

Roger Zimmerli
 PROSE AG
 Junior Design Engineer

Schadenanalyse und Reparaturlösung für Aluminium-Wagenkasten der Metro de Medellín, Kolumbien



Die Metro de Medellín

Die Stadt Medellín mit ca. 3 Mio. Einwohnern liegt in einem engen Tal auf 1'500 m Höhe. Das Metro-System der Stadt besteht im wesentlichen aus 2 Linien, der blauen Linie A und der orangenen Linie B und transportiert rund 300'000 Personen täglich. Durch die geographische Lage der Stadt besitzt die Bahn verhältnismäßig wenig Kurven. Die Laufleistung der zwischen 1986 und 1989 gebauten Fahrzeuge liegt bei 150'000 km/Jahr.



Aufgabenstellung

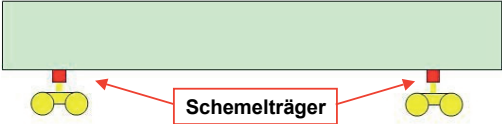
An den Schemelträgern der Motorwagen (aber auch an denjenigen der Zwischenwagen) sind nach zwölf Jahren Einsatz Risse aufgetreten. Ein Zuschweißen der Risse zeigte keine Wirkung, da sie erneut aufgetreten sind. So war an ein Weiterbestehen der Fahrzeuge bis 2025 nicht zu denken.

PROSE hat deshalb im Jahr 2008 den Auftrag erhalten, die Schäden zu analysieren und die Ursache der Risse zu ergründen. Zudem sollte PROSE Vorschläge zur Reparatur der beschädigten Fahrzeuge liefern.

PROSE
DESTINATION 2009

Aufgabenstellung

- Risse im Schemelträger nach 12 Jahren Betrieb
- Alle Motorwagen betroffen
- Nicht angetriebene Fahrzeuge teilweise betroffen
- Einsatz der Fahrzeuge geplant bis 2025



Das Diagramm zeigt einen grünen rechteckigen Schemelträger, der auf zwei gelben Achsen mit gelben Rädern ruht. Ein roter Pfeil weist auf den zentralen Teil des Trägers, beschriftet mit 'Schemelträger', hin.

4

Schadenanalyse


Die Risse am Schemelträger treten an drei Stellen auf:

- am Mittelteil auf dem der „Drehzapfen“ angeschraubt ist,
- bei den Luftleitungsdurchführungen und
- an den Kabelkanälen.

PROSE
DESTINATION 2009

Schadenanalyse

- Typisches Schadensbild am Schemelträger



Das Bild zeigt eine detaillierte Analyse von Rissen an einem Schemelträger. Oben sind vier kleine Detailaufnahmen mit Beschriftungen: 'Ductos de tubería', 'Pie amigo', 'Canaleta' und 'Refuerzo implementado'. Darunter ist eine größere Aufnahme des Trägers mit roten Kreisen, die die Rissstellen markieren. Unten sind weitere Detailaufnahmen mit Beschriftungen: 'Unión a viga longitudinal', 'Amortiguador', 'Viga', 'Prolongación de fisura'.

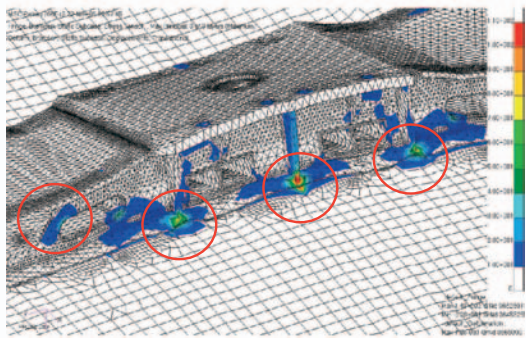
7

Auf Basis der zur Verfügung stehenden Unterlagen – Original-Festigkeitsberichte, Schweiss- und Montagezeichnungen sowie Bilder und Berichte zu den Rissen vom Kunden – konnte PROSE eine erste Festigkeitsberechnung durchführen. Die Resultate zeigen hohe Spannungen an den Stellen, welche in der Tat von Rissen betroffen sind.

PROSE
DESTINATION 2009

Schadenanalyse

- Erste FE-Rechnung zeigt kritische Bereiche



9

Abklärungen mit dem Kunden haben weiter ergeben, dass

- der Zustand der Strecke nicht Ursache der Schäden sein kann,
- grundsätzlich die reparierten Stellen nach zwei Monaten (bzw. 25'000 km Laufleistung) erneut Risse erhalten haben,
- die Ursache der Risse möglicherweise Eigenspannungen sind und dass
- die Querbeschleunigungen nicht relevant sind, so dass nur die Anfahrbeschleunigungen und Bremsverzögerungen von 1.1 m/s^2 bzw. 1.2 m/s^2 zu berücksichtigen sind.

Schadenshypothese I

Ein erster Besuch vor Ort beim Kunden zeigte noch weitere mögliche Ursachen. So deuten die Abnützungen am Drehzapfen wie auch an den Längsanschlägen auf heftige Stösse hin, welche auf den Schemelträger wirken (siehe auch Abbildung auf der nächsten Seite).

Schadenshypothese II

Die Abklärungen zum Projektstart, sowie die Inputs vom Kunden selber, die Bilder und Berichte etc. deuten darauf hin, dass das Design des Schemelträgers eher mangelhaft ist. So fehlt eine wichtige Schubrippe, was zu einer Deformation des ganzen Trägers bei Längsbelastung führt.

Schadenanalyse: Hypothese I

Die Metro de Medellin
Aufgabenstellung
Durchführung
Schadenanalyse
Reparaturlösung
Kundennutzen
Zusammenfassung

- Hohe Längsstöße ausgehend vom „Drehzapfen“
– Längsanschläge an DG oft beansprucht



Längsanschlag

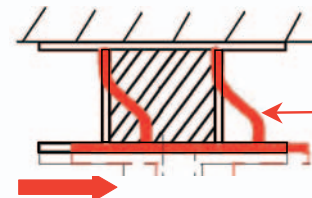
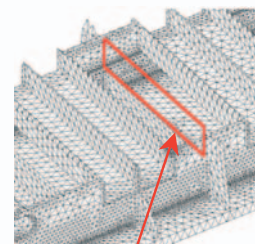
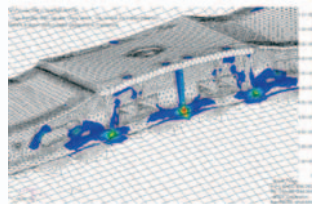
Queranschlag

11

Schadenanalyse: Hypothese II

Die Metro de Medellin
Aufgabenstellung
Durchführung
Schadenanalyse
Reparaturlösung
Kundennutzen
Zusammenfassung

- Mangelhaftes Design des Schemelträgers



Schubrippe fehlt:
→ Führt zu Deformation

12

Schadenshypothese III

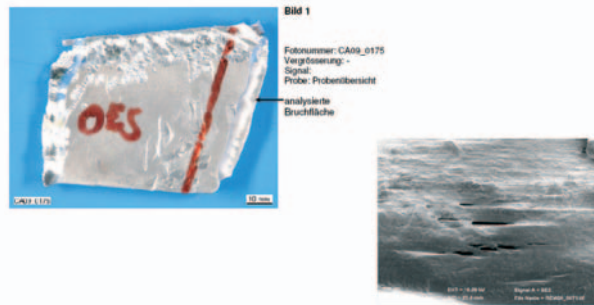
Der Schemelträger besteht aus UNIDUR-102 (AlZn4.5Mg1). Diese Legierung wird heute im Fahrzeugbau nicht mehr verwendet, da eine Anfälligkeit auf Spannungsrisskorrosion besteht. Deshalb haben die PROSE-Ingenieure bei einem Fahrzeug eine Werkstoffprobe entnommen, welche bei der Alcan Technology & Management AG in Neuhausen untersucht wurde. Die Ergebnisse dieser Analyse schlossen jedoch Spannungsrisskorrosion als Ursache der Rissbildung aus.

Schadenshypothese IV

Die ursprüngliche Festigkeitsberechnung wurde mit STRUDL durchgeführt, einem FE-Programm, welches jedoch Spitzenspannungen nicht sichtbar machen konnte.

Zudem wurde der ganze Schemelträger zu wenig konservativ ausgelegt. So wurden zum Vergleich die Spannungswerte des Festmaterials anstatt der Schweißnähte herangezogen, die Beschleunigungen am „Drehzapfen“ sind 1.5-mal zu tief angenommen

- Material UNIDUR-102 (AlZn4,5Mg1) anfällig auf Spannungsrisskorrosion
 - Werkstoffanalyse durch Alcan, Neuhausen



13

worden und das verwendete Merkblatt zur Dauerfestigkeitsbewertung von Aluminium-Schweisverbindungen DVS1608 beinhaltete keine Sicherheitsfaktoren und berücksichtigte nur durchgeschweisste Stossnähte statt den am Schemelträger verwendeten T-Nähten.

