

Reparatur durch Stegaufpflasterung

Prof. Dr.-Ing. Ö. Bucak,
Stahl- und Leichtmetallbau,
FH München

1. Stand der Wissenschaft und Technik, Literatur

Die erste grundlegende Arbeit über orthotrope Platten entstand Mitte der 50er Jahre von Pelikan und Esslinger [1] gefolgt von Untersuchungen der LBF an 4,0 mm lagen Probekörpern mit dicken Stegblechen (20 mm) für das Eisenbahnbundesamt [2] mit modifizierter Ausnehmung und von Gauger + Oxford [3] für torsionssteife Längsträger. Ende der 80er Jahre liefen die ersten europäischen Forschungsprogramme mit unterschiedlichen Hohlsteifenformen, deren Ergebnisse in [4] zusammenfassend veröffentlicht wurden.

Nach den ersten Rissen an den Staustufentoren Iffezheim wurden in Karlsruhe im Rahmen des SFB 210 [7] die ersten Großbauteilversuche durchgeführt.



Bild 1: 9,0 m langer QTR- Probekörper der Karlsruher Untersuchungen

Ähnliche Untersuchungen zur Erforschung der aufgetretenen Risse liefen hauptsächlich in Japan [16], den USA [6] und in Holland [11]. Miki [10] gibt einen zusammenfassenden Bericht über die Schäden an japanischen Brücken und durchgeführte Reparaturmaßnahmen.

Aus [11] geht hervor, dass die Brienoord Brücke in Rotterdam nach 7 Jahren Betrieb total erneuert werden musste. Alle Risse waren im Bereich der hochbelasteten Fahrspuren aufgetreten, ähnlich wie bei der Autobahnbrücke Karlsruhe [13] und diejenigen der Autobahndirektion Nord [12]. Die Brücken der Autobahndirektion Nord werden seit mehreren Jahren immer durch „Ausfugen und Schweißen“ repariert.

Als Ergebnis der holländischen Untersuchungen sollte eine Brücke an dieser Stelle in Rotterdam nach der durchgeführten Verkehrszählung und unter Verwendung der EC 3 S-N-Linien und der Miner Regel bei einer Bemessungslinie von 67 MPa und $\gamma_F = 1,1$ folgende Lebensdauer erreichen:

- 2,4 Jahre bei einer Fahrbahnblechdicke von 18 mm
- 18 Jahre bei einer Fahrbahnblechdicke von 24 mm
- 80 Jahre bei einer Fahrbahnblechdicke von 28 mm.

Diese utopischen Blechdicken können nicht Grundlage der zukünftigen Brückenbauwerke darstellen. Da die ersten Risse an den holländischen Brücken vom Längsträgerschweißstoß ins Fahrbahnblech einwachsen (ähnlich wie an der Karlsruher Autobahnbrücke), führen die amerikanischen Kollegen

derzeit in einem großangelegten Forschungsprogramm [9] (gleichzeitige Prüfung von 4 großen Fahrbahntafeln, siehe **Bild 2**) Untersuchungen mit geschweißten bzw. unterschiedlich geschraubten Längssteifenstößen an der Lehigh University (ATLASS-Laboratory) durch.

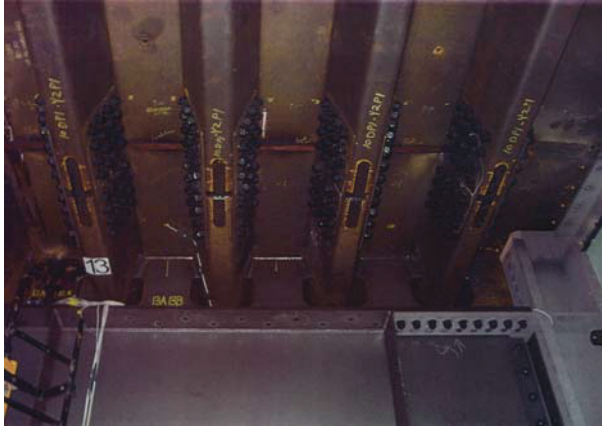
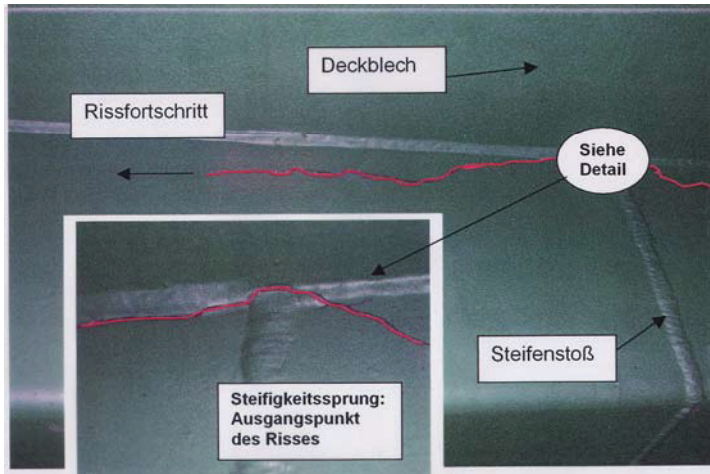


Bild 2: Probekörper mit geschraubten Längsträgerstößen- Versuch an der Lehigh University, USA

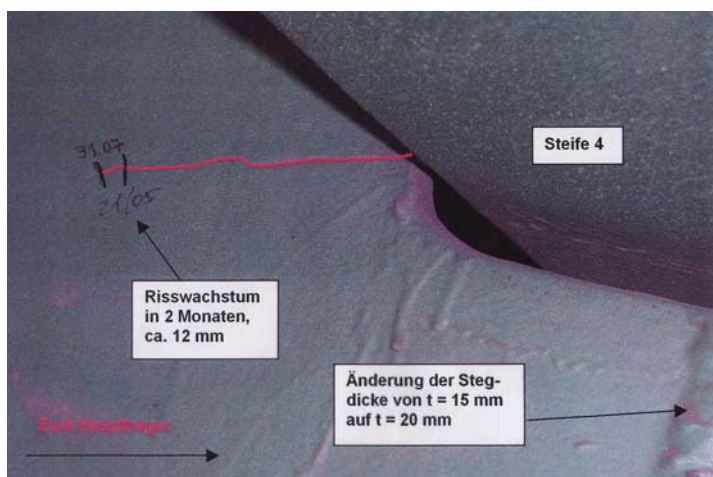
2. Schäden an der Autobahnbrücke Karlsruhe

Die Schäden an der Autobahnbrücke auf der A5 bei Karlsruhe aus dem Jahre 1982 können in drei Gruppen eingeteilt werden.



