Rissbreitenbegrenzung durchlaufender Stahlverbundträger mit Teil- und Ganzfertigteilen

Matthias Mager und Karsten Geißler

TU Berlin – Institut für Bauingenieurwesen, FG Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau
E-Mail: matthias.mager@tu-berlin.de

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Beitrag stellt umfassende Untersuchungen zur Erfassung der Rissbreiten bei Verbundträgern mit Teil- und Ganzfertigteilen vor. Zunächst wird beschrieben, wie Rissbreiten und Verformungsverhalten herkömmlicher Verbundträger ausgehend von der Formulierung des Verbundverhaltens eines Stahlbetonelementes mit den Gleichgewichts- und Verträglichkeitsbedingungen am Verbundquerschnitt bestimmt werden können. Über die geometrischen und materialtechnischen Besonderheiten von Fertigteilverbundträgern werden die wesentlichen Problemstellungen herausgearbeitet und Lösungsansätze zur rechnerischen Erfassung präsentiert. Die Beschreibung experimenteller Untersuchungen rundet den Beitrag ab.

1 Problembeschreibung

Bei Verwendung von Fertigteilen in Stahlverbundträgern können aufgrund der werkseitigen Herstellung und der Trennung der Bauvorgänge Bauzeit, Qualität und Materialeigenschaften verbessert und so die Baukosten verringert werden. Anwendungsgebiete liegen dabei sowohl im Hochbau, beispielsweise bei Parkhäusern, als auch im Brückenbau. Im Straßenbrückenbau ist der Stahlverbundbrückenbau bereits heute das große Anwendungsbiet für den Stahlbau, aber auch im Eisenbahnbrückenbau wird sich in den nächsten Jahren diese Bauweise weiter durchsetzen. In Deutschland ist dabei mittlerweile die Verwendung von Teilfertigteilen im Verbundbrückenbau bei kleineren Stützweiten durchaus üblich. Im Großbrückenbau gibt es für die Verwendung von Ganzfertigteilen bisher nur vereinzelte Beispiele wie beispielsweise die Bahretalbrücke. Im Ausland sowie bis zur Wende auch in der ehemaligen DDR sind Ganzfertigteile mit überwiegend guten Erfahrungen bereits vielfach angewendet worden. Die im Innenstützenbereich von Durchlaufträgern bzw. in den Rahmenecken von Rahmenbauwerken auftretenden negativen Momente (fallweise auch an den Endauflagern schiefwinkliger Tragwerke) bewirken eine Zugbeanspruchung des Betongurtes und führen im Regelfall zur Rissbildung.

Diese ist im Rahmen der Bemessung unmittelbar durch die rechnerischen Nachweise der Rissbreitenbegrenzung zu verfolgen sowie auch mittelbar bei Verformungsberechnung und Schnittkraftermittlung. Für herkömmliche Stahlverbundträger mit reiner Ortbetonplatte ist das Betonverhalten bei Zugbeanspruchung seit Jahrzehnten ausreichend bekannt und kann mit dem Rechenmodell *Erstrissbildung – abgeschlossene Rissbildung* erfahrungsgemäß sehr gut abgebildet werden (siehe [Hanswille, 1986]). Mit den hierfür geltenden Voraussetzungen führt die Analyse der verschiedenen Aspekte der Fertigteiltechnologie zu diversen offenen Fragestellungen: Berücksichtigung der Fugen, unterschiedliche Materialparameter, Schwindverhalten, mittleres Bauteilverhalten in Längs-, Quer- und Dickenrichtung.

Es gab bisher keine allgemeingültigen Untersuchungen, ob und in welcher Form sich die Fertigteilbauweise im Innenstützenbereich hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit unterscheidet und mit den üblichen Rechenmodellen, eventuell über Beiwerte angepasst, ausreichend sicher beschrieben werden kann. Im Rahmen eines IGF-Forschungsvorhabens (Nr. 18257 N/1) sollen auf Grundlage umfassender experimenteller und rechnerischen Untersuchungen Regelungen zur Bemessung durchlaufender Fertigteilverbundträger formuliert werden. Für Förderung und Unterstützung des Forschungsvorhabens wird der AiF, dem DASt und der Fa. Goldbeck gedankt.

2 Stand der Forschung

Die Bestimmung der Rissbreiten und Rissabstände von Verbundträgern erfordert die Kenntnis des mittleren Bauteilverhaltens, das anschaulich durch die Momenten-Krümmungsbeziehung beschrieben wird. Die Krümmung liefert ein Maß der Steifigkeitsverteilung am Verbundquerschnitt, mit der das Rissverhalten des Verbundträgergurtes auf die allgemeinen Beziehungen des zentrisch normalkraftbeanspruchten Stahlbetonbalkens zurückgeführt werden kann. Im ungerissenen Zustand erfahren Beton und Bewehrungsstahl die gleiche Dehnung, sie wirken vollständig im Verbund. Die Rissbildung bei Erreichen der Betonzugfestigkeit führt im Bereich der so genannten Einleitungslänge l_t zu Relativverschiebungen zwischen Beton und Bewehrung und zur Umlagerung der Betonspannungen auf die Bewehrung. Der Zusammenhang ist in Abbildung 1 dargestellt und wird durch die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes beschrieben. Die Erstrissbreite w_R ergibt sich dann aus dem zweifachen Wert der Verschiebung am Ende der Einleitungslänge.

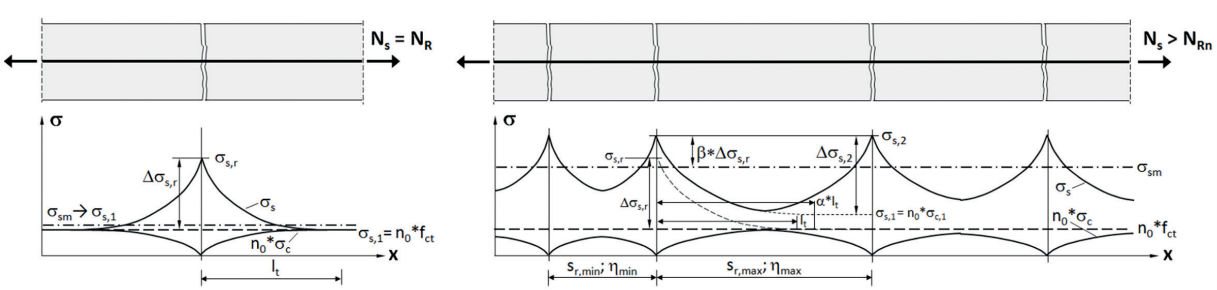


Abbildung 1: Rissbildung am Stahlbetonstab (li. Erstriss, re. Abgeschl. Erstrissbildung)

Liegen die Risse weit genug auseinander, gibt es zwischen den Rissen immer noch Bereiche mit ungestörtem Verbund, so dass bei weiterer Steigerung der Beanspruchung zwischen den vorhandenen Rissen wieder die Zugfestigkeit des Betons erreicht wird und neue (Erst)risse entstehen können. Liegen schließlich alle Risse soweit beieinander, dass über die gesamte Länge gestörte Verbundbedingungen herrschen, ist die Erstrissbildung abgeschlossen. Durch die Verbundkräfte wird der Beton zwischen den Rissen weiter am Lastabtrag beteiligt. Dieser Effekt wird als Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen oder auch Zugversteifung bezeichnet.

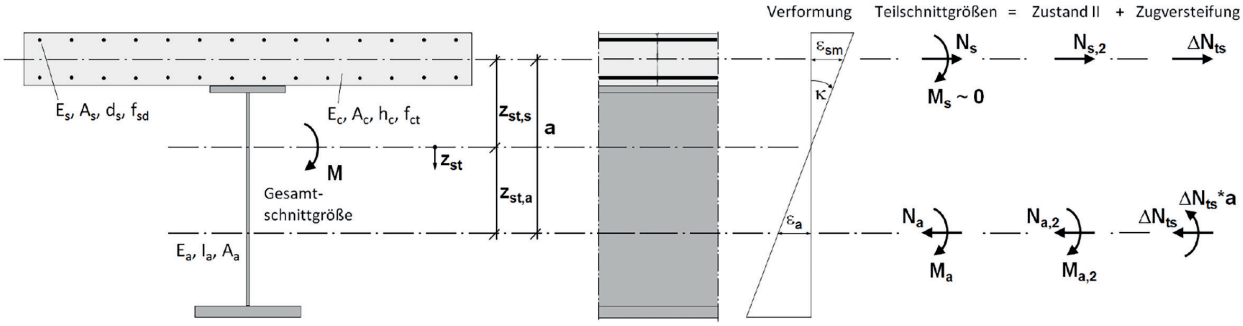
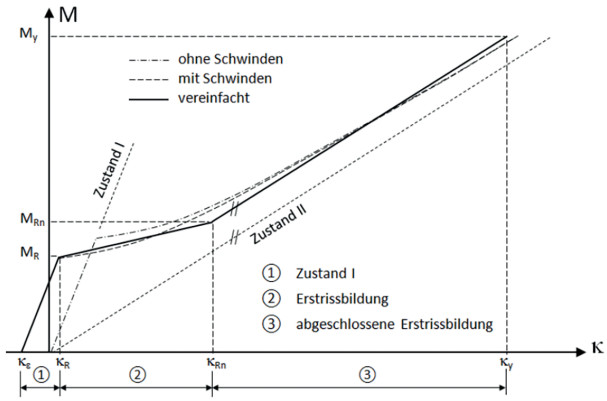


Abbildung 2: Gleichgewicht und Verträglichkeit am gerissenen Verbundquerschnitt

Für biegebeanspruchte Verbundträger wird dieses Rechenmodell sinngemäß übertragen. Der Betongurt wird dabei als exzentrisch beanspruchter Zugstab unter Berücksichtigung des Spannungsgradienten am Verbundquerschnitt betrachtet. Das Aufstellen der Bedingungen für Gleichgewicht und Verträglichkeit am Verbundquerschnitt (s. Abbildung 2) führt zu der in Abbildung 3 dargestellten Beziehung zwischen Moment und Krümmung, mit der die Beanspruchungen am Riss und somit die Rissbreiten bestimmt werden können. Eigenspannungszustände aus verhinderten Schwinddehnungen oder abfließender Hydratationswärme haben maßgeblichen Einfluss auf die Rissbildung und das Verformungsverhalten während der Erstrissbildung.

Für die praktische Anwendung kann die Momenten-Krümmungsbeziehung des Verbundträgers durch einen trilinearen Verlauf über die Punkte Erstrissbildung, abgeschlossene Erstrissbildung und elastischer Grenzzustand vereinfacht werden. Die Berechnung der Krümmungen erfolgt für den ungerissenen Zustand mit den Gesamtschnittgrößen am Gesamtquerschnitt. Am gerissenen Querschnitt kann die Verträglichkeitsbedingung konstanter Krümmung ausgenutzt werden. Die Beziehungen zur Berechnung von M, N_s und κ sind in Abbildung 3 zusammengestellt.



$$N_R = A_c * f_{ct,eff} * (k_{c,M} + k_{c,\varepsilon})\,(1 + \rho_s * n_0)$$

$$M_R = (f_{ct,eff} - \sigma_{c,\varepsilon}) * \frac{n_0 * I_{i,0}}{z_{ic,0} + h_c/2}$$

$$\kappa_R = \kappa_\varepsilon + \kappa_M = \frac{-\varepsilon_{cs} * S_{i,S}}{(1+\mu * n_0) * I_{i,S}} + \frac{M_R}{E_a I_{i,0}}$$

$$N_{Rn} = 1,3 * N_R = N_{s,2} + \Delta N_{ts} = \frac{M_{Rn}}{I_{st}} * z_{st,s} * A_s + \beta * \frac{f_{ct,eff} * A_s}{\rho_s * \alpha_{st}}$$

$$M_{Rn} = \frac{N_{Rn} - \Delta N_{ts}}{A_s} * I_{st}/z_{st,s}$$

$$\kappa_{Rn} = \frac{M_a}{E_a I_a} = \frac{M - N_{Rn} * a}{E_a I_a}$$

$$N_y = f_{sd} * A_s * z_{st,s}/z_{st,1}$$

$$M_y = \frac{N_y - \Delta N_{ts}}{A_s} * I_{st}/z_{st,s}$$

$$\kappa_y = \frac{M - N_y * a}{E_a I_a}$$

$$k_{c,M} = \frac{1}{1 + 0,5 * h_c/z_{ic,0}}; \quad k_{c,\varepsilon} \approx 0,3; \quad \alpha_{st}: \; QS - Parameter$$

Abbildung 3: Momenten-Krümmungsbeziehung

Für die in [Krips, 1985] und [Hanswille, 1986] hergeleitete Rissbreitentheorie wird das Verbundgesetz nach *Martin/Noakowski/Janovic* verwendet. Der Vorteil liegt in der einfachen mathematischen Formulierung, mit der unterschiedliche Verbundbedingungen durch die Verbundparameter A und N erfasst werden. Damit lässt sich die Erstrissbreite w_R wie folgt ausdrücken:

$$w_R = 2 * \left(\frac{1+N}{A * f_c} * \frac{d_s}{8} * \frac{\sigma_{s,r}^i - \varepsilon_0 E_s}{E_s} * \Delta\sigma_{s,r}^i\right)^{\frac{1}{1+N}} \qquad (1)$$

Abbildung 1 zeigt die Abhängigkeit der Rissbreiten vom Beanspruchungsniveau und vom Rissabstand. Der Zusammenhang kann mit Bezug auf Beanspruchungszustand und Einleitungslänge beim Erstriss durch die dimensionslosen Parameter α und η ausgedrückt werden. Die Rissbreite kann dann für beliebige Beanspruchungszustände wie folgt geschrieben werden:

$$w(\alpha, \eta) = w_R * \alpha^{\frac{2}{1+N}} * (1 - \delta_w(\eta)) \qquad (1)$$

Die Gleichung ist wegen der Abhängigkeit vom bezogenen Rissabstand nicht geschlossen lösbar. Mit den oberen Grenzwerten η_{min} und η_{max} nach Abbildung 1 und der Verteilungsdichte der Rissabstände f(η) kann jedoch ein mittlerer Rissabstand η_m und die zugehörige mittlere Rissbreite w_m ermittelt werden. Der charakteristische Wert der Rissbreite w_k kann schließlich mit den gängigen zuverlässigkeitstheoretischen Methoden abgeleitet werden.

3 Fertigteile

Grundsätzlich können bei Verwendung von Fertigteilen in den Gurten von Stahlverbundträgern die beiden Anwendungsfälle Teilfertigteil (TFT) und Ganzfertigteil (GFT) unterschieden werden. Für die systematische Beschreibung des Rissbildungsverhaltens muss in Trägerlängsrichtung eine Differenzierung zwischen diskontinuierlich und kontinuierlich ausgebildetem Betongurt getroffen werden. Hierfür werden die Bezeichnungen Fugenbereich und Kontinuitätsbereich eingeführt. Neben diesem quasi rein geometrischen Aspekt ist materialseitig die Ergänzung der herkömmlichen Verbundbaustoffe Baustahl, Betonstahl und (Ort)beton um den neu hinzukommenden Fertigteilbeton zu beachten.

Die genannten Aspekte - Geometrie und Material - führen zu vier Teilproblemen: Sammelrissbildung, Kerbwirkung, Eigenspannungszustand, Zustand I/II. Diese werden nachfolgend erläutert und die Ansätze zur Berücksichtigung in der Risstheorie dargelegt.

Als *Sammelriss* bezeichnet man üblicherweise breitere Risse, die außerhalb des Wirkungsbereiches der rissverteilenden Bewehrung liegen und durch das Zusammenlaufen mehrerer benachbarter Einzelrisse entstehen. Bei Fertigteilverbundträgern tritt der gleiche Effekt durch singuläre Einzelrisse an den Rändern der Fugenbereiche auf. Zum einen führt die im Regelfall geringere Betonzugfestigkeit des Ortbetons in den schmalen Fugenbereichen dazu, dass der Beton hier unter einem geringeren Beanspruchungsniveau reißt, wobei zunächst davon ausgegangen werden kann, dass der Dehnungszustand am Verbundquerschnitt durch die unterschiedlichen Steifigkeiten von Fugen- und Kontinuitätsbereichen nur unwesentlich beeinflusst ist. Das Schwinden des Fugenbetons führt zu zusätzlichen Beanspruchungen, die an den Fugenrändern konzentriert wirken und entweder die für die Erstrissbildung maßgebliche Betonzugfestigkeit reduzieren oder schon vor Belastungsbeginn zur Rissöffnung führen können und das Beanspruchungsniveau beim Erstriss an dieser Stelle weiter reduzieren. Die Steigerung der Beanspruchung bis zur (eigentlichen) Erstrissbildung in den angrenzenden Fugen- und Kontinuitätsbereichen ist dann mit entsprechend vergrößerter Gurtnormalkraft und einer vergrößerten Rissbreite für die Sammelrisse verbunden. Ein weiterer Aspekt ist die gegenüber kontinuierlich eingebetteten Stäben schlechtere Verbundwirkung im Übergangsbereich, was zu größeren Relativverschiebungen zwischen Bewehrung und Beton und damit wiederum zur Vergrößerung der Rissbreiten führen. Die Sammelrissbildung kann somit grundsätzlich nach den Gesetzmäßigkeiten der Erstrissbildung beschrieben werden, findet aber unter deutlich verringerter Beanspruchung statt. Für die Bestimmung der Rissbreiten müssen die Verbundbedingungen am Riss und die reduzierte Rissbeanspruchung berücksichtigt werden. Sammelrisse sind vorwiegend bei Ganzfertigteilen zu berücksichtigen. Bei Teilfertigteilen mit obenliegender Ortbetonergänzung wirken grundsätzlich die gleichen Mechanismen, jedoch dominiert hier die Kerbwirkung.

Im Gegensatz zu den Fugen von Ganzfertigteilen wird die Bewehrung an den Stößen der Teilfertigteile meist nicht durchgeführt. Die auf das Teilfertigteil entfallende Gurtkraft muss also an der Fuge auf den Restgurtquerschnitt umgelagert werden. Dieser Umlagerungseffekt entspricht in Ursache und Wirkung einer *Kerbe*. Für die Rissbildung können die Umlagerungseffekte wie in Abbildung 4 gezeigt in relativ einfacher Form durch die Bilanzierung der Teilschnittgrößen auf der Beanspruchungsseite berücksichtigt werden.

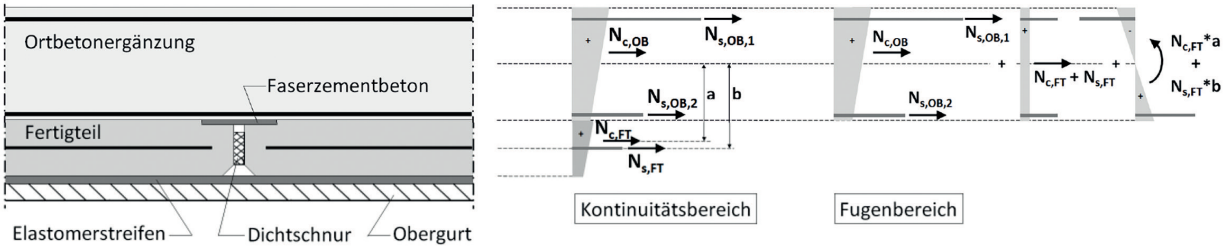


Abbildung 4: Kerbwirkung an TFT - Fuge (li. Konstruktionsvariante, re. Umlagerung)

Eigenspannungszustände infolge Schwindens und Temperatur sind ebenfalls zu berücksichtigen. Bei Verwendung von Teilfertigteilen muss das veränderte Verhältnis von schwindenden und schwindverhindernden Querschnittsteilen betrachtet werden. Weiterhin ist zu beachten, dass auch das Fertigteil selbst schwindet und zwar zunächst noch relativ frei, nach Herstellung des Ortbetons dann ebenfalls mit Zwängung gegen den Verbundquerschnitt und mit höherem Betonalter. Die Bestimmung des zugehörigen Beanspruchungszustandes erfolgt sinnvollerweise durch eine Aufspaltung der Schwindteilschnittgrößen des Betongurts in Ortbeton und Fertigteilbeton. Damit kann dann wiederum die Kerbwirkung an den Fertigteilstößen in der oben geschilderten Weise berücksichtigt werden.

Bei Verwendung von Ganzfertigteilen ist das unterschiedliche Schwindverhalten in Trägerlängsrichtung auch unter Betrachtung der zuvor beschriebenen Sammelrissproblematik zu beachten. Der Eigenspannungszustand infolge abfließender Hydratationswärme kann in der bekannten Weise wirklichkeitsnah durch die Bestimmung eines äquivalenten Schwindmaßes beschrieben werden. Auch hier ist wieder wie beim Schwinden das Verhältnis der hydratisierenden zu den nicht-hydratisierenden Querschnittsteilen zu beachten sowie die geänderten physikalisch-geometrischen Randbedingungen zur Bilanzierung des Wärmeflusses.

In den Kontinuitätsbereichen der Teilfertigteilträger findet die Erstrissbildung im Ortbeton aufgrund des Dehnungsgradienten im Betongurt und der im Regelfall geringeren Betonzugfestigkeit bei gleichzeitig mehr Schwindzug unter niedrigerem Beanspruchungsniveau als im Fertigteil statt. Das führt zu einer Diskretisierung in Gurtdickenrichtung zwischen gerissenem Ortbeton und noch ungerissenem Fertigteil, die durch den Begriff *Zustand I/II* anschaulich beschrieben werden kann. Auswirkungen auf die Bauteilsteifigkeit und das Krümmungsverhalten können in ähnlicher Weise wie die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen beschrieben werden. Lokal finden zusätzlich Umlagerungen zwischen Ortbeton und Fertigteilbeton analog der oben beschriebenen Kerbwirkung im Fugenbereich, jedoch in umgekehrter Richtung statt.

4 Bauteilversuche

Um die theoretischen Erkenntnisse zur Rissbildung an Fertigteilverbundträgern zu validieren und gleichzeitig eine ausreichend große Datenbasis zur systematischen Untersuchung von unterschiedlichen Einflussparametern zu erhalten, wurden experimentelle Untersuchungen an mehreren Versuchsträgern durchgeführt. Hierfür kamen zwölf ca. 5,50 m lange IPE-Träger mit unterschiedlicher Konstruktion des Betongurtes aber grundsätzlich gleichen Abmessungen sowie gleicher Herstellungs- und Belastungsgeschichte nach Abbildung 5 zur Anwendung.

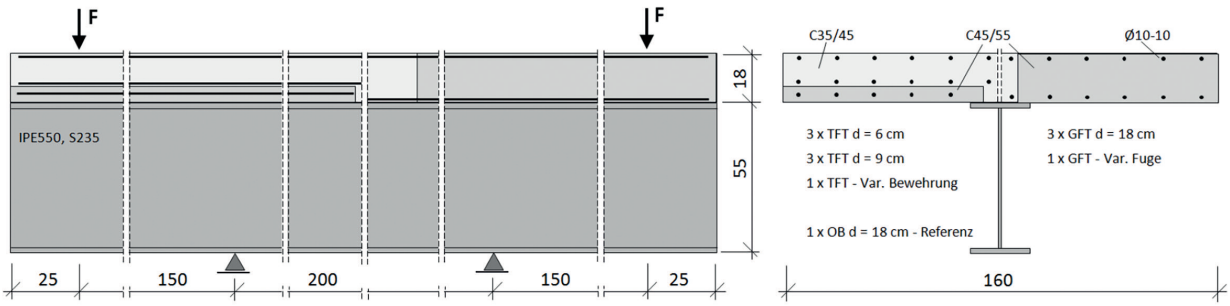


Abbildung 5: Versuchsträger – Abmessungen und Konstruktion (li. TFT, re. GFT)

Das Messprogramm umfasste die durchgängige Messung des Beanspruchungszustandes infolge Eigenspannungen nach dem Betonieren, die Untersuchung der Momentenbeanspruchung im Vierpunktbiegeversuch sowie die Ermittlung von Baustoffkennwerten der verwendeten Betone. Der Beanspruchungszustand am Verbundquerschnitt wurde im Wesentlichen durch die Messung der Dehnungen im Beton- und Bewehrungsstahl sowie auf der Betonoberfläche mittels Dehnmessstreifen erfasst. Zur ergänzenden Messung der mittleren Dehnungen im Betongurt sowie zur Kontrolle der Durchbiegungen und des Schlupfes in der Verbundfuge wurden induktive und potentiometrische Wegaufnehmer verwendet. Weiterhin wurde der Temperaturverlauf während der Hydratation des jungen Betons sowie auch während der Belastungsversuche gemessen. Die Kontrolle der Rissbildung erfolgte laststufenweise durch visuelle Kontrolle und Anzeichnen der Risse sowie durch Risslupenmessung an ausgewählten Rissen. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Betonstahldehnungen für einen TFT-Träger. Man erkennt zum einen die getrennte Rissbildung in Ortbeton und Fertigteil, zum anderen die Umlagerungen an der Kerbe.

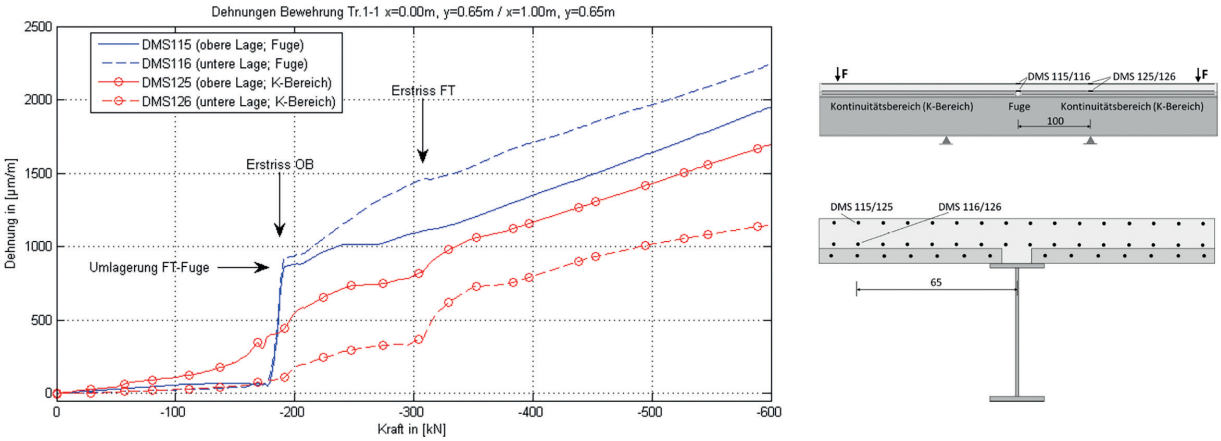


Abbildung 6: Betonstahldehnungen an Teilfertigteilträger d = h_c / 3

Auch wenn die gesammelten Messdaten derzeit noch nicht vollständig ausgewertet sind, können einige grundlegende Aussagen getroffen werden:

- das Rissverhalten im Fugenbereich von TFT-Trägern unterscheidet sich grundlegend von dem in den Kontinuitätsbereichen
- das Erstrissmoment von TFT-Trägern ist abhängig von der Fertigteilstärke
- Fertigteil und Ortbeton reißen unter unterschiedlichem Beanspruchungsniveau; die Momenten-Krümmungsbeziehung ist entsprechend modifiziert
- Qualität / Ausbildung der TFT-Fugen kann die Umlagerungen beim Erstriss beeinflussen
- Erstrisse an den Fugenrändern der GFT-Träger entstehen deutlich früher als in den benachbarten Kontinuitätsbereichen und weisen größere Rissbreiten auf (Sammelrisse)
- das Rissbild ist weitgehend durch die Lage der Querbewehrung vorgegeben; dieser Effekt ist auch als Dübelwirkung bekannt und kann u.U. positiv berücksichtigt werden

Damit wird die Richtigkeit der herausgearbeiteten Problemformulierungen / Lösungsansätze grundsätzlich bestätigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei Verwendung von Teil- und Ganzfertigteilen in den Gurten von Stahlverbundträgern müssen zur Beschreibung der Rissbildung ergänzende Überlegungen angestellt werden, um das für reine Ortbetongurte abgeleitete Rechenmodell *Erstrissbildung - abgeschlossenene Rissbildung* in erweiterter Form anwenden zu können. Durch Analyse der konstruktiven und technologischen Besonderheiten werden die wesentlichen Fragestellungen aufgezeigt und es wird dargelegt, wie diese berücksichtigt werden können. Durch erste Zwischenergebnisse der im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Versuche wird die Richtigkeit der angestellten Überlegungen bestätigt. Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens erfolgt die Überprüfung der beschriebenen Ansätze durch gezielte Auswertung der vorliegenden Versuchsergebnisse sowie durch systematische rechnerische Untersuchungen zu den relevanten Parametern.

6 Literatur

Hanswille, G. (1986), *Zur Rißbreitenbeschränkung bei Verbundträgern*. Techn.-wiss. Mitteilungen Nr. 86-1, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum

Krips, M. (1985), *Rißbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton*. Mitteilungen aus dem Institut für Massivbau der TH Darmstadt, Heft 33, Verlag Ernst & Sohn, Berlin