Reparaturlösung

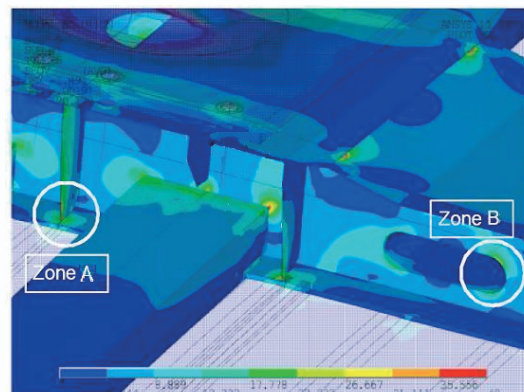
Die vorgenannten Hypothesen bildeten die Ausgangslage für die Reparaturlösung. Eine Verfeinerte FE-Berechnung zeigt nochmals die beiden kritischen Zonen, für welche PROSE daraufhin Reparaturlösungen entwickelte.

Zone A

Für den am stärksten betroffenen Mittelteil schlug PROSE schon beim ersten Kundenbesuch drei Reparaturkonzepte vor.

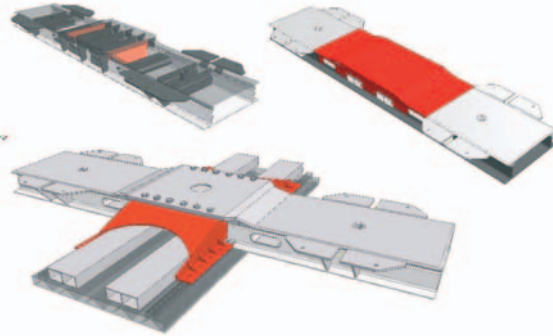
Das Konzept a) sieht vor, zusätzliche Rippen einzuschweißen, welche die Schubkräfte aufnehmen und die Deformation verhindern. (Bild auf der nächsten Seite; oben links).

- Verfeinerte FE-Rechnung zeigt die 2 kritischen Zonen



16

- 3 Konzepte zur Senkung der Spannungen in Zone A



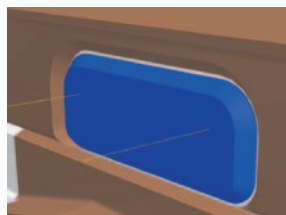
Beim Konzept b) soll der gesamte mittlere Teil durch einen neuen Teil ersetzt werden, welche die benötigten Schubrippen schon erhalten würden (im Bild oben rechts).

Während sowohl Konzept a) als auch b) einen grösseren Aufwand mit sich ziehen würden, ist Konzept c) (im Bild unten) sehr einfach und kostengünstig. Diese Variante geht von einem neuen Stahladapter aus, welcher an den bestehenden C-Schienen am Wagenboden und an den Befestigungsbohrungen für den Drehzapfen angeschraubt werden: Die vorhandenen Schubkräfte werden umgeleitet. Diese Variante wurde vom Kunden ausgewählt und so auch umgesetzt.

Zone B

Die Zone B betrifft die Durchführungen für die Luftleitungen. Hier hat PROSE sich zusammen mit dem Kunden entschieden, diese Durchführungen mit einem Deckel zu schliessen. Der Kunde wird die betroffenen Luftleitungen neu um den Schemelträger herum verlegen.

- Schliessen der Luftleitungsöffnung im Schemelträger



Die getroffenen Massnahmen führen zu einer massiven Reduktion der Spannungen in den betroffenen Bereichen.

Zone	Ursprüngliche Spannung	Nach Reparatur	Verbesserung
A	80 N/mm ²	52 N/mm ²	35 %
B	84 N/mm ²	20 N/mm ²	76 %

Optimierte Schweissanweisung

Für die endgültige Reparatur der Schemelträger wurde die Schweissanweisung angepasst. Mit dieser Verbesserung soll ein ordentlicher Zustand wiederhergestellt werden.

Als wesentlicher Teil dieser Optimierung des WIG-Schweisverfahrens gilt der Ersatz vom Schutzgas Argon durch Helium. Dies dient einer besseren Wärmezufuhr und der Reduktion von Schrumpfun-gen. Daneben wurden noch zusätzliche Parameter wie Gasvolumen, Stromstärke oder Vorwärmtemperatur angepasst.

Kundennutzen

Dem Kunden wurde eine einfache und kostengünstige Lösung präsentiert. So kann er die Sanierung der Fahrzeuge selbständig durchführen. Es sind nur noch die nötigen letztmaligen Reparaturschweissungen am Schemelträger durchzuführen. Ansonsten muss am Fahrzeug selber nicht mehr geschweisst werden. Die Fahrzeuge werden zudem die geforderte Lebensdauer bis 2025 erreichen.