



Abschlussbericht

der Schweizerischen

Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST

über die Entgleisung eines Güter-
zuges im Gotthard-Basistunnel

vom 10. August 2023

in Faido (TI)

Reg.-Nr. 2023081002

Allgemeine Hinweise zu diesem Bericht

Der alleinige Zweck der Untersuchung eines Unfalls oder eines schweren Vorfalls ist die Verhütung von Unfällen oder schweren Vorfällen beim Betrieb von Eisenbahnen. Es ist ausdrücklich nicht Zweck der Sicherheitsuntersuchung und dieses Berichts, Schuld oder Haftung festzustellen¹. Wird dieser Bericht zu anderen Zwecken als zur Unfallverhütung verwendet, ist diesem Umstand Rechnung zu tragen.

In diesem Bericht wird aus Gründen des Persönlichkeitsschutzes für alle natürlichen Personen und ihren Funktionen unabhängig von ihrem Geschlecht die männliche Form verwendet.

Die deutsche Fassung dieses Berichts ist das Original und daher massgebend.

¹ Artikel 15 des Eisenbahngesetzes vom 20 Dezember 1957 (EBG), Stand am 1. Juli 2024 (SR 742.101) sowie Artikel 20, Absatz 4 der Richtlinie (EU) 2016/798 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über Eisenbahnsicherheit.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	6
1.1 Kurzdarstellung.....	6
1.2 Überblick.....	7
1.3 Ursachen.....	7
1.4 Sicherheitsempfehlungen und Sicherheitshinweise	7
Summary	8
Brief description.....	8
Overview	9
Cause.....	9
Glossar	13
2 Untersuchung	14
2.1 Entscheid über die Einleitung einer Untersuchung	14
2.2 Begründung der Entscheidung	14
2.3 Umfang und Grenzen der Untersuchung.....	14
2.4 Untersuchungsteam.....	14
2.5 An der Untersuchung involvierte Personen und Stellen	15
2.6 Qualität der Kooperation.....	15
2.7 Untersuchungsmethoden und -techniken.....	15
2.8 Herausforderungen	16
2.9 Zusammenarbeit mit den Justizbehörden.....	16
3 Ereignis.....	17
3.1 Informationen über das Ereignis.....	17
3.1.1 Art des Ereignisses	17
3.1.2 Datum, Zeit, Ort	17
3.1.3 Ereignisort	17
3.1.4 Schäden	18
3.1.5 Weitere Folgen.....	18
3.1.6 Beteiligte und betroffene Personen und Unternehmen	19
3.1.7 Fahrzeuge	20
3.1.8 Infrastruktur.....	29
3.1.9 Regelwerk VPI.....	43
3.1.10 Sicherheitsmanagementsystem der Eisenbahnverkehrsunternehmen	44
3.1.11 Instandhaltung der Wagen und Radsätze	45
3.2 Sachverhalt.....	46
3.2.1 Ablauf der Entgleisung bei der Spurwechselstelle Faido.....	46
4 Auswertung.....	50
4.1 Aufgaben und Pflichten	50

4.1.1	Eisenbahnunternehmen, Infrastrukturbetreiberin.....	50
4.1.2	Für die Instandhaltung zuständige Stellen.....	50
4.1.3	Auswertung der Datenaufzeichnung.....	51
4.2	Fahrzeuge und technische Einrichtungen.....	53
4.2.1	Laufbandsatz BA 390.....	53
4.2.2	Wagen 11 (Wagen 466-2).....	54
4.2.3	Kontrolle und Vermessung der Radsätze von den Wagen 11 und 14.....	55
4.2.4	Gutachten – Metallurgische Untersuchung der Radsätze.....	59
4.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung.....	67
4.2.6	Technische Kontrolle vor Zugabfertigung.....	70
4.3	Menschliche Faktoren.....	70
4.3.1	Menschliche und individuelle Merkmale.....	70
4.3.2	Organisatorische Faktoren und Aufgaben.....	70
4.4	Feedback- und Kontrollmechanismen.....	71
4.4.1	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	71
4.4.2	Safety Management System.....	71
4.4.3	Prozesse.....	72
4.4.4	Aufsichtstätigkeit.....	72
4.4.5	Genehmigungen, Bescheinigungen, Bewertungsberichte.....	72
4.4.6	Entgleisungsdetektor.....	73
4.5	Frühere Ereignisse ähnlicher Art – Radscheibenbrüche.....	74
4.6	JNS Broken Wheels Gotthard.....	74
4.7	Literatur Review.....	75
4.7.1	Studie aus Schweden – thermomechanisches Verhalten von laufflächengebremsten Rädern.....	75
4.7.2	Wheel Tread Damage Guide T 963.....	76
4.7.3	Zusammenfassung Literatur Review.....	76
5	Schlussfolgerungen.....	77
5.1	Zusammenfassung.....	77
5.1.1	Eisenbahnverkehrsunternehmen.....	77
5.1.2	Infrastruktur.....	77
5.1.3	Rollmaterial.....	78
5.1.4	Rissinitiierung – Ermüdungsrisse – Radscheibenbruch.....	81
5.1.5	Safety Management System SBB Cargo AG, Transportdienstleistung erfüllen	81
5.2	Seit dem Ereignis getroffene Massnahmen.....	82
6	Sicherheitsempfehlungen.....	83
6.1	Radsätze mit LL-Bremssohlen, Mindestdurchmesser im Betrieb.....	83
6.1.1	Sicherheitsdefizit.....	83

6.1.2	Sicherheitsempfehlung Nr. 205.....	84
6.2	Ultraschallprüfung Radscheibe, VPI-Vorgaben.....	84
6.2.1	Sicherheitsdefizit.....	84
6.2.2	Sicherheitsempfehlung Nr. 206.....	85
6.3	Einfluss von Verbundstoffbremssohlen auf die thermischen Beanspruchungen der Räder.....	85
6.3.1	Sicherheitsdefizit.....	85
6.3.2	Sicherheitsempfehlung Nr. 207.....	86
6.4	Hydrostarweichen	86
6.4.1	Sicherheitsdefizit.....	86
6.4.2	Sicherheitsempfehlung Nr. 208.....	86
7	Sicherheitshinweis	87
7.1	Safety Management System SBB Cargo AG, Teil-Zugvorbereitung.....	87
7.1.1	Sicherheitsdefizit.....	87
7.1.2	Sicherheitshinweis Nr. 54.....	87

1 Zusammenfassung

1.1 Kurzdarstellung

Am 10. August 2023 war der mit zwei Lokomotiven BR 185 bespannte Güterzug 45016 von SBB Cargo mit 30 Güterwagen von mehreren Wagenhaltern und unterschiedlichen Bauarten von Chiasso nach Basel unterwegs.

Als der Zug 45016 zwischen Giubiasco und Bellinzona unterwegs war, stellte ein Lokführer, der in die entgegengesetzte Richtung fuhr, eine Rauchentwicklung an einem Wagen fest. Er verständigte die Betriebszentrale Süd der SBB in Pollegio. Als der Zug 45016 gegen 10:33 Uhr im Bahnhof Bellinzona ankam und aufgrund eines geplanten Lokführerwechsels anhielt, bekam der Lokführer des Zuges 45016 diese Information. Ein technischer Kontrolleur wurde aufgeboten. Die Bremsen des Wagens 14 wurden aufgrund der Meldung ausgeschaltet. Nach einer erfolgreichen Bremsprobe setzte der Zug 45016 um 12:07 Uhr seine Fahrt in Richtung Norden fort.

Ca. 10 km nach Einfahrt in das Südportal des Gotthard-Basistunnels, beim Tunnelkilometer 47, mit einer Geschwindigkeit von ca. 90 km/h, brach ein Fragment der rechten Radscheibe (Abbildung 19) der in Fahrtrichtung ersten Achse des elften Wagens weg. In der Folge lösten sich noch weitere Fragmente des Radkörpers (Abbildung 20 bis Abbildung 26). Bei km 46.7 (Abbildung 25 und Abbildung 41) verlor die Achse die Spurführung, entgleiste und hing ab diesem Zeitpunkt schräg unter dem Wagen.

In diesem Zustand fuhr der Güterzug ca. 7 km bis zur Multifunktionsstelle Faido (Abbildung 30). Die erste Weiche (W387) der Spurwechselstelle wurde von der Wurzel her befahren. Die Achse 1, die schräg unter dem Wagen 11 hing, zerstörte die Monoblock-Betonschwellen und alle Weichenantriebe. Ebenso wurden die Schienen und das Herzstück stark in Mitleidenschaft gezogen. Durch die Zerstörung der Weiche fiel deren Überwachung aus, wodurch die ETCS-Sicherungsanlage sofort eine Zwangsbremse für den Zug auslöste.

Die nachfolgende Weiche W386 der Multifunktionsstelle Faido wurde gegen die Spitze befahren. Die schräg hängende Achse 1 des Wagens 11 zerstörte auch diese Weiche komplett. Die Achsen 2–4 von Wagen 11 sowie die nachfolgenden Wagen 12 und 13 fuhren noch in der geraden Richtung ins Gleis 7000, entgleisten aber und kamen anschliessend in Schräglage, ca. 150 m nach der Tunnelquerwand zum Stillstand (Abbildung 8). Die erste Achse von Wagen 14 fuhr ebenfalls in gerader Richtung ins Gleis 7000, während die zweite Achse die Weiche W386 über den ablenkenden Strang in Richtung des Verbindungsgleises zur Tunnelröhre Ost befuhr (Abbildung 9). Der erste Teil von Wagen 14 wurde infolgedessen angehoben, über die erhöhte Mittelkonsole aus Beton geschoben und zerschellte an der Tunnelquerwand zwischen Gleis 7000 und dem Verbindungsgleis (Abbildung 9). Dies führte schlussendlich zur Zugtrennung zwischen Wagen 13 und 14. Der zweite Teil von Wagen 14 (Achsen 3 und 4) fuhr auf dem Verbindungsgleis weiter und kam nach dem Durchbrechen des Spurwechseltores zur Tunnelröhre Ost (Gleis 6000) in Schräglage zum Stillstand (Abbildung 11). Durch die Entgleisungsdynamik entgleisten auch die Wagen 15 bis 26.

Die Schäden an der Infrastruktur sowie an den entgleisten Wagen waren beträchtlich.

1.2 Überblick

Verkehrsmittel

Eisenbahn

Beteiligte Unternehmen

Eisenbahnverkehrsunternehmen

SBB Cargo AG (SBBC), Olten

Infrastrukturbetreiberin

SBB AG, Infrastruktur (SBBi), Bern

Weitere Unternehmen

Diverse Wagenhalter aus dem In- und Ausland, u. a. TRANSWAGGON AB (TWA SE), Helsingborg (SWE)

Beteiligte Fahrzeuge

Zwei Lokomotiven und dreissig Güterwagen unterschiedlicher Fahrzeugtypen, u. a. Wagen 11, Laaiis 24 74 422 0 466-2, S-TWASE

1.3 Ursachen

Die Ursache der Entgleisung des Güterzuges 45016 im Gotthard-Basistunnel ist der Radscheibenbruch des rechten Rades der ersten Achse von Wagen 11 mit anschliessendem Verlust der Führung der Achse unter dem Wagen und folglich der Zerstörung der Weichen der Spurwechselstelle Faido.

Der Radscheibenbruch ist die Folge einer thermischen Überbelastung der Lauffläche, mit Entstehung senkrechter Ermüdungsrisse, als Folge von zu hohen Zugspannungen an der Radlauffläche, die sich bis zum Steg weiterentwickelten und anschliessend zum Bruch der Radscheibe führten. Diese Rissentwicklung entstand langsam über eine längere Zeitspanne, die schwer quantifizierbar ist.

Zum Unfall bzw. zum Schadenausmass beitragende Faktoren:

Die Hydrostarweiche W386, mit oberhalb der Schwellenkante liegenden Stell- und Verriegelungselementen, wurde durch die schräg nach unten hängende Achse derart zerstört, dass die Weiche in eine undefinierte Stellung geriet. Dies hat dazu geführt, dass kein bestimmter Fahrweg mehr bestand.

1.4 Sicherheitsempfehlungen und Sicherheitshinweise

Mit diesem Bericht werden 4 Sicherheitsempfehlungen und ein Sicherheitshinweis ausgesprochen.

Summary

Brief description

On August 10th, 2023, SBB Cargo freight train 45016, hauled by two BR 185 locomotives, was en route from Chiasso to Basel with 30 freight wagons of different types and from several wagon keepers.

As train 45016 was travelling between Giubiasco and Bellinzona, an engine driver travelling in the opposite direction noticed smoke coming from one of the wagons. He informed the SBB South Train Control Centre in Pollegio. Train 45016 having stopped at Bellinzona station around 10:33 for a scheduled change of driver, the driver was informed. A technical inspector was called out, and the brakes on wagon 14 were switched off. After a successful brake test, train 45016 continued its journey northwards at 12:07.

Approximately 10km after entering the south portal of the Gotthard Base Tunnel, at kilometre 47, with a speed of 90 km/h, a fragment of the right-hand wheel disc (Figure 19) of the first wheelset on the eleventh wagon in the direction of travel broke away. As a result, other fragments of the wheel centre (Figure 20-Figure 26) came loose. At km 46.7 (Figure 25, Figure 41) the wheelset lost guidance, derailed and from then on hung at an oblique angle under the wagon.

The freight train travelled approx. 7km in this condition, as far as the Faido multifunction station (Figure 30). The train passed over a trailing switch at the first crossover (W387). The wheelset, which was hanging at an oblique angle under wagon 11, damaged the monobloc concrete sleepers and the complete switch mechanism. The rails and the frog were also badly damaged. The destruction of the switch caused the monitoring system to fail, which immediately triggered the ETCS safety system to initiate emergency braking on the train.

At the following switch (W386) at the Faido multifunction station, the train also ran over the facing point. wheelset 1 hanging at an oblique angle on wagon 11 also completely destroyed this switch. Wheelsets 2–4 of wagon 11 and the following wagons 12–13 were still travelling in a straight line onto track 7000, but then derailed and came to a standstill, tipped on their sides, approx. 150m after the tunnel bulkhead (Figure 8). The first wheelset of wagon 14 also ran straight towards track 7000, while the second wheelset ran over the W386 switch via the deflecting section towards the connecting track to the east tunnel tube (Figure 9). As a result, the first part of wagon 14 was lifted, pushed over the raised concrete centre console and smashed against the tunnel transverse wall between track 7000 and the connecting track (Figure 9). This ultimately led to the train coming apart between wagons 13 and 14. The second part of wagon 14 (wheelsets 3–4) continued on the connecting track and came to a standstill, tipped on its side, after breaking through the safety gate to the east tunnel tube (track 6000) (Figure 11).

Wagons 15 to 26 also derailed due to the dynamics of the derailment, causing considerable damage to the infrastructure and to the derailed wagons.

Overview

Mode of transport Railway

Companies involved

Railway undertaking	SBB Cargo AG (SBBC), Olten
Infrastructure manager	SBB AG, Infrastruktur (SBBi), Bern
Other companies	Various wagon keepers, amongst them
Third	TRANSWAGGON AB (TWA SE), Helsingborg (SWE)

Vehicles involved Two locomotives and thirty freight wagons of various types, amongst them wagon 11, Laalis 24 74 422 0 466-2, S-TWASE

Cause

The derailment of freight train 45016 in the Gotthard Base Tunnel was caused by a broken wheel disc on the right wheel of the first wheelset on wagon 11, as a result of which the wheelset lost guidance under the wagon and damaged the switch at the Faido crossover.

The wheel disc fracture was the result of thermal overloading of the wheel tread; excessive residual tensile stresses caused vertical fatigue cracks to form, which then extended to the wheel web and caused the wheel disc to fracture. The fractures developed relatively slowly, over a longer period of time which is difficult to establish.

Factors contributing to the accident:

The W386 Hydrostar switch, which has setting and locking elements located above the sleeper edge, was destroyed by the wheelset hanging down at an oblique angle in such a way that the switch blades moved into an undefined position, which meant that there was no longer a firm guidance.

Safety recommendations and safety advices

Wheelsets with LL brake blocks, minimum diameter in operation

Safety deficit

The document published by the JNS Broken Wheels task force on 28 July 2017 mentions that cracks of thermal origin may initiate in the rim of wheel type BA 004 in some applications. The task force defined short- and long-term measures to limit risks during operation and maintenance of the wheelsets, and proposed amendments to standards and regulations. One such risk control measure was to set the minimum diameter at 880mm for wheelset types BA 314 and BA 004.

In its final report of 11 July 2024, the JNS Task Force 'Accident Gotthard base tunnel – broken wheels' concludes that:

Wheelset type BA 390 is comparable to wheelset type BA 004. Four additional wheelset types (Db004-sa, Ri 025, R32, BA 304) were also identified as comparable. The risk control measures (minimum wheel diameter 880mm), which were published in the first JNS Broken Wheels on 28 July 2017, also apply to these wheelset types.

In an analysis of 74 cases of different wheelset types (Broken wheel – visual crack detection or cracks found in Non-Destructive Testing) showed that ten cases were registered involving a broken wheel disc or cracks in wheels detected during a visual inspection. In all of these ten cases, the wheelsets had a wheel diameter equal to or less than 880mm.

The broken wheel that is the subject of this report had a wheel diameter of 862mm after the last reprofiling.

Safety recommendation No 205

The STSB recommends that the European Union Agency for Railways (ERA) require ECMs to extend the risk mitigation measures proposed by the JNS Task Force to all types of wheelsets braked with composite brake blocks.

Ultrasonic wheel disc testing, VPI specific requirements

Safety deficit

VPI specific requirements for the maintenance of wheelsets currently include the following criteria:

At latest when the maximum mileage of a wheelset has been met (in this case 660,000km), or when its maximum installation period has been reached (in this case 8 years, whatever comes first), the wheelsets must be withdrawn and sent for wheelset maintenance.

Since the last IS2 maintenance step, the wheelset with the fractured wheel disc had travelled approx. 173,000km. The cracked wheel disc showed no signs of overheating or peeling paint. Nevertheless, as the results of the metallurgical testing show, the residual tensile stresses present on the tread are likely to have significantly contributed to the expansion of existing cracks or caused cracks in the first place. Cracks expand when tensile stresses due to cyclic loading are present in the area of the crack. The considerable residual stresses present on the tread are believed to have contributed significantly to the formation of cracks. A comparative investigation of the residual stresses using ultrasonic testing (this method only provides a local mean value of the residual stress in the wheel rim) and using X-ray diffraction testing showed that the ultrasonic measurements carried out

during maintenance only provide a limited indication of the residual stresses directly on the tread. The area on the tread responsible for crack initiation can therefore not be adequately identified.

The VPI-04 guideline stipulates that ultrasonic testing of the wheel rims or ultrasonic measurements of residual stresses must always be carried out during wheelset maintenance (IS1 and IS2 levels). IS1 and IS2 maintenance can only be carried out on a wheelset off the train. This practice, developed and established over many years, was introduced when freight wagons still had cast iron brake blocks. Nowadays there are different operating requirements for freight wagons. Freight trains travel at higher speeds. Cast iron brake blocks have been replaced by composite brake blocks. Maintenance specifications were not adapted when LL brake blocks were introduced. As a result, wheelset inspections conducted in accordance with current maintenance specifications are not able to detect the above-mentioned risk of critical cracking due to excessive residual stresses on the wheel disc surface at an early stage.

Safety recommendation No 206

The STSB recommends that the European Union Agency for Railways (ERA) require ECMs to adapt the interval and methodology criteria for maintenance specifications for wheelsets braked with composite brake blocks.

Influence of composite brake blocks on the thermal stresses of wheels

Safety deficit

Thermal overloads on the wheel surface occur during travel if the brake blocks are in contact with the wheel as a result of a fixed brake or if the brakes have not been fully released.

The document published on 28 July 2017 by the JNS Broken Wheels task force mentions that in the case of cracks on the rim of wheelset BA 004, the probability of thermally initiated defects is higher in some applications.

However, as a Swedish study published in 2021 shows, composite brake blocks lead to increased thermal stress on the wheel. Temperature is distributed unevenly on the tread, with noticeable and almost stationary hot spots around the wheel rim.

The UK Rail Safety and Standards Board (RSSB), an independent research body, demonstrated in its project 'Improving wheelset life by better understanding the causes of wheel damage (T963)' that prolonged exposure to heat due to severe braking on the tread can lead to residual compressive stress switching to residual tensile stress; this can cause the wheel to crack suddenly, with catastrophic consequences.

The results of the metallurgical investigation concluded that the cracks formed because of thermal overload on the tread. Radial cracks that develop from fatigue cracks on the tread are serious defects that may eventually cause a wheel disc to break if not detected and treated at an earlier stage. On the cracked wheel disc, no signs of overheating were found on the paint in the area of the wheel web and under the wheel rim. Nevertheless, as the results of the metallurgical investigation show, the residual tensile stresses present on the tread are likely to have significantly contributed to the formation of cracks or caused them in the first place.

The characteristics of wheelsets, wheels and brake blocks are part of the Rolling Stock – Freight Wagons technical specification for interoperability (TSI) subsystem.

Safety recommendation No 207

The STSB recommends that the European Union Agency for Railways (ERA) commission a study on the impact of composite brake blocks on the thermal stresses on wheels.

Hydrostar switches**Safety deficit**

Hydrostar switches transmit the changeover forces to all point locking and central locking systems hydraulically. In this design, the locks and the stretcher bars, which serve as a fallback for the point locking device, are located above the top edge of the sleepers.

If part of a wagon or a derailed wheelset hangs below the top edge of the rail, there is a risk of these parts coming into contact with the point locking device or the stretcher bars and ultimately damaging or even ripping off the components.

Switches that are no longer locked may then move as a result of dynamic vibrations generated by passing trains. Unlocked switches cause derailments.

Safety recommendation No 208

The STSB recommends that the Federal Office of Transport (FOT) require infrastructure managers operating or planning to operate on their network such switches with locking devices above the top edge of the sleeper to assess or reduce the risk of mechanical damage to the tongue and centre locking rods above the sleeper in order to prevent a failure of the switch locking devices.

Safety advice***Safety Management System SBB Cargo AG, Train preparation*****Safety deficit**

The manual for the technical wagon service regulates the tasks of the engineering technical inspector (ETI), the technical inspection of wagons and the measures that must be taken in the event of irregularities on the wagon, and also describes the uniform quality standard. This manual mentions that in the event of irregularities on the wagon, the ