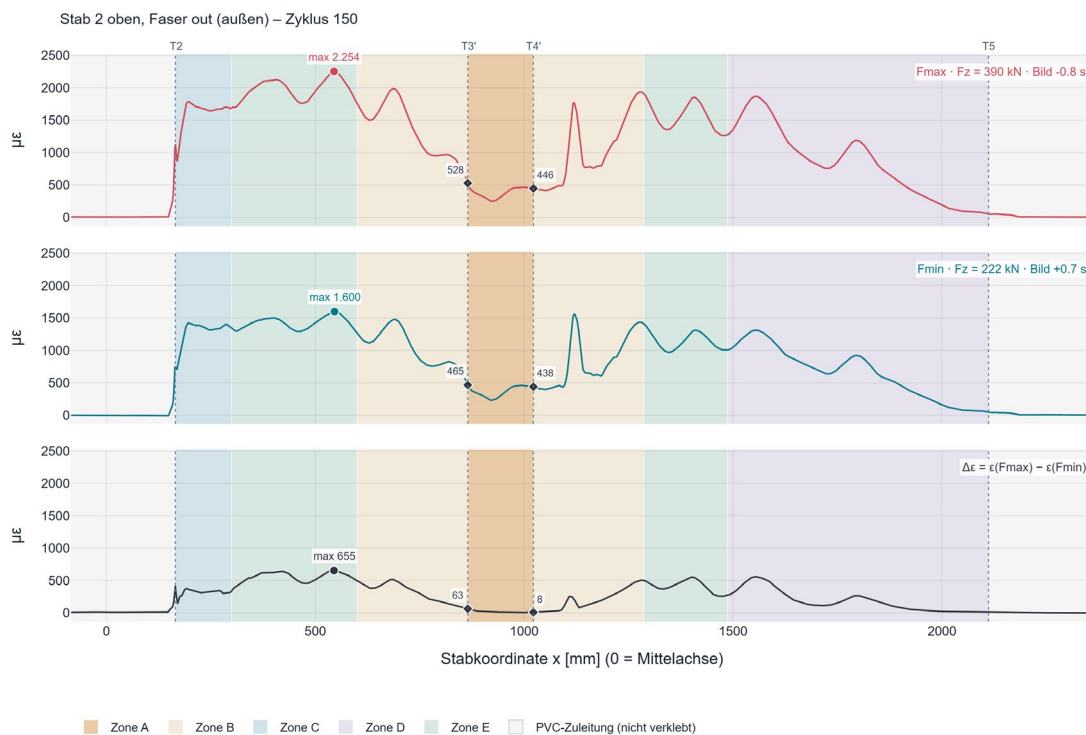


Abbildung 21: VK4, Stab 2 oben, Faser **out**: Dehnungsverlauf

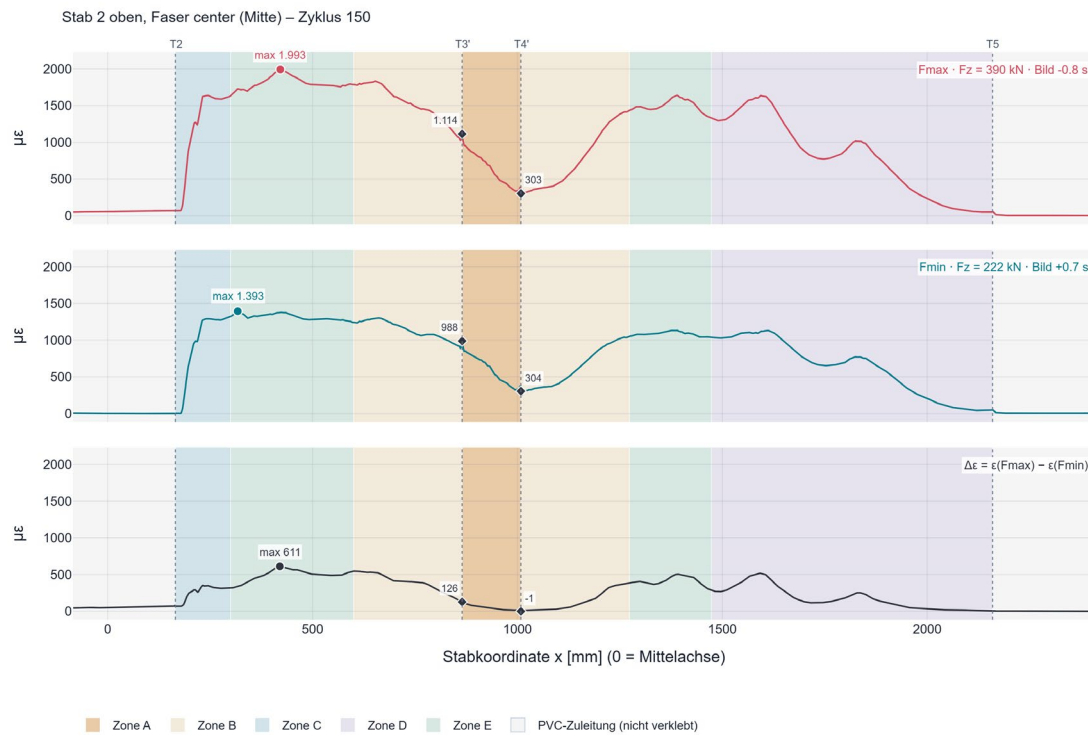


Abbildung 22: VK4, Stab 2 oben, Faser center: Dehnungsverlauf

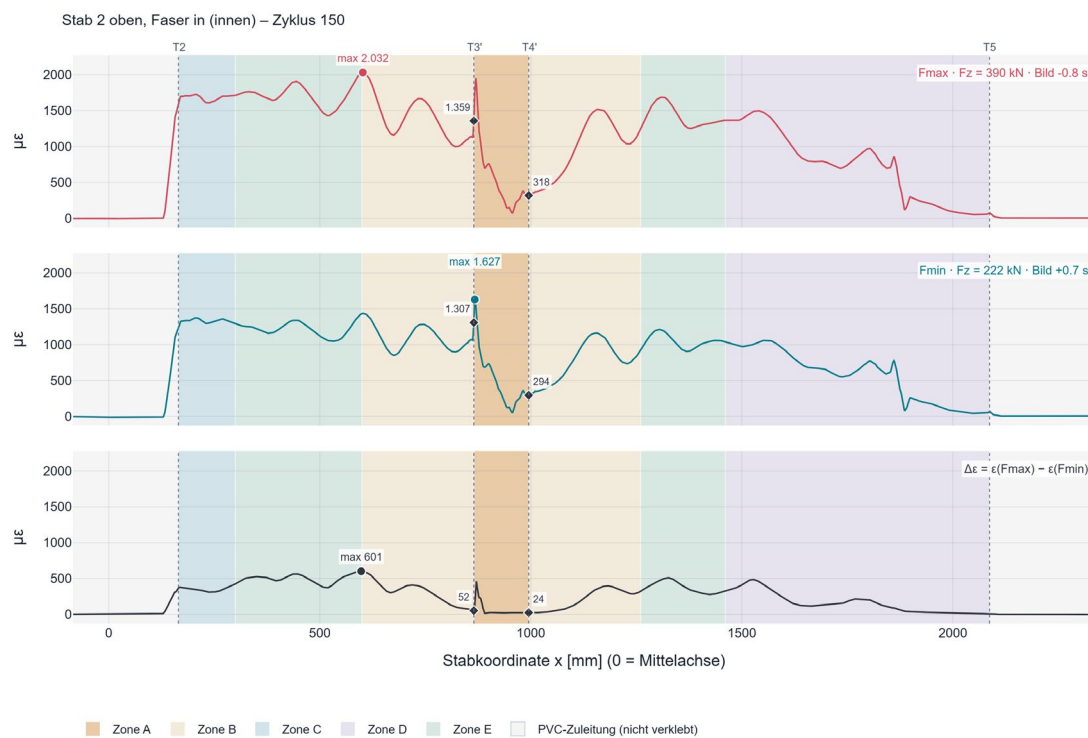


Abbildung 23: VK4, Stab 2 oben, Faser in: Dehnungsverlauf

Stab 2 unten (untere Rahmenecke)

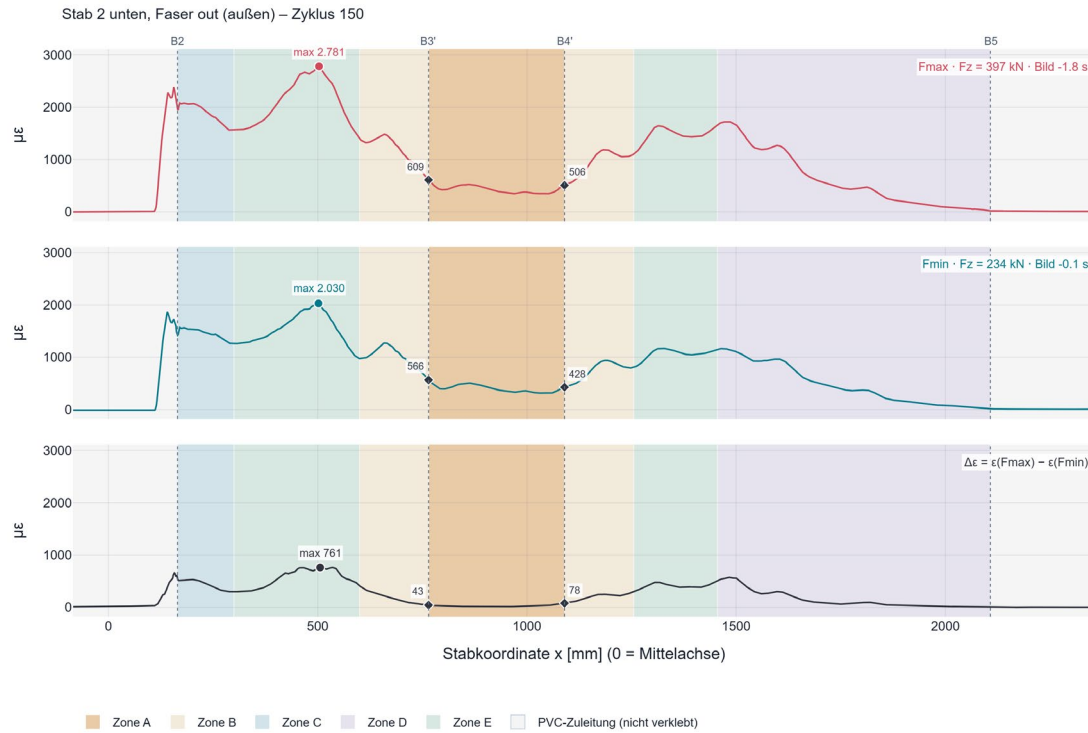


Abbildung 24: VK4, Stab 2 unten, Faser out: Dehnungsverlauf

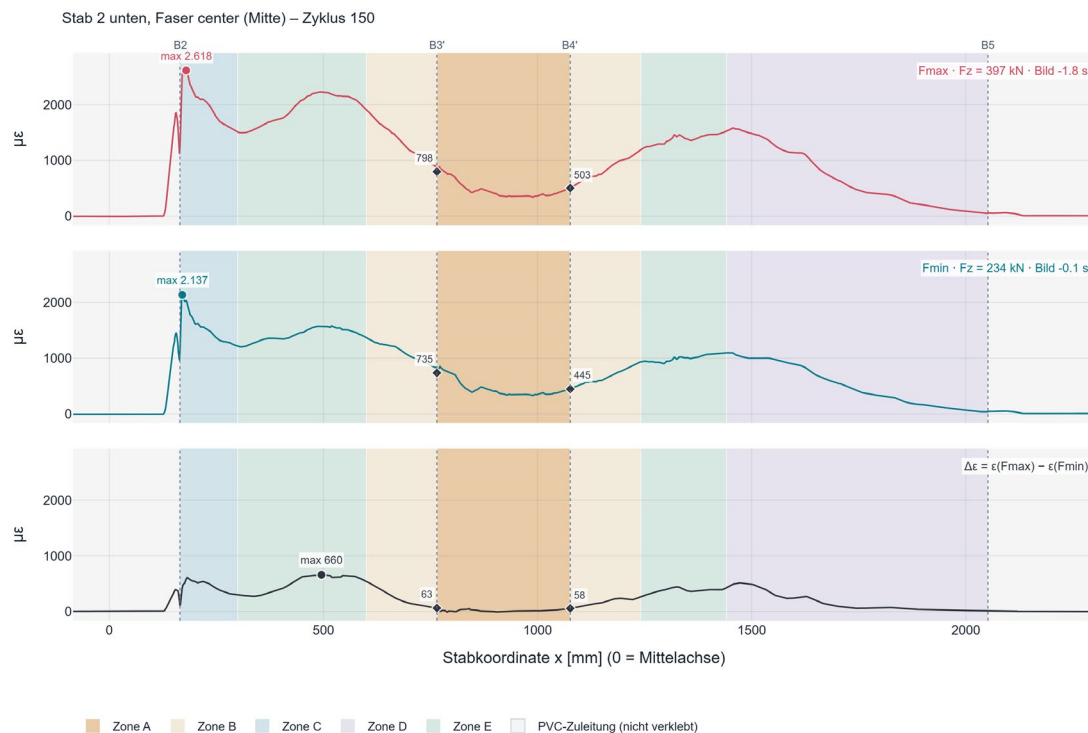


Abbildung 25: VK4, Stab 2 unten, Faser center: Dehnungsverlauf

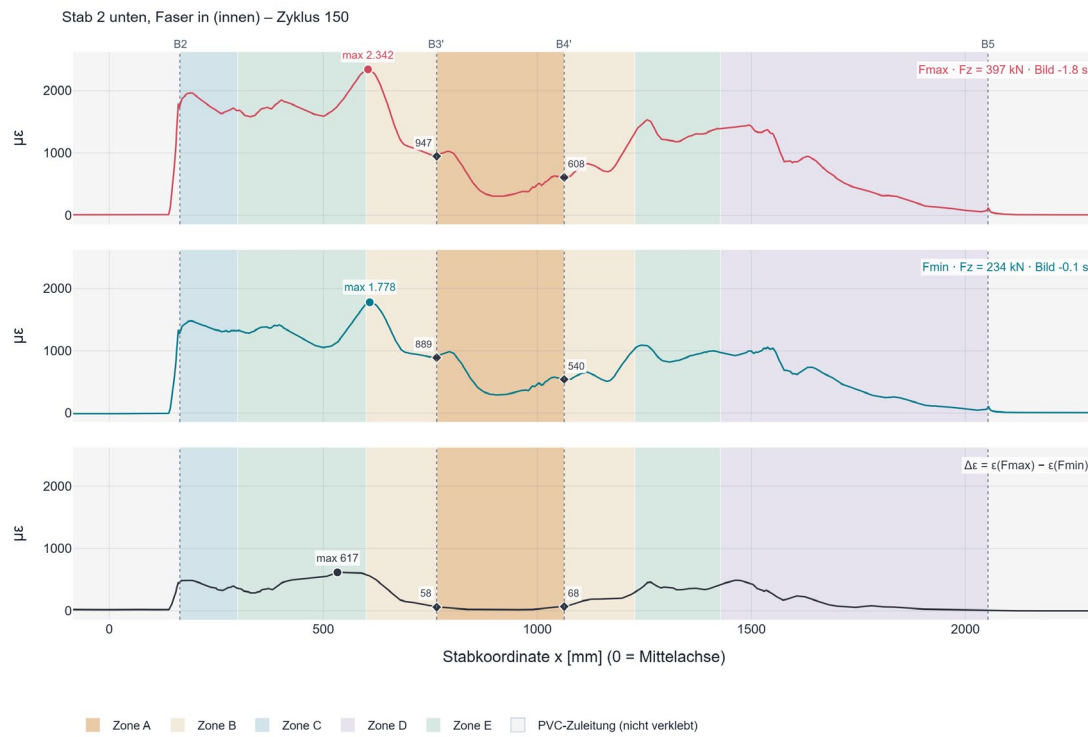


Abbildung 26: VK4, Stab 2 unten, Faser in: Dehnungsverlauf

6 Zusammenfassung der Vorauswertung

Tabelle 2: Stab 2, Faser out, Zyklus 150: Dehnungsamplitude an den Abbiegeradiusenden und Maximalwerte

	VK3 oben	VK3 unten	VK4 oben	VK4 unten
$\Delta\epsilon$ bei 3' / 4'	$\approx 40 / \approx 40 \mu\epsilon$	147 / 208 $\mu\epsilon$	63 / 8 $\mu\epsilon$	43 / 78 $\mu\epsilon$
Grösstwert $\Delta\epsilon$ (Zone)	782 $\mu\epsilon$ (D)	868 $\mu\epsilon$ (B)	655 $\mu\epsilon$ (E)	761 $\mu\epsilon$ (E)
$\Delta\epsilon$ an den Abbiegeradiusenden in % des Grösstwerts	$\approx 5 \%$	17–24 %	1–10 %	6–10 %
Grösstwert $\epsilon(F_{max})$	2'009 $\mu\epsilon$ (Stiel)	2'100 $\mu\epsilon$ (Flansch, B)	2'254 $\mu\epsilon$ (Stiel)	2'781 $\mu\epsilon$ (Stiel, E)

Abklingen der Dehnungen bis zur Abbiegung. Dehnungen und Dehnungsamplituden sind bis zu den Abbiegungen weitgehend abgeklungen. An den Abbiegeradiusenden (Messstellen 3' und 4') beträgt $\Delta\epsilon$ der Faser **out** noch 1 bis 24 % des Maximalwerts im geraden Stababschnitt (Tabelle 2). Die geringste Abnahme zeigt die untere Ecke von VK3 mit 147 bzw. 208 $\mu\epsilon$.

Die Ursache des in Abbildung 23 im Punkt T3' ersichtlich Peak in der Dehnung der Faser **in** zu Beginn der Abbiegung muss noch im Detail untersucht werden. Es ist unklar, ob die Ursache ein Messartefakt, ein Riss oder ein Applikationsfehler der Faser ist.

Mittel über den Abbiegeradius. Über den Abbiegeradius (Zone A) gemittelt ergeben sich bei F_{max} 643 $\mu\epsilon$ (VK3) bzw. 491 $\mu\epsilon$ (VK4). In der jeweils am stärksten gedehnten geraden Zone sind es 1'621 $\mu\epsilon$ (VK3, Stiel, Zone C) bzw. 1'707 $\mu\epsilon$ (VK4, Zone E). Die mittlere Dehnungsamplitude beträgt im Abbiegeradius 52 $\mu\epsilon$ (VK3) bzw. 28 $\mu\epsilon$ (VK4), in der am stärksten beanspruchten geraden Zone 578 $\mu\epsilon$ (VK3, Zone C) bzw. 467 $\mu\epsilon$ (VK4, Zone E). Das Mittel über den Abbiegeradius unterschätzt die Werte an den Abbiegeradiusenden, insbesondere an der unteren Ecke von VK3. Für die weitere Auswertung sind deshalb die Werte an den Abbiegeradiusenden massgebend.

Kleinste Werte im Abbiegeradius. In allen 12 ausgewerteten Fasern (2 Versuchskörper $\times$ 2 Ecken $\times$ 3 Fasern) weist der Abbiegeradius die kleinste mittlere Dehnungsamplitude auf. In 11 der 12 Fasern weist er auch die kleinste mittlere Dehnung bei F_{max} auf. Die Ausnahme ist die Faser **in** von VK3, Stab 2 unten: Dort ist das Mittel im Flansch (Zone D) kleiner, weil die Dehnung gegen die Messstelle 5 hin auf null abklingt.

Lage der Maximalwerte. Die Maximalwerte der Dehnung bei F_{max} treten in den geraden Bewehrungsabschnitten auf:

- VK3: im Eckbereich unmittelbar am Übergang Rahmeneck / Flansch (Zone B)
- VK4: im Bereich der Voute (Zone E), weiter vom Abbiegeradius entfernt

Vergleich VK3 und VK4. VK4 wurde mit einer um 15 bis 22 % grösseren Lastamplitude ΔF geprüft. Trotzdem sind die Dehnungsamplituden kleiner, sowohl im geraden Abschnitt (Maximalwerte 655 und 761 $\mu\epsilon$ gegenüber 782 und 868 $\mu\epsilon$) als auch im Abbiegeradius (Mittel 28 gegenüber 52 $\mu\epsilon$). Eine naheliegende Erklärung ist die Voute: Sie vergrössert den inneren Hebelarm im Eckbereich und verschiebt die grösste Beanspruchung vom Abbiegeradius weg in Zone E. Die Einflüsse von Voute, Stabdurchmesser, Biegerollendurchmesser und Lastniveau lassen sich anhand dieser Vorauswertung nicht voneinander trennen.

7 Ausblick

Die Auswertung von VK1 und VK2 ist in Bearbeitung. Der Schlussbericht wird für alle vier Versuchskörper und alle instrumentierten Stäbe folgende Punkte behandeln:

- Konfiguration der Versuchskörper und Werkstoffkennwerte
- Ermittlung der Stahlspannungen und Spannungsamplituden
- die Frage, welche Dehnung (Stabachse oder Randfaser im Abbiegeradius) für die Ermüdung massgebend ist
- Folgerungen für Bemessung und Überprüfung

Das Projekt wurde verlängert. Der Schlussbericht ist für Ende Dezember 2026 bis Mitte Januar 2027 vorgesehen.