

Verzinkungsgerechte Konstruktion integraler Rahmenbrücken mit mittlerer Spannweite mit fertigungsgerechtem Fügen durch Hochleistungs-Vergussmörtel



GAV-Forschungskolloquium 2023

Florian Oberhaidinger
Lehrstuhl für Metallbau
Technische Universität München

www.cee.ed.tum.de/metallbau

Florian Oberhaidinger | Technische Universität München | GAV-Forschungskolloquium | 16.10.2023



Wartungsfreie Brückenbauwerke?

Früher

Engelsbrücke in Rom aus dem Jahr 134 n. Chr.
Bogenbrücke aus Travertine



Quelle: Bernd Nebel - © Uwe Thon

Heute

BAB 44 Kassel-Herleshausen
feuerverzinkte Rahmenbrücke in Verbundbauweise



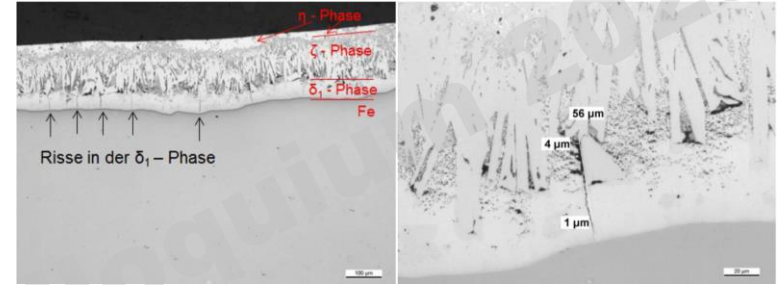
Quelle: BASt Bericht 170 – Feuerverzinkten als dauerhafter Korrosionsschutz
für Stahlverbundbrücken

Thermische Spritzverzinkung am Schweißstoß muss
gewartet werden

Ermüdungsverhalten feuerververzinkter Stahlbauteile

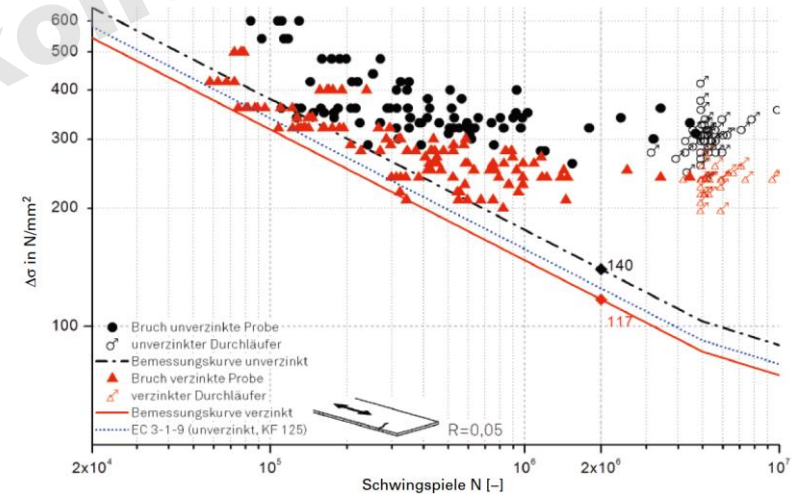
Mikro-Defekte in der δ_1 -Phase bis zur ζ -phase

- infolge Abkühlphase nach dem Verzinkungsprozess
- verantwortlich für geringere Ermüdungsfestigkeit



Forschung der letzten Jahre

- 15 feuerverzinkte Stahlbau-Details wurden mit Fokus auf den Verbundbrückenbau untersucht
- Referenzkerbfall EN 1993-1-9 kann für Kerbfall 80 und kleiner verwendet werden
- im Allgemeinen keine Auswirkung auf die Dimensionierung von Verbundbrücken



D. Ungermann e. al., „Forschungsvorhaben P 835 / IGF-Nr. 351 ZBG - Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau“ Verlag und Betriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2014

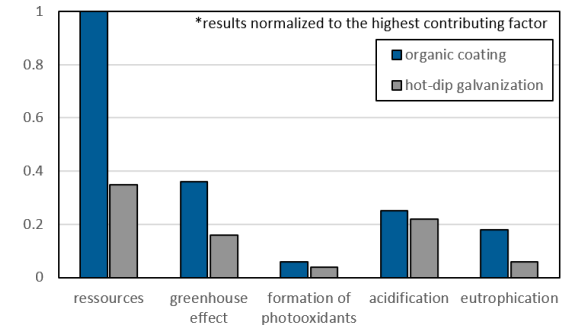
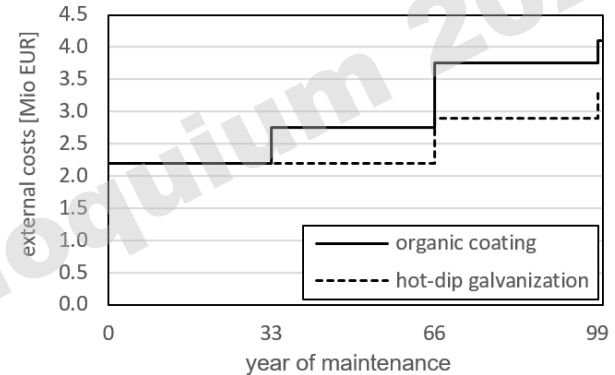
Ökonomische und ökologischer Vergleich

Ökonomische Untersuchungen der Feuerverzinkung im Vergleich zur organischen Beschichtung

- Investitionskosten ca. +11.5 %
- Lebenszykluskosten ca. -12.5 %
- Externe Kosten ca. -20.0 %

Ökologische Untersuchungen der Feuerverzinkung im Vergleich zur organischen Beschichtung

- Vorteile in allen Nachhaltigkeitsaspekten
- 88% des Feuerverzinkten Stahls und fast 100% des Zinks kann recycled werden
- Energiebedarf für Sekundärzink nur 5 % des Bedarfs von Primärzink



Quellen: BAST Heft 112 (2015) - Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken & EGGA - Feuerverzinkter Stahl und nachhaltiges Bauen - Lösungen für eine Kreislaufwirtschaft

Stöße für feuerverzinkte Brückenbauwerke

Gleitfeste vorgespannte Schraubverbindung

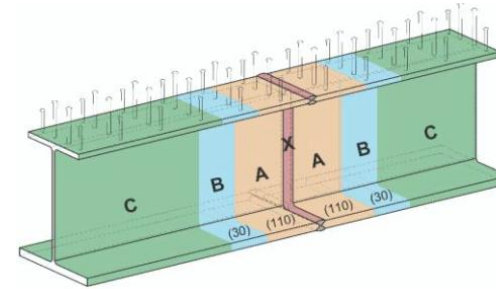
- nur für I-Profile geeignet
- Berücksichtigung der Reibbeiwerte nach Forschungsprojekt IGF 19444 (kleinere Werte als derzeit in EN 1090-2 hinterlegt)



Quellen: XXX

Schweißstoß

- Thermische Spritzverzinkung mit Zn or Zn/Al und Schichtdicken > 200 µm sowie Porenfüller
- Schutzdauer der thermischen Spritzverzinkung
 - 15-25 Jahre in Kategorie H
 - > 25 Jahre in Kategorie VH
- nicht vollständig wartungsfrei



- X: Schweißnahtbereich
- A: durch Spritzmetallisierung auszubessernder Montageschweißstoßbereich
- B: Übergangsbereich Spritzmetallisierung – Stückverzinkung
- C: unbeeinflusster Stückverzinkungsüberzug

Quellen: Rademacher – zur sicheren Anwendung feuerverzinkter Bauteile im Stahl- und Verbundbrückenbau

Entwicklung eines Vergussstoßes für verzinkte Rahmenbrücken in Verbundbauweise

- Projektübersicht
- Vergussstoß – Konstruktion und Bauweise
- Herstellung und Montage

Projektübersicht IGF-Vorhaben 20312 N



Forschungsstellen

- FE 1 – Lehrstuhl für Metallbau TUM
- FE 2 – Lehrstuhl für Massivbau TUM
- FE 3 – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung



Projektlaufzeit

01.11.2018 bis 30.06.2022

IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung

Schlussbericht vom 30.11.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20312 N

Thema
Verzinkungsgerechte Konstruktion integraler Rahmenbrücken mit mittlerer Spannweite mit fertigungsgerechtem Fügen durch Hochleistungs-Vergussmörtel

Berichtszeitraum
01.11.2018 bis 30.06.2022

Forschungsvereinigung
Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.

Forschungseinrichtung(en)
Technische Universität München, Lehrstuhl für Metallbau
Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Gefördert durch:
 Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

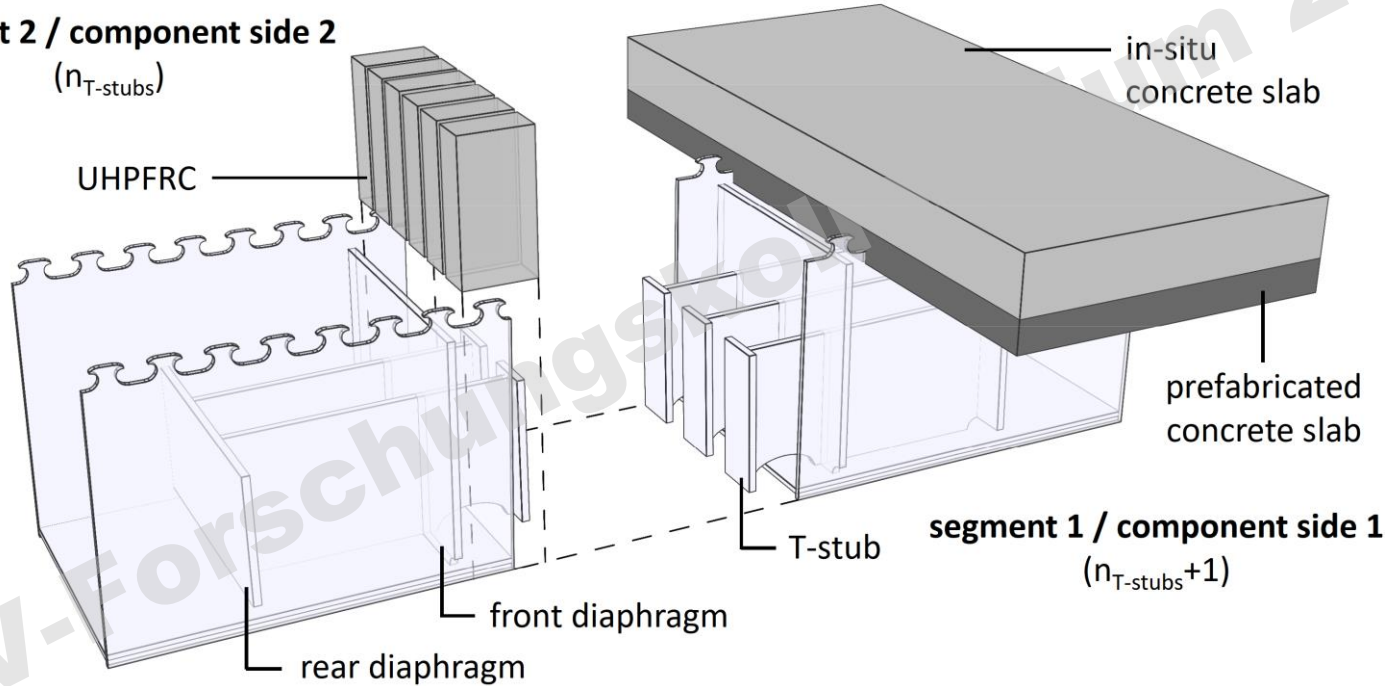
AF
Forschungsnetzwerk
Ministerium

Vergussstoß

segment 2 / component side 2

$(n_{\text{T-stubs}})$

UHPFRC



Materialien und Bewehrung

Compound EFFIX PLUS von Heidelberg Cement

UHPFRC C130/145 mit HAREX Stahlfasern

Beschichtung ZX-20 von Reicolor

Vermeidung der Wasserstoffbildung

(Zink – Frischbetonphase)

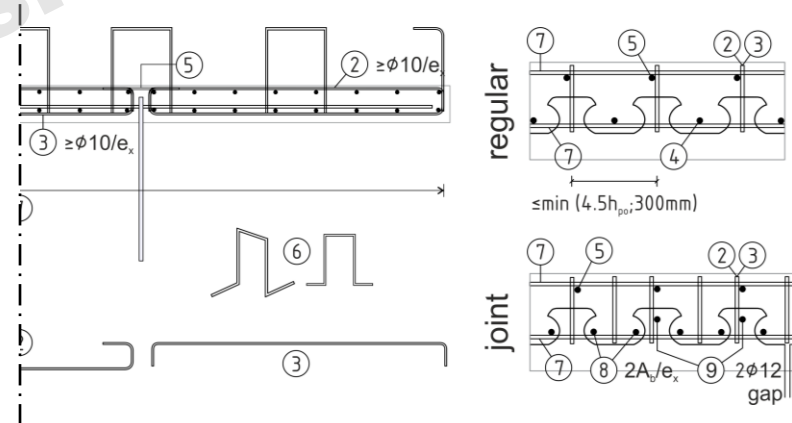
Bewehrung

Zusätzliche Querbewehrung und
Durchsteckbewehrung im Bereich der ersten drei
Verbunddübel am Stoß

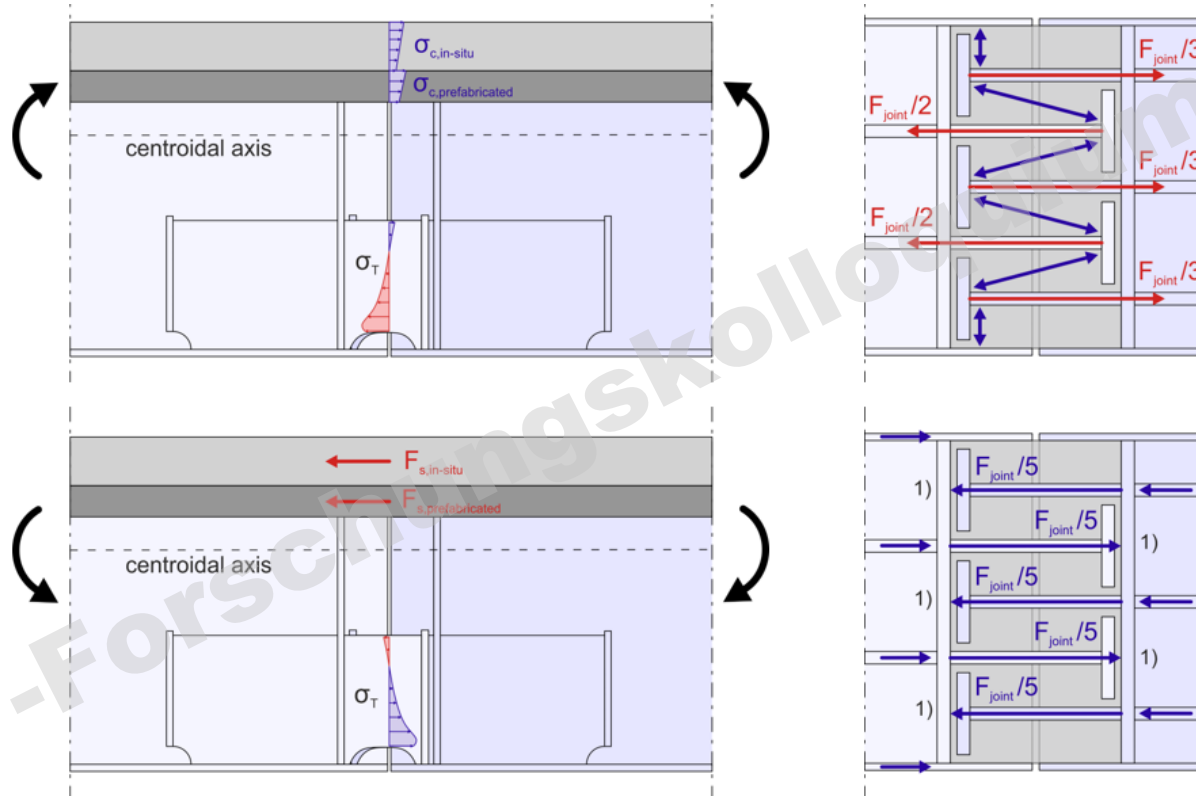
(standard) synthetic formwork



hot-dip galvanized formwork



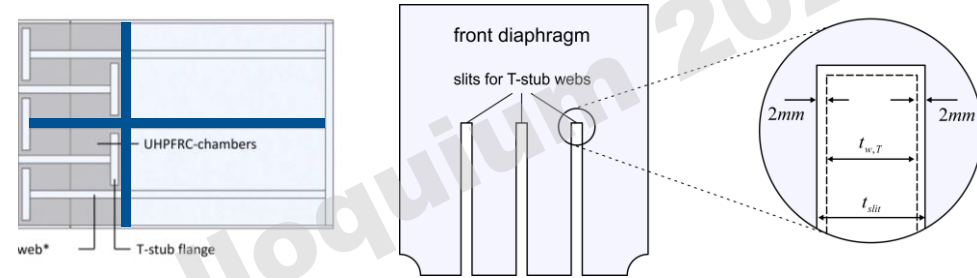
Abtrag des globalen Biegemoments



Fertigung

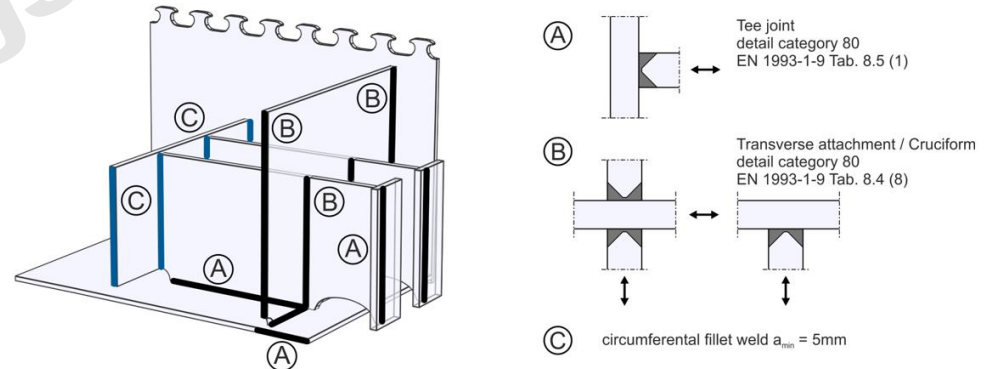
Toleranzen

- Minimierung der Imperfektionen
- ± 5 mm bei der Montage der Segmente
- max. 8% Spannungserhöhung (elastisch)



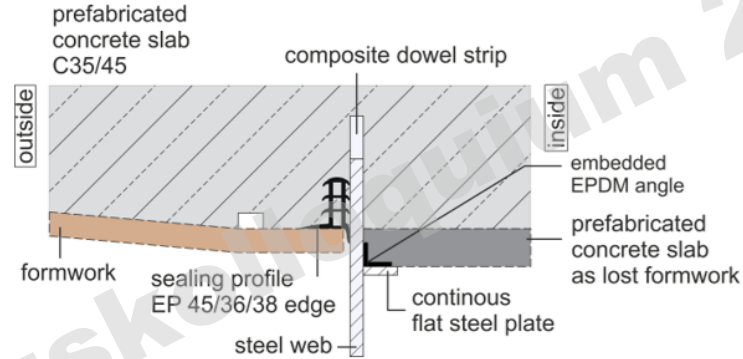
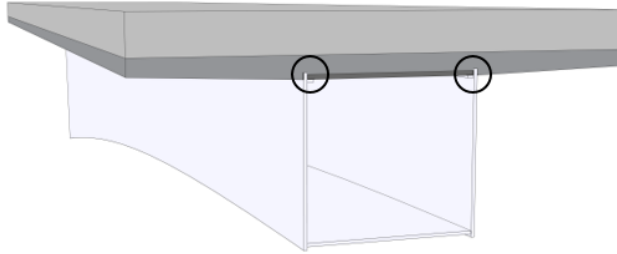
Schweißnähte

- alle Ermüdungsbeanspruchten Schweißnähte als Vollnähte
- übrigen Schweißnähte mit umlaufenden Kehlnaht $a = 5$ mm

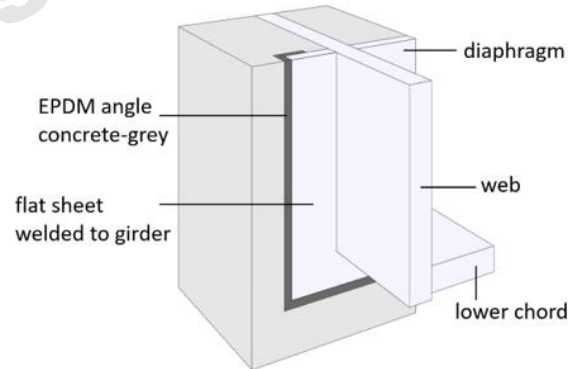
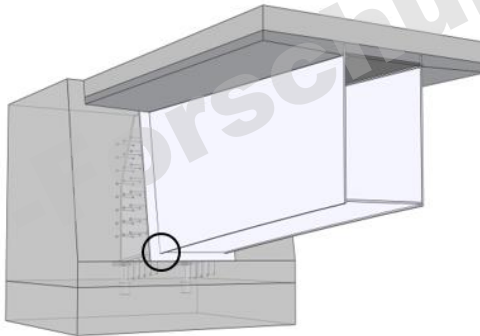


Detailausführung

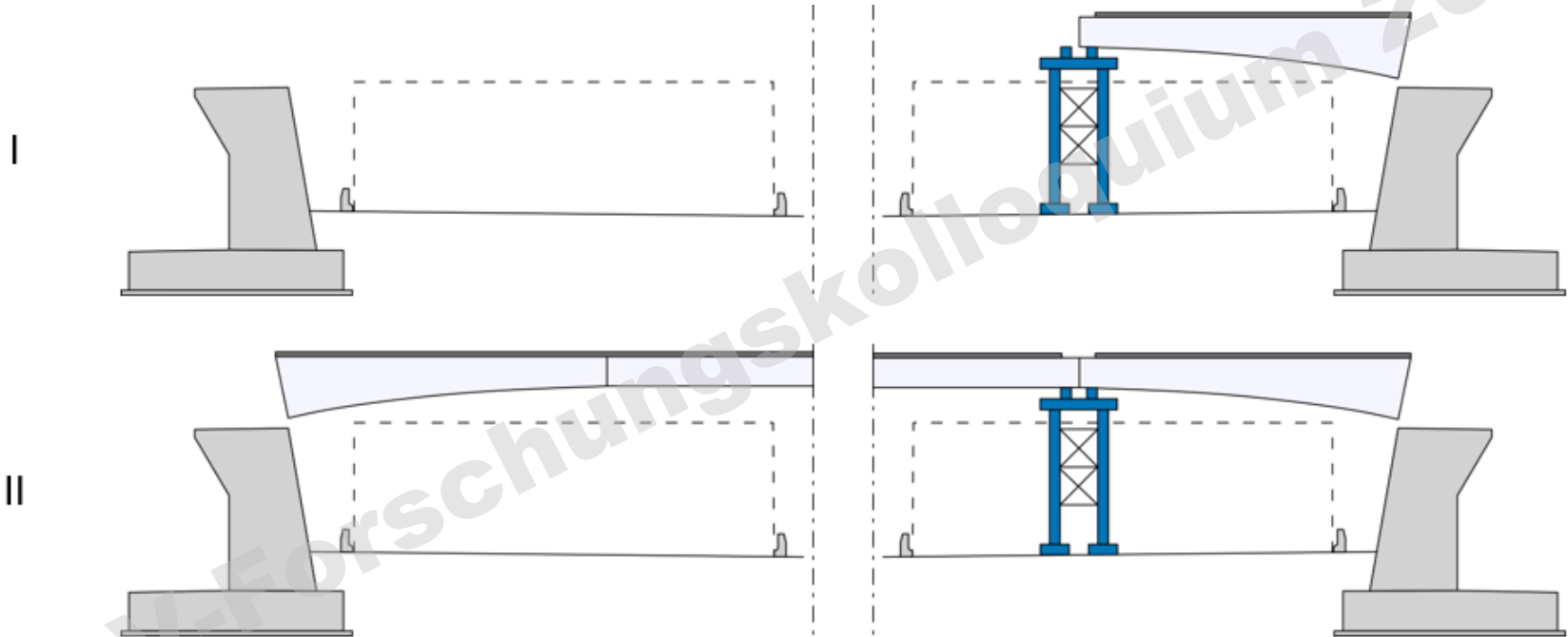
Kastensteg zur Betonfertigteilplatte



Auflager

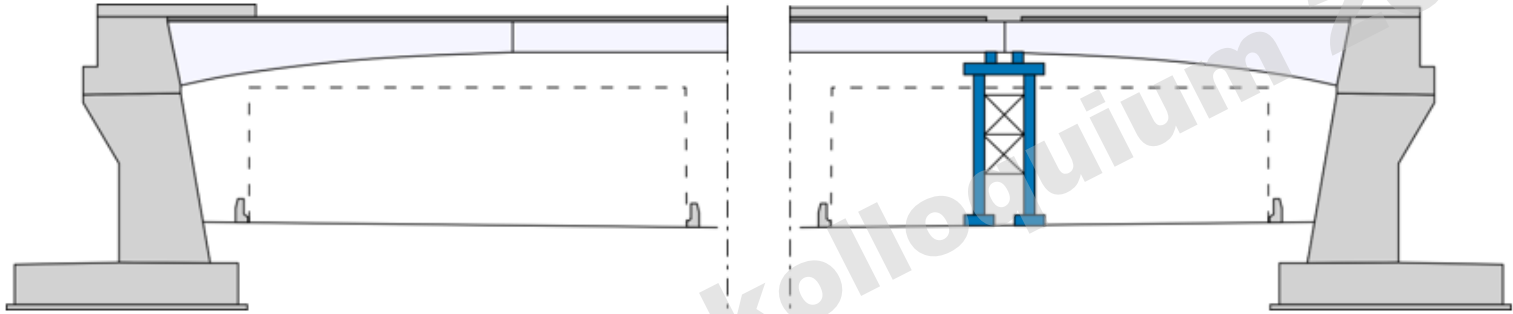


Montage

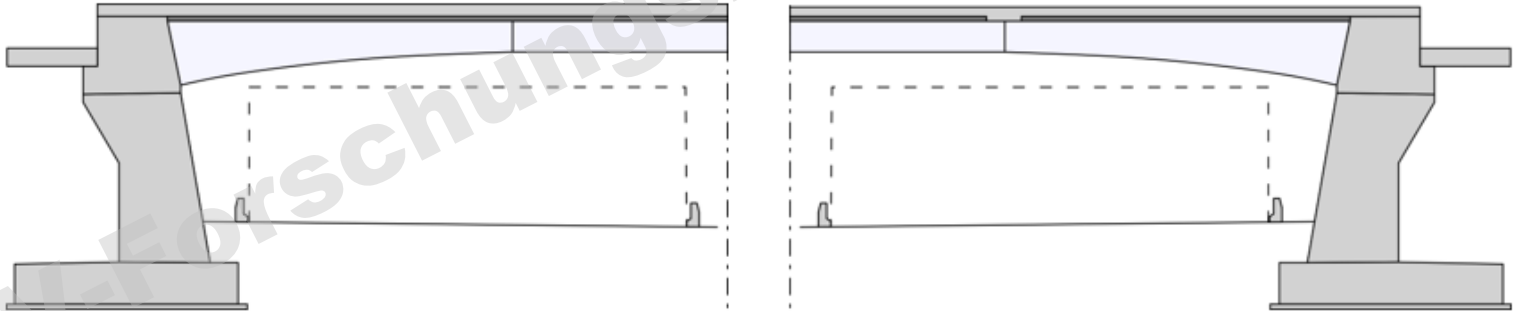


Montage

III



IV



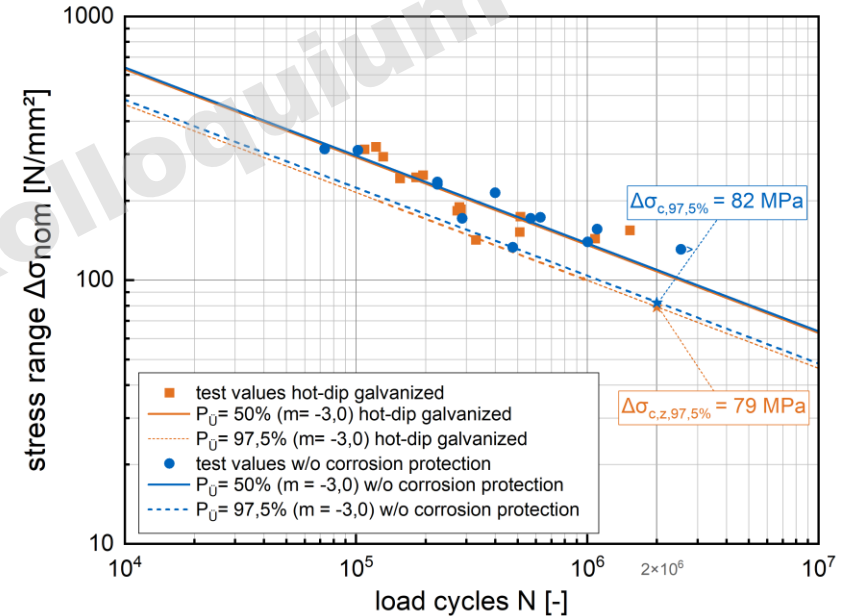
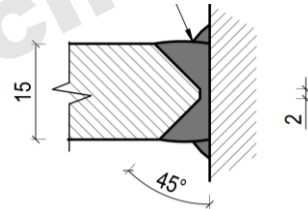
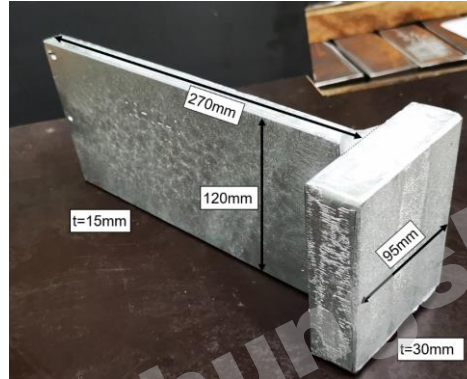
Experimentelle Versuche

- Ermüdungsversuche der T-Knaggen
- UHPFRC Materialeigenschaften
- Großträgerversuche

Ermüdungsversuche T-Knaggen

26 Prüfkörper (15 verzinkt / 11 schwarz)

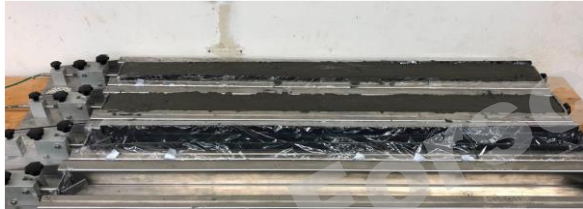
Kerbfall 80 (Referenzkerbfall EN 1993-1-9)



Druckfestigkeit und E-Modul

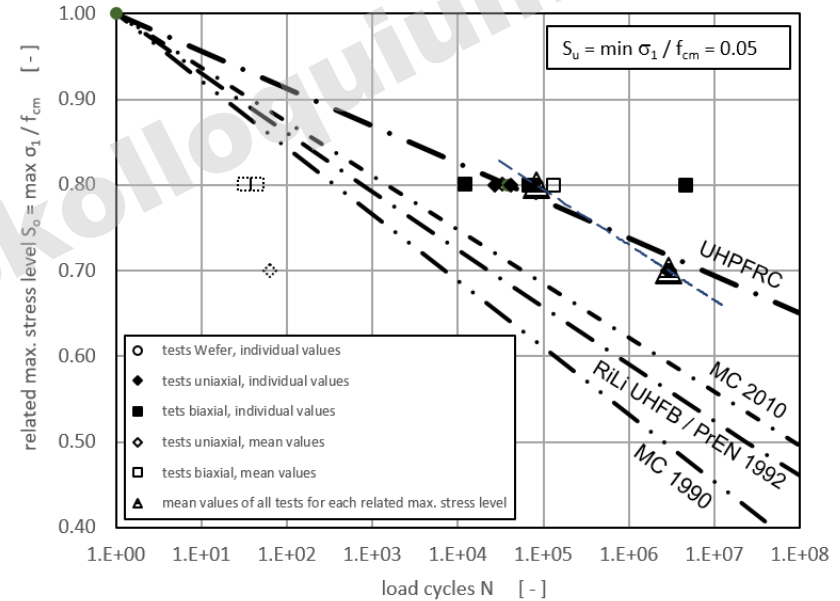
	f_{ck}	$f_{ck,cube}$	f_{cm}	E_{cm}
Entwurf DAfStb UHFB				
C130/145	130	145	142	46,000

Schwindverformung



- mit Adhäsion und Reibung: $\varepsilon_{cs} \cong 1.3 \text{ ‰}$
- ohne Adhäsion und Reibung: $\varepsilon_{cs} \cong 0.6 \text{ ‰}$

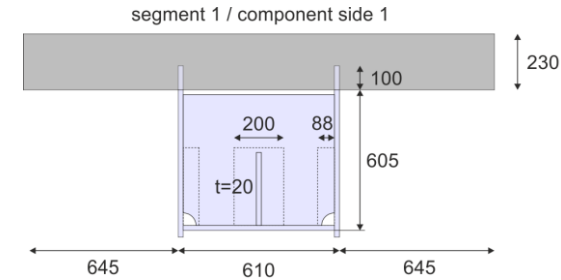
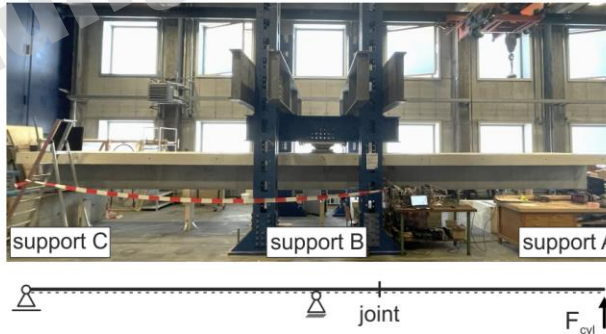
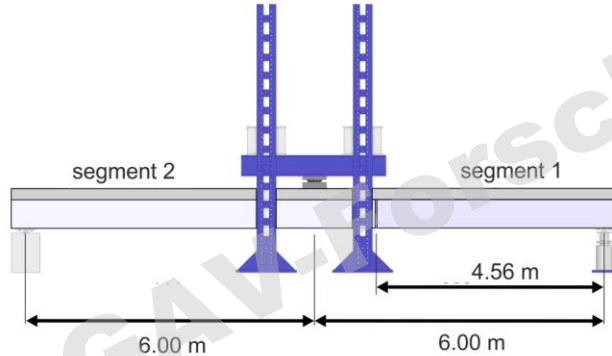
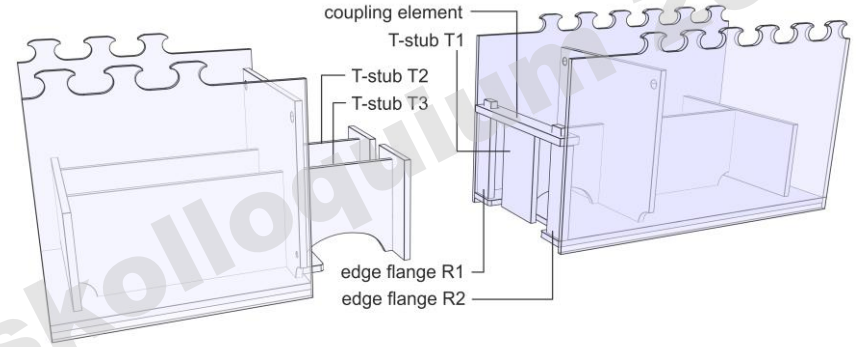
Ermüdung



Großträgerversuche

Versuchskonfiguration

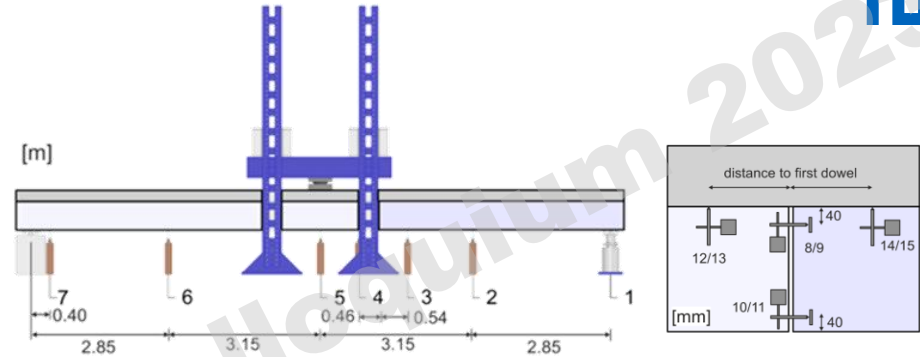
- zwei Prüfkörper mit 13 m Länge
- realistische Dimensionen um Skaleneffekte zu vermeiden
- Konstruktion mit Kopelement und Randflanschen



Messungen

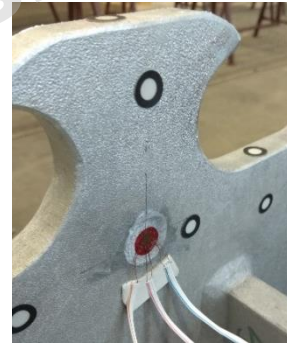
Globale and lokale Verformungen

- globale Trägerverformung
- Spaltöffnung
- Verformungen der Verbunddübelleiste am Stoß



Dehnmessstreifen

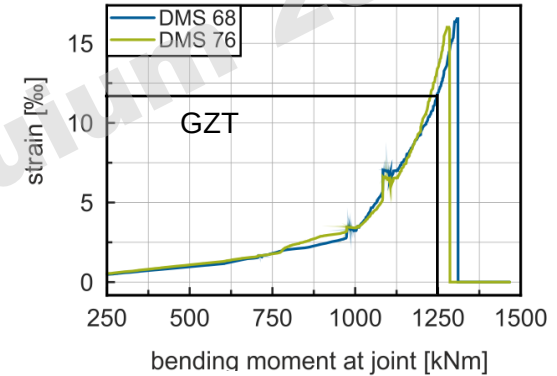
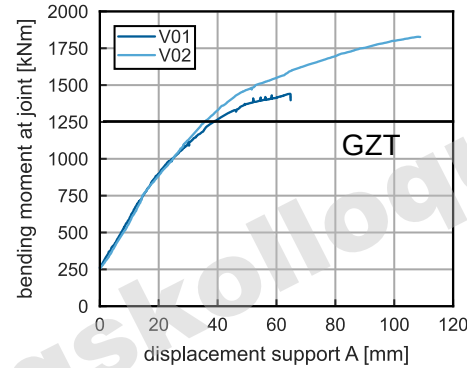
- Plastizieren der Stahlbauteile
- Dehnungs- und Spannungen
- Kraftverteilung im Stoß



Ergebnisse

Globale Verformung und Traglast

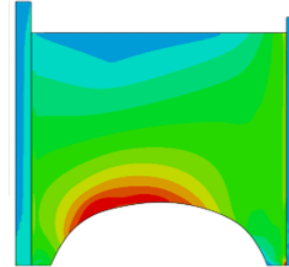
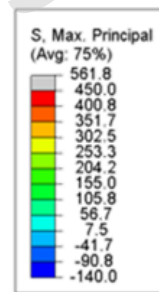
- erstes Plastizieren bei 800 kNm
- moderate plastische Verformung bei 1250 kNm
- sehr hohe Traglast



Spannungsverteilung nach FEM

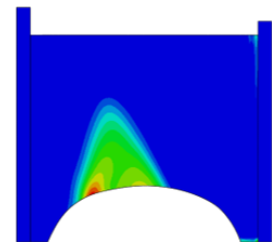
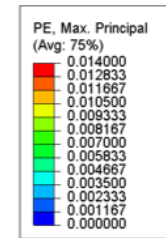
- max. Spannung im unteren Bereich der T-Knagge an der Ausrundung
- ca. 10-14 ‰ plastische Dehnung bei 1250 kNm (ohne elastischen Anteil)

max. principal stresses



$M_y = 500 \text{ kNm}$
 $V_z = 76 \text{ kN}$

max. principal plastic strain



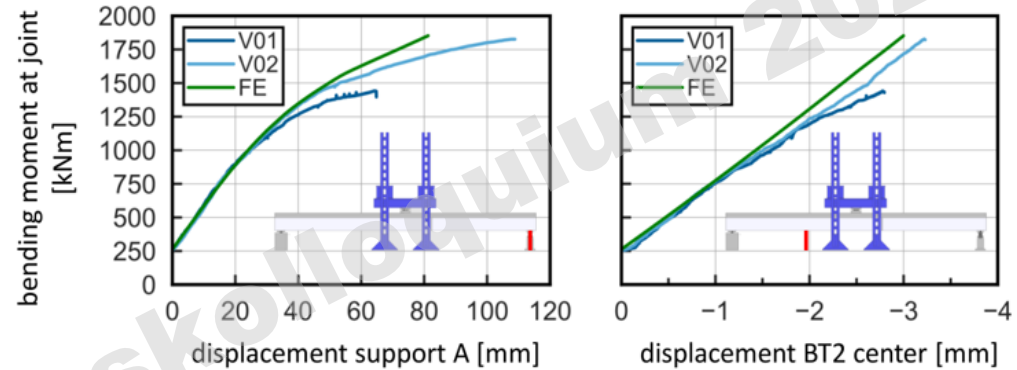
$M_y = 1250 \text{ kNm}$
 $V_z = 241 \text{ kN}$

Entwicklung des Bemessungskonzepts und weitere Randbedingungen

Finite Elemente Simulationen

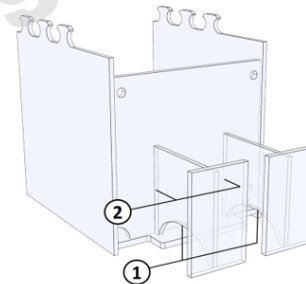
Validierung der globalen Verformung

- bis 1000 kNm keine Abweichung
- bis 1250 kNm keine signifikante Abweichung



Validierung der lokalen Spannungen

- Abweichung maßgebende Bauteile $\leq 9\%$
- Abweichung der relevanten Komponenten $< 20\%$



①

fillet of T-stubs
T2/3

fatigue
ULS

+7.5 %
+1.5 %

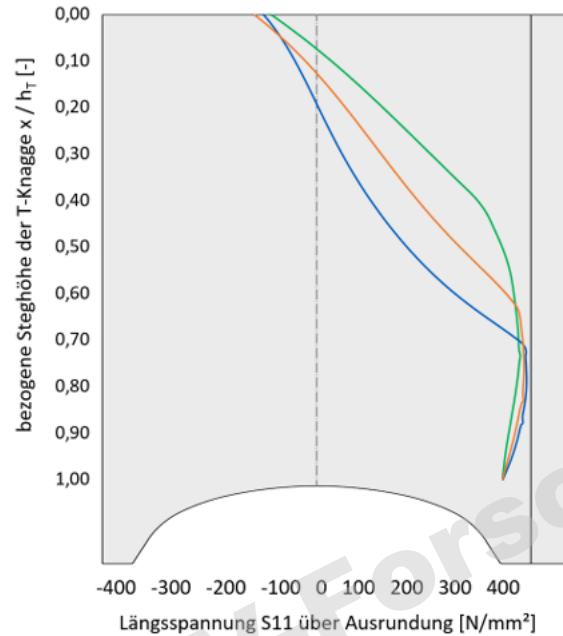
②

notch between
diaphragm and
T-stubs T2/3

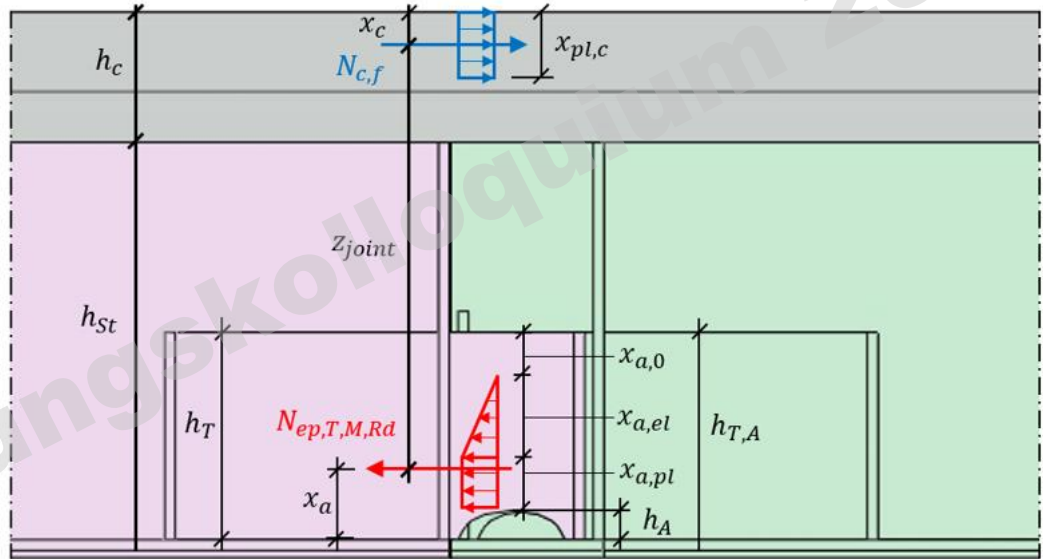
fatigue

+9.0 %
+7.0 %

GZT Nachweis - globales Biegemoment



— $h_T = 0,33 h_{St}$ — $h_T = 0,50 h_{St}$ — $h_T = 0,66 h_{St}$



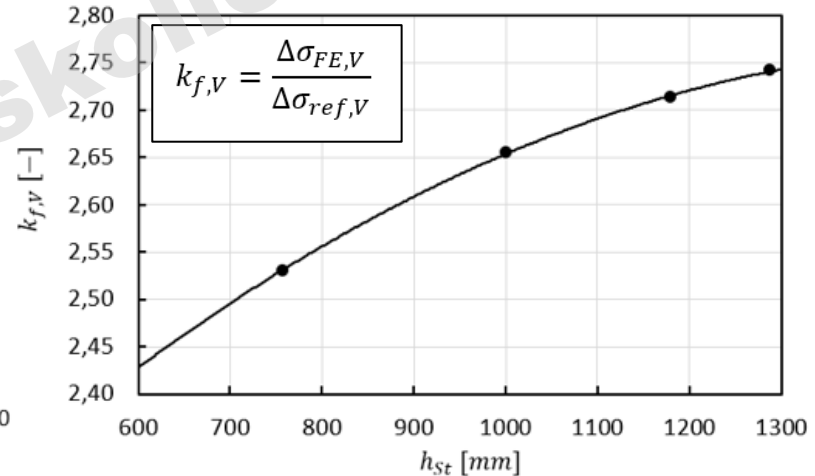
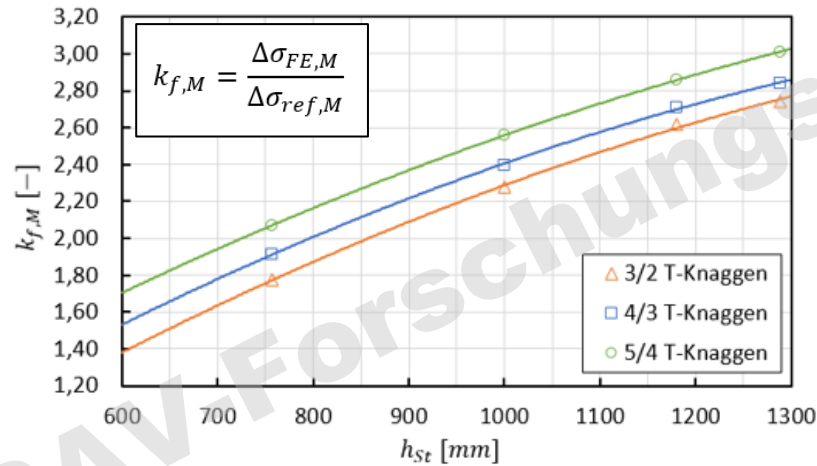
$$N_{ep,T,M,Rd} = x_{a,pl} \cdot t \cdot f_{yd} + 0,5 \cdot x_{a,el} \cdot t \cdot f_{yd} \approx 0,55 h_{T,A} \cdot t \cdot f_{yd}$$

$$\eta_M = \frac{M_{Ed} / Z_{joint} \cdot \chi_M}{N_{ep,T,M,Rd}}$$

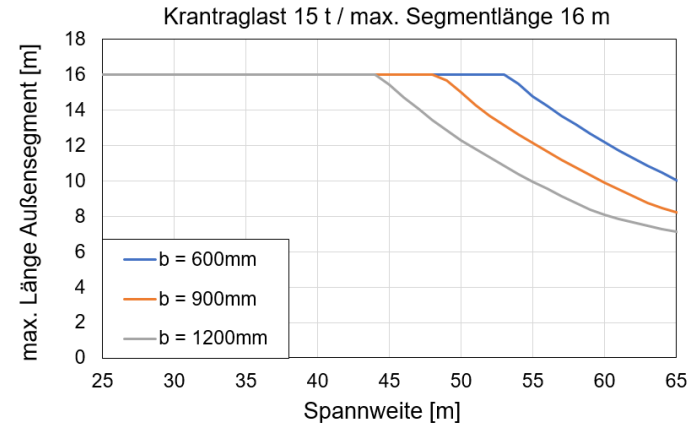
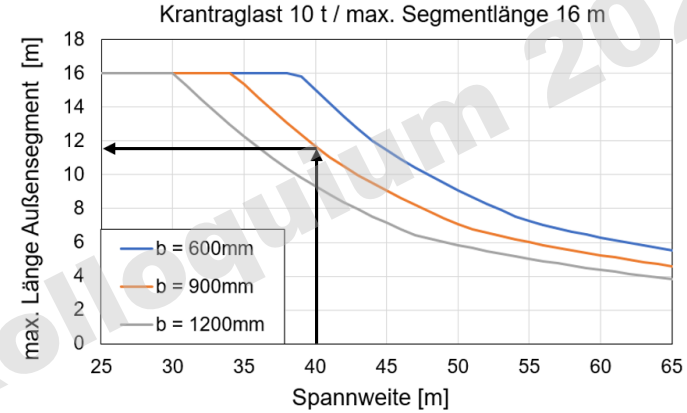
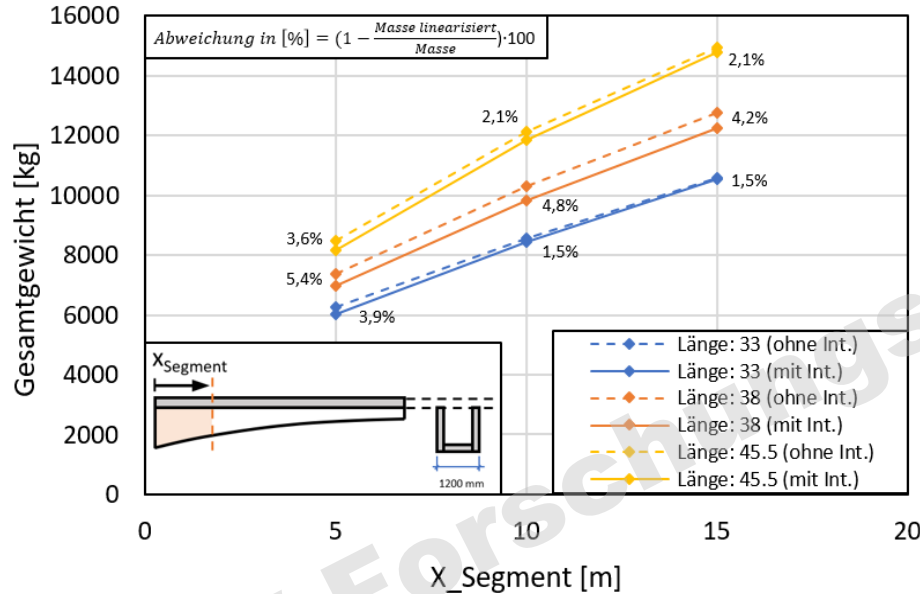
Ermüdungsnachweis

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{imp,joint} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_{c,z}/\gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = \gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \left(\frac{M_{ELM3} \cdot \chi_M}{z_{joint} \cdot t_{T,w} \cdot 0,55h_{T,A}} \cdot k_{f,M} + \frac{V_{ELM3} \cdot \chi_V \cdot l_T/2}{\alpha \cdot W_{el,T,A}} \cdot k_{f,V} \right)$$



Maximale Randsegmentlänge infolge Krantraglast



Zusammenfassung und Ausblick

GAV-Forschungskolloquium 2023

Feuerverzinkte Rahmenbrücken mit Vergussstoß

Zusammenfassung

- planmäßig wartungsfreie Brückenkonstruktion über die gesamte Lebensdauer
- Vorteile einer Rahmenbrücke in Verbundbauweise bleiben erhalten
- Kosten in etwa äquivalent zur Ausführung mit Schweißstoß
- geringere Lebenszykluskosten und signifikante Reduktion volkswirtschaftlicher Kosten
- einfache Integration in die Planung

Anwendung

- wirtschaftlicher Einsatz bis ca. 45 m Spannweite (6-spurige Autobahnüberführung)
- Ausführung bis ca. 38 m Spannweite mit maximalen Krantraglast von ca. 10 to möglich
- Ausführung bis ca. 45 m Spannweite mit maximalen Krantraglast von ca. 15 to möglich

Ausblick

- Pilotprojekt in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Besonderer Dank gilt den Firmen, die das Projekt in Form von Dienst- und Sachleistungen unterstützen!



Mitgliedsunternehmen



Forschungsnetzwerk
Mittelstand