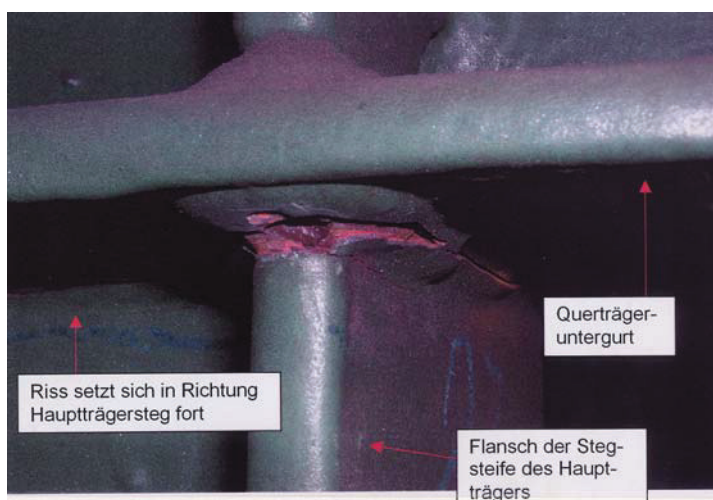
Gruppe 1:

Risse, die von den LTR-Stoßstellen ins Deckblech wandern



Gruppe 2:

Risse am QTR-Steg, entweder von der Schweißkerbe oder von der Brennschnittkante ausgehend

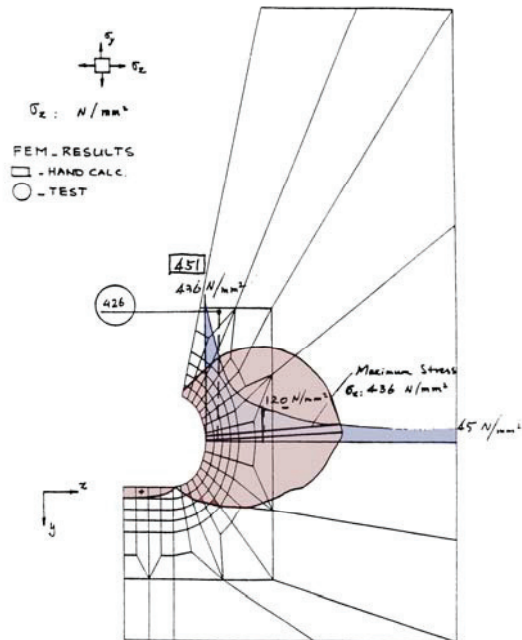


Gruppe 3:

Risse an ausgesteiften Rahmenecken

Bild 3: Risse an der Karlsruher Autobahnbrücke

Ausnehmungform der bestehenden Brücke



Modifizierte Ausnehmung
(erster Vorschlag)

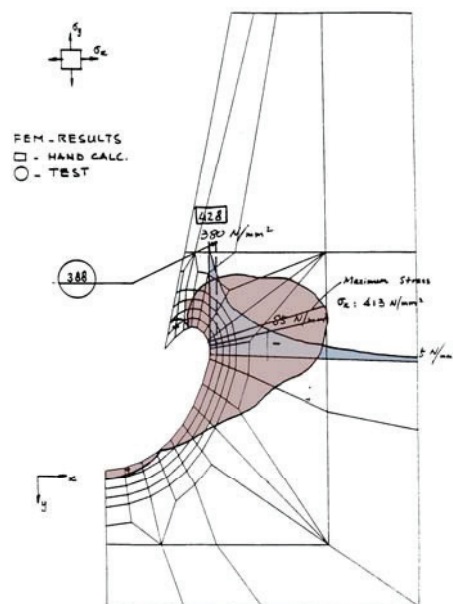


Bild 4: Spannungen an Querträger- Ausnehmungen



Bild 5: Autobahnbrücke Karlsruhe, DMS Applikation

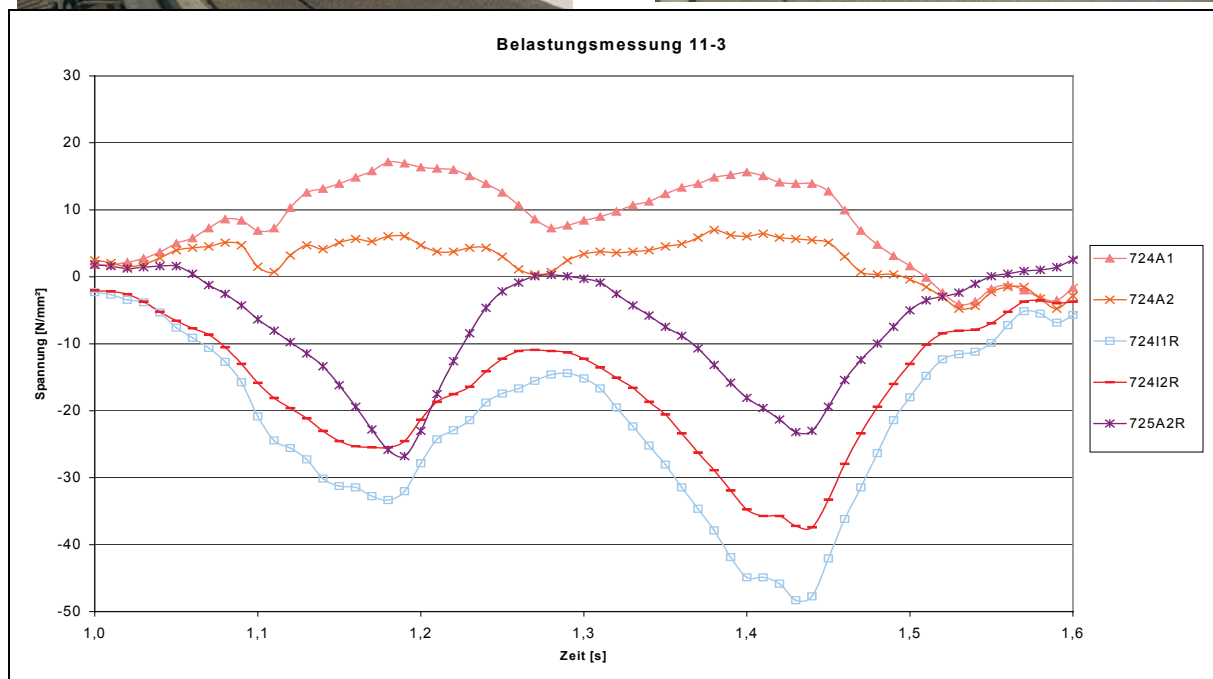
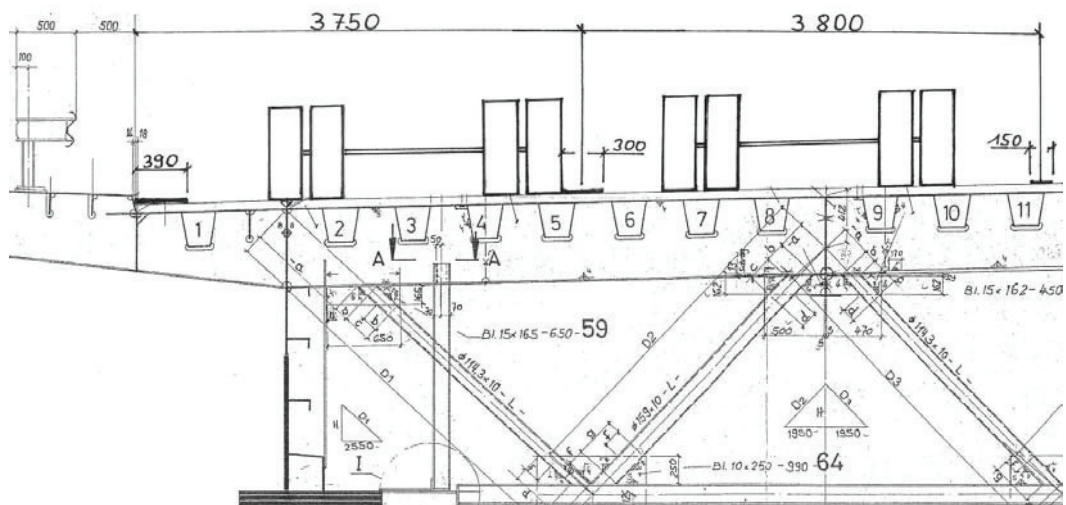


Bild 6: Autobahnbrücke Karlsruhe; Querschnitt, Achslasten (theoretisch); Situation im Betrieb; Ergebnisse der Spannungsmessungen

3. Reparaturvorschlag zur Sanierung der Risse am Querträger ausgehend von der Ausnehmung

Die Ausarbeitung eines Reparaturvorschlages zur **Sanierung und Ertüchtigung** von Stahlbrücken mit orthotroper Fahrbahn für die Schadensart „Risse am Querträger ausgehend von der Ausnehmung“ (siehe Bild 7) soll durch Optimierung der Ausbildung der Ausnehmung und der **Aufpflasterung** des kritischen Stegbereichs erreicht werden. Die nachfolgenden Angaben wurden durch FE-Berechnungen untermauert. Durch Bauteilversuche sollen die Durchführbarkeit der Sanierungsmaßnahme und die anschließend zu erwartende Lebensdauer ermöglicht werden.

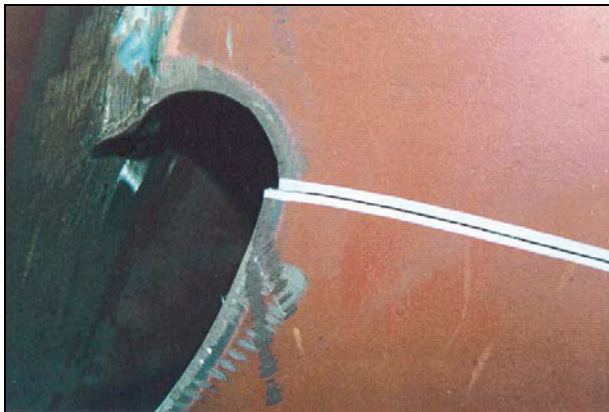


Bild 7: Risse am Querträger ausgehend von der Ausnehmung

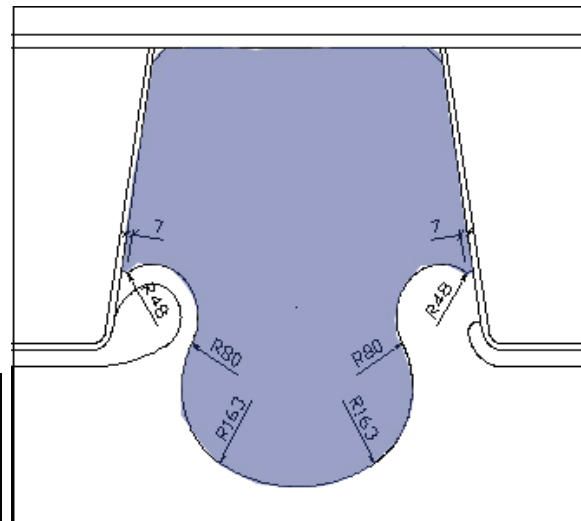


Bild 8: Reparatur mittels Aufpflasterung des Stegblechs

Die Instandsetzung einer Brücke ist deutlich kostengünstiger als ein Neubau. Die bisherige Reparaturform (Ausfugen und Zuschweißen) möchten wir als „ad-hoc Maßnahme“ definieren. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden 3 Vorversuche durchgeführt, die eine Lebensdauer nach dem Schweißen von etwa 30 % bis 50 % der ursprünglichen Lebensdauer ergab. Dieser Wert soll genauer verifiziert werden. Nach den bisherigen Arbeiten aus München stellt sich **als wirtschaftlich optimale Lösung die Aufpflasterung des Stegblechs** nach dem Ausfugen und Zuschweißen des Risses dar. Diese Aussage soll durch genauere numerische Untersuchungen verifiziert und durch versuchstechnische Untersuchungen untermauert werden. Wissenschaftliche Erkenntnisse werden ohne Zweifel auftreten, werden allerdings auch ebenso dazu führen, dass neue Erkenntnisse beim Sanieren und Ertüchtigen von Brücken erfahren werden.

4. Methodik des Vorgehens, alternative Lösungen

Folgende Reparaturschritte wurden vorgesehen.

4.1 Anbringen eines Risstoppers, Ausfugen und Zuschweißen des Risses.

Bild 9 zeigt einen durch Zuschweißen sanierten Riss als ad-hoc Maßnahmen. Das Zuschweißen des Risses ist aber auch beim Sanieren mittels Blech aufpflasterung erforderlich, da sonst der ursprüngliche Riss sofort über der Schweißnaht des Pflasterbleches in das neue Verstärkungsblech übertragen wird (siehe Bild 10 und 11)



Bild 9. Durch Schweißen sanierter Riss, Autobahnbrücke Karlsruhe

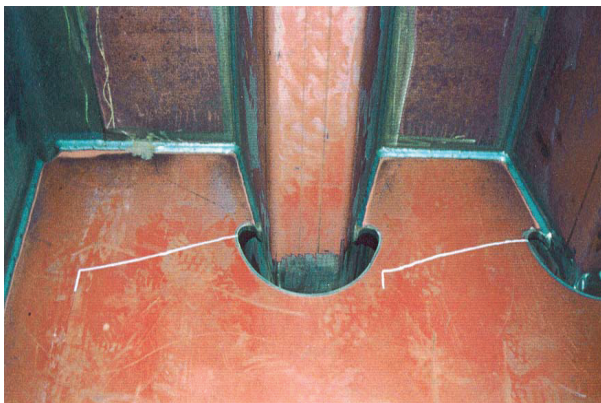


Bild 10: Risse an der QTR-Ausnehmung (Rissende mit einem Querstrich gekennzeichnet)



Bild 11: Riss wurde übertragen durch die Schweißnaht auf das Verstärkungsblech (vorhandene Risse werden vor dem Aufpflastern nicht zugeschweißt)

4.2 Schweißnahtausbildung

Zur Klärung des Problems, welche Schweißnahtausbildung im vorliegenden Fall den günstigsten Kerbfall darstellt wurden in München ebenfalls einige Vorversuche durchgeführt (siehe Bild 12). Das Verstärkungsblech wurde mit einem um die Öffnung gebogenen Vierkantmaterial simuliert. Daraus wurde ersichtlich, dass im vorliegenden Detail Kehlnahtschweißungen besser sind als HV-Nähte. Durch verschiedene Probekörperformen und weitere versuchstechnische Untersuchungen soll diese Aussage noch verifiziert werden.



Bild 12: Versuchskörper mit aufgetretenem Riss (Risse traten immer an der Seite mit K- Naht- Schweißung auf)

4.3 Auswirkung der Geometrieänderung

Durch die Änderung der Ausrundungsgeometrie ändert sich der Spannungsverlauf und die Höhe der Spannung am Rand der Ausnehmung (siehe Bilder 13 und 14).

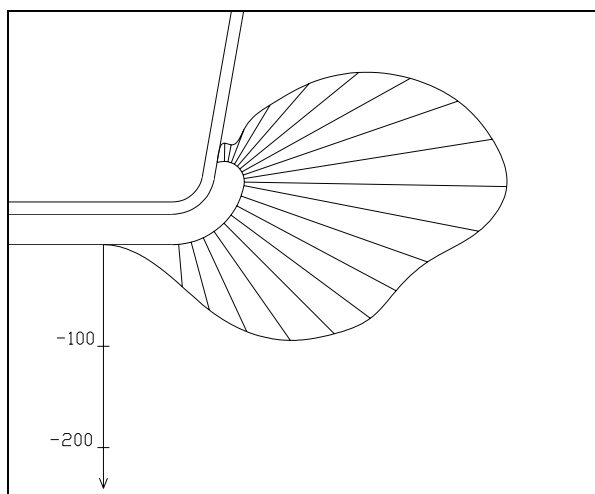


Bild 13: Spannungsverlauf am Rand der vorhandenen Ausnehmung

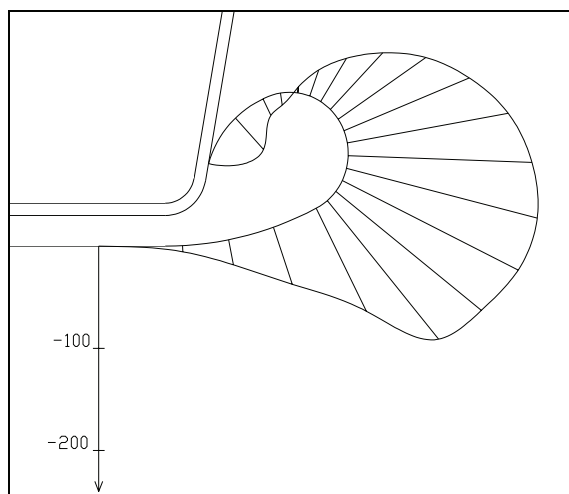


Bild 14: Spannungsverlauf am Rand der neuen Ausnehmung mit $\varnothing 60$ mm

Durch die Vergrößerung der Ausnehmung (bisherige Brücken haben zu geringe Ausnehmungen) verlagert sich die Spannungskonzentration; die Schweißnaht am Anschluss zur Trapezsteife liegt somit in einem Bereich geringer Spannungen (d. h. keine Rissinitiierung aufgrund der Schweißnaht). Diese aus konstruktiven Gründen durchgeführte Modifizierung beeinflusst aber auch das Tragverhalten des Stegzahns. Folgende Effekte überlagern sich:

- 1) Für die vertikale Kräfteinleitung steht ein reduzierter Querschnitt zur Verfügung (\Rightarrow Spannungserhöhung im Restquerschnitt).
- 2) Die Querschnittsreduzierung führt dazu, dass der Stegzahn weicher wird; dadurch entzieht der Stegzahn teilweise die **globale Lastabtragung**. Es wird eine geringere horizontale Schubkraft im Anschluss zum Deckblech eingeleitet. Die geringere Stegzahnsteifigkeit verursacht eine

Lastumlagerung, da die steiferen Nachbarzähne die Differenzschubkraft aufnehmen müssen. Diese bedeutet eine Zusatzbeanspruchung für die Nachbarzähne \Rightarrow Spannungsreduzierung im betrachteten Restquerschnitt.

- 3) Der dritte Effekt aus einer Vergrößerung der Stegausehmung ist, dass der Kraftlinienverlauf durch den größeren Ausrundungsradius eine geringere Krümmung erfährt \Rightarrow die Spannungskonzentration nimmt dadurch ab.

Bild 15 zeigt eine modifizierte Ausnehmungsgeometrie.

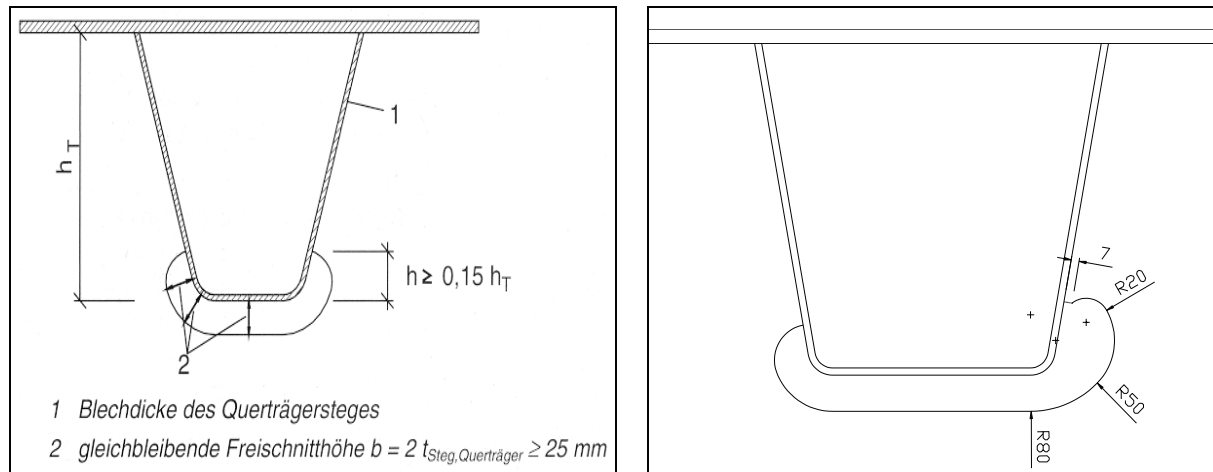


Bild 15: Optimierte Stegausehmungsgeometrie für Straßenbrücken
links: Abmessung und Geometrie der Ausnehmung gemäß FB 103
rechts: optimale Stegausehmungsgeometrie nach den bisherigen Studien der FH München

4.4. Optimierung des Stegpflasters

Die Geometrie des Stegpflasters soll so gewählt werden, dass

- 1) eine möglichst große Reduzierung der Spannungsspitzen erreicht wird
- 2) das Stegpflaster mit möglichst geringem Aufwand angebracht werden kann (gute Zugänglichkeit für Schweißarbeiten bei den räumlich beengten Baustellenbedingungen gewährleisten)
- 3) sich die Schweißnähte nicht nachteilig auf die Betriebsfestigkeit auswirken.

Hierzu sind zunächst umfangreiche FE-Berechnungen erforderlich. Bild 16 zeigt eine der bis jetzt gedachten, mit FE-Berechnungen abgesicherten Stegpflasterformen.

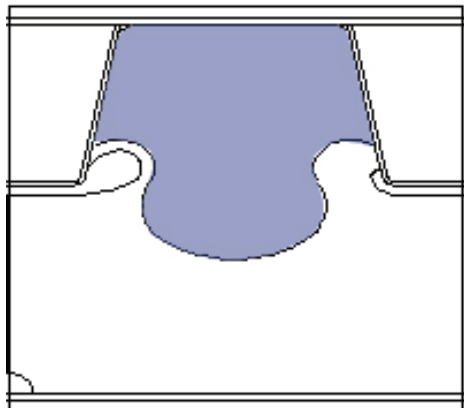


Bild 16: Vorschlag zum Stegpflaster
links: neuer Vorschlag zur Ausbildung des Stegpflasters
rechts: alte Ausnehmung zum Vergleich

5. Weitere Bemerkungen

- a) Es ist wichtig zu wissen, dass die Spannungsverteilung am Stegzahn nicht denen der Normen (z. B. DS 804) entspricht. Bild 17 zeigt die gemessenen Spannungen an der Autobahnbrücke Karlsruhe. Diese Ergebnisse wurden auch an den Modellversuchen in Karlsruhe im Jahre 1995 ermittelt.

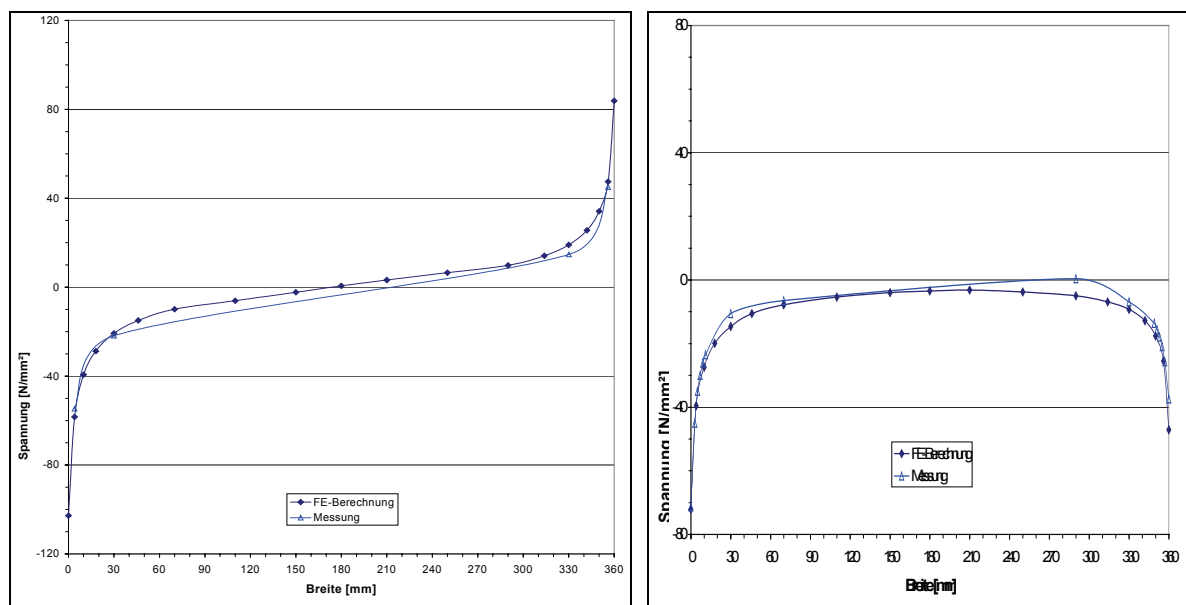


Bild 17: Spannungsverteilung am Stegzahn

Deshalb ist eine Modifizierung der Berechnungsmethode erforderlich.

-
- b) Die ersten Risse treten mit 100 %iger Wahrscheinlichkeit immer an der Abbiegespur (sowohl in Karlsruhe als auch an der bereits abgerissenen Brücke zum Rotterdamer Hafen) auf. Dann treten vereinzelt Risse an der sog. LKW-Spur auf. Deshalb können die Reparatur- und Ertüchtigungsmaßnahmen erst einmal an den kritischen Stellen des jeweiligen Bauwerks ausgeführt werden.
 - c) Eine Bitumenschicht erweicht bei hohen Temperaturen und bei Sonnenstrahlung, so dass die schweren Achsen eine Spur einfahren (an der Autobahnbrücke Karlsruhe waren die Bitumenschichten bei der Abbiegespur ca. 2,5 cm dick, anstatt 7,5 cm im Normalfall). Gegen diesen Effekt, der eine zusätzliche Steigerung der Spannungsspitze verursacht, kann man Abhilfe schaffen, wenn die Brücken (falls die Tragreserven so groß sind) mit einer Leichtbetonschicht überzogen werden.
 - d) Eine Verstärkung des Deckblechs mit aufgeklebten Zusatzblechtafeln wird derzeit bei der BAST untersucht. Für schubbeanspruchte Stellen einer alten stark verrosteten Brücke wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau eine Sanierung mittels aufgeklebten Stegblechen durchgeführt, die aber nach kurzer Zeit (m. E. nach 5 Jahren) komplett abgebaut wurde.

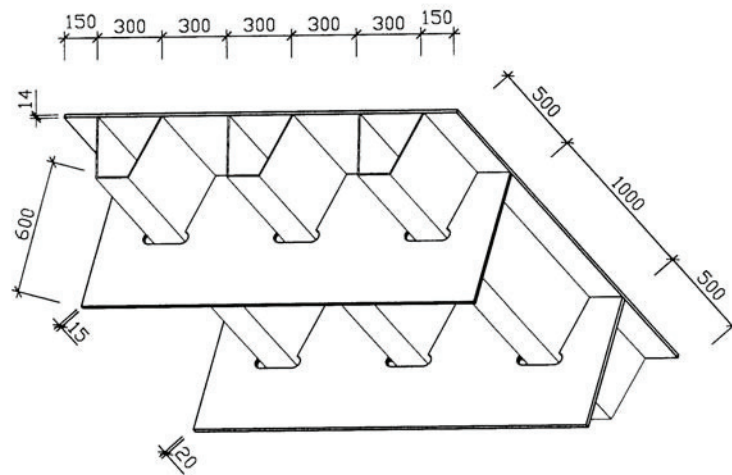
Im Rahmen des vorliegenden Papiers wird die Modifizierung des Loches um den LTR gezeigt und durch Stegaufpflasterung eine weitere Ertüchtigung dieser Schwachstelle dargestellt.

Für Risse Nr. 3 wie an der Karlsruher Brücke gefunden (siehe Bild 3), haben die japanischen Kollegen (Miki, 2003) im Rahmen eines Vortrages als Sanierungsmaßnahme die Anbringung einer weiteren Schweißlage um die Spitze der Längssteife mit einer austenitischen Elektrode genannt. Es soll ein Lebensdauerverlängerungsfaktor von 4 bis 6 erbringen. Eine mündliche Diskussion mit dem Kollegen Yamada (Mai 2004) zeigte, dass der Faktor 2 als realistischer Wert anzusetzen ist.

In dem neuen FB 103 [N3] wurde auf Betriebsfestigkeitsnachweise verzichtet, wenn bestimmte geometrische Parameter und Eckdaten eingehalten werden. Nach unserer Meinung soll dieses Kapitel überarbeitet werden und zwar insofern, dass

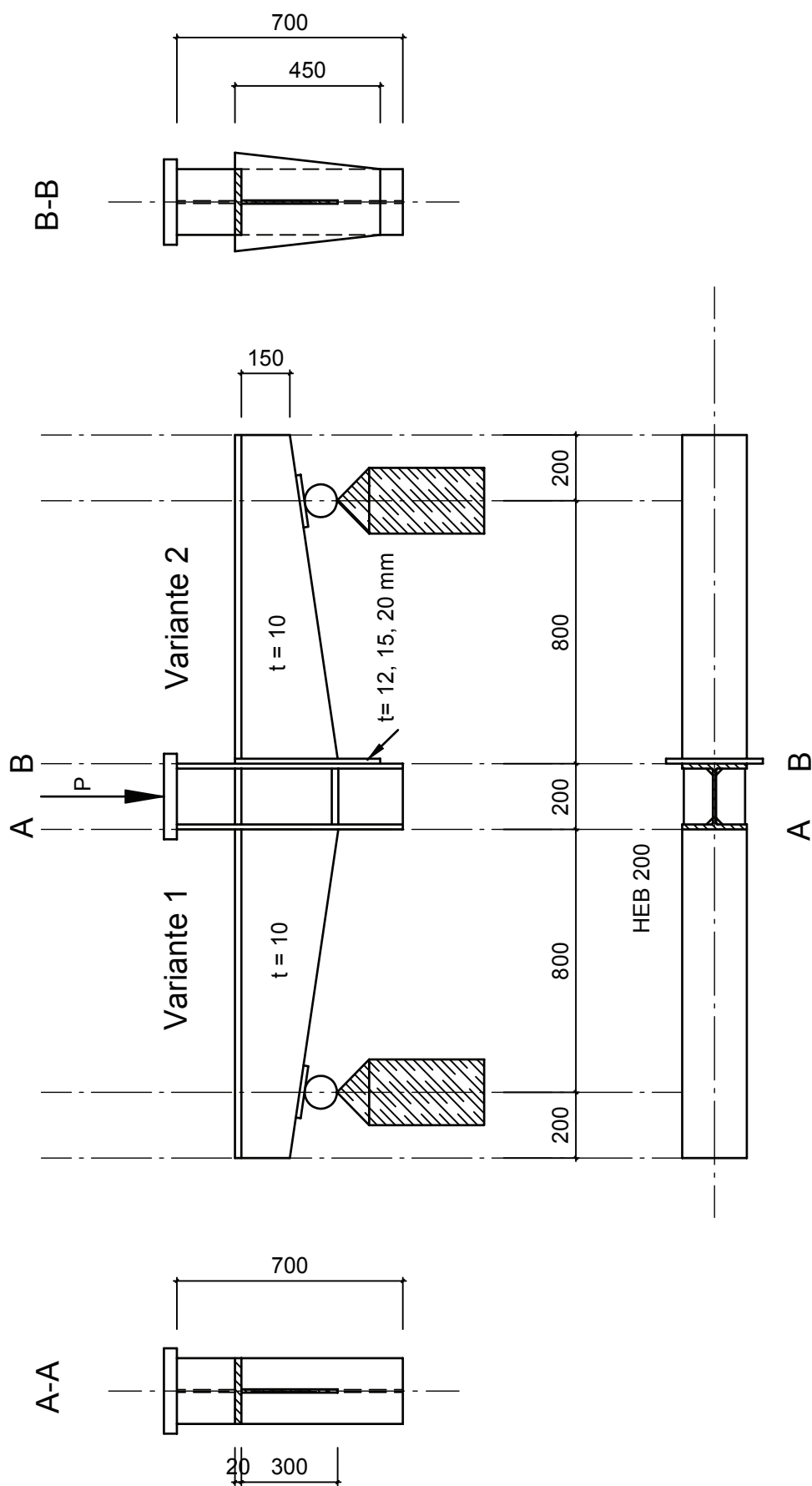
- 1) bei stark befahrenen und mit hohen Achslasten beaufschlagten Spuren die Deckbleche statt 16 auf 20 mm erhöht werden sollen,
- 2) Querträgerstege ebenfalls im Bereich der stark belasteten Fahrsteifen dicker ausgeführt werden sollen,
- 3) Modifikationen an den Ausnehmungen und den Schweißungen $QT_R - LT_R$ vorgenommen werden sollen.

Erst nach Abschluss einiger versuchstechnisch untermauerten Untersuchungen kann ein endgültiger Vorschlag gemacht werden.

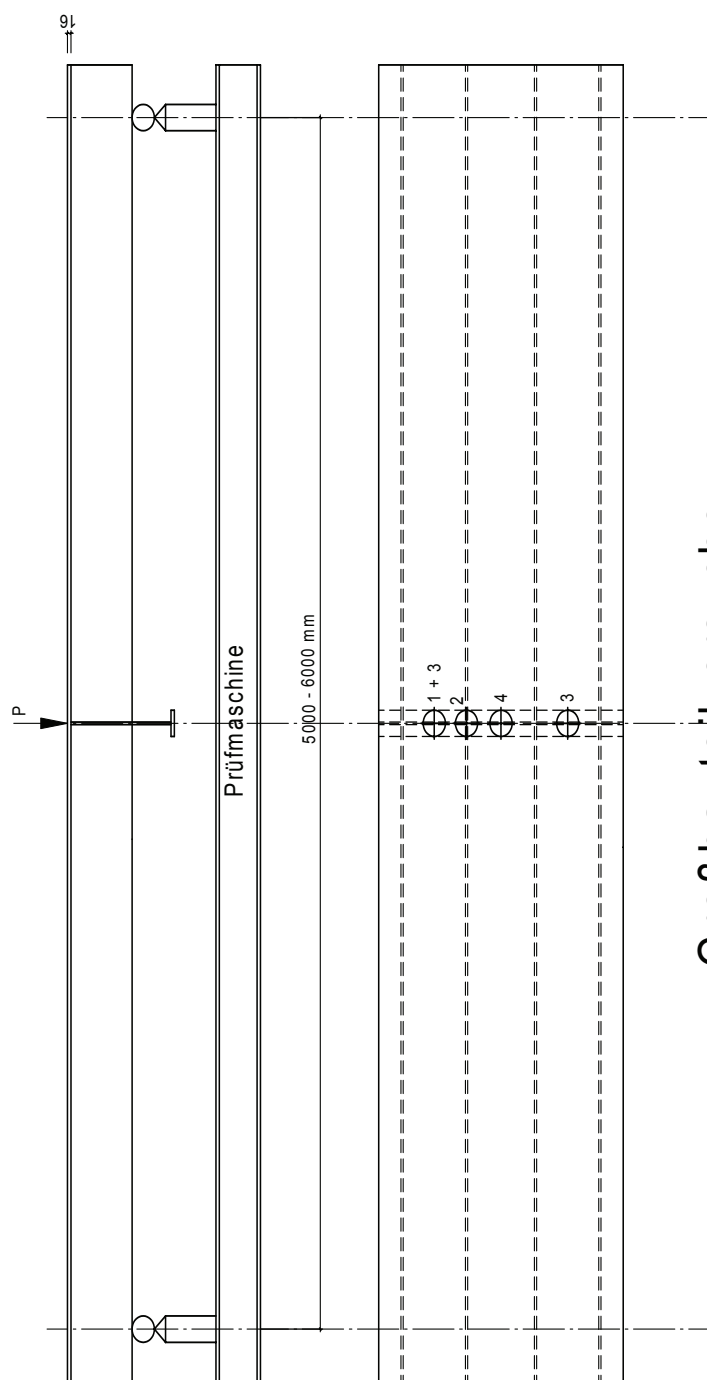
Modellversuch zur Erprobung des vorgeschlagenen Sanierungskonzepts**Technische Daten**

- 1) Querträger ohne Flansche, 3 Längssteifen
- 2) Ausnehmung der Brücken der 60er / 70er Jahre
- 3) Vorderer QTr mit $t = 15$ mm
Hinterer QTr mit $t = 20$ mm
- 4) Trapezsteifenabmessungen und Dicken nach Vorrat
- 5) Deckblech $t = 14$ mm

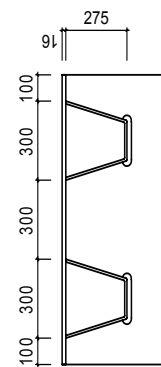
Probekörper (1 Stück) zur Erprobung der Sanierung durch Aufbohren, Herausschneiden und Schleifen sowie das Schweißen des Stegpfisters



Probekörper zur Untersuchung der Schadensgruppe "Risse an Rahmenecken", ausgehend von endender Kehlnaht des Aussteifungsbleches



Großbauteilversuche



Veruch Nr.	Stegdickte	Belastungsart
1 und 2	12 mm	1
3 und 4	12 mm	2
5 und 6	12 mm	3
7 und 8	12 mm	4
9 und 10	20 mm	Kritische aus Versuchen 1-8

Probekörper zur Untersuchung der Sanierung von Rissen am Querträgersteg ausgehend von der Ausnehmung

Literatur

- [1] Pelikan, W. Eßlinger, M.: Die Stahlfahrbahnen. Berechnungen und Konstruktion MAN-Forschungsheft Nr. 7, 1957
- [2] Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt (LBF), Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V.: Betriebsfestigkeitsnachweise von Stahlfahrbahnen mit Trapezhohlsteifen in Eisenbahnbrücken. Forschungsbericht, Projekt Nr. 76, Düsseldorf, 1982
- [3] Gauger, H.-U, Oxfort, J.: Erweiterung der Berechnung von Stahlfahrbahnen mit torsionssteifen Längsträgern für die Brückenklasse 60/30. Der Stahlbau, Heft 12, 1983
- [4] Kolstein, M. H. Leendertz, J.S.: Fatigue Design of European Orthotropic Steel Bridge Decks. Delft University of Technology, Stevin Laboratory, Steel and Timber Structures, 1993
- [5] Caramelli, S. Croce, P., Froli, M., Sanpaolesi, L.; Resistenza a fatica dei ponti in acciaio. Misure ed interpretazioni dei carichi dinamici sui ponti. Istituto di scienza delle costruzioni, University of Pisa, 1993
- [6] Fisher, John. W., Dexter, Robert, J.: Weld improvement and repair of fatigue life extension. OMAE 1993 – Volume III – B – Materials Engineering
- [7] Mang, F., Bucak, Ö. Karcher, D.: Untersuchungen an Querträgern einer orthotropen Platte. Berichte des SFB 210, Karlsruhe 1994
- [8] Bucak, Ö.: Fatigue tests on full-scale specimens – orthotropic plates – repair of fatigue cracks. Lehigh University 14./15. August 2002
- [9] Connor and Yen: Orthotropic bridge decks, Workshop “Repair of Fatigue Cracks in Bridges”, Lehigh University, 14./15. August 2002
- [10] Miki Ch. Ito, Y., Sasaki, E.: Fatigue and repair cases in steel bridges. Tokyo Institute of Technology. Workshop “Repair of Fatigue Cracks in Bridges”, Lehigh University, 14./15. August 2002
- [11] Dijkstra, D. O. : Fatigue in orthotropic steel decks in traffic bridges, 12 Seiten
- [12] Schiefer, Dr. Willberg: Erhaltung von Stahl- und Stahlverbundbrücken im Bereich der Autobahndirektion Nordbayern. Seminar + Workshop „Schweißen und Schrauben“ an der FH München, April 2003
- [13] Bucak, Ö. Maier, D. H., Steiner, J.: Reparatur und Ertüchtigung von Straßenbrücken mit orthotroper Fahrbahn, Seminar + Workshop „Schweißen und Schrauben“ an der FH München, April 2003
- [14] N.N.: Verstärkung des Deckbleches orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen – Dauerfestigkeitsuntersuchungen (03.225), Optimierung der Klebtechnologie (03.226) und Computersimulation (03.227). Forschungsprogramm der BAST (läuft)
- [15] Heft B33 der Berichte der BAST. Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten

- [16] Neyer, M.: Ausarbeitung eines Sanierungskonzepts für Straßenbrücken mit orthotroper Fahrbahn. Dipl. Arbeit an der FH München Juli 2003 (unveröffentlicht).

Normen

- [N1] ENV 1993 – Teil 2-1: Eurocode 3 Teil 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Beuth Verlag, Berlin 2003
- [N2] DS 804. Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke. Bundesbahnenzentralamt München, 1983 und 2001
- [N3] Fachbericht 103 – Stählerne Brückenbauwerke, 1. Ausgabe, Mai 2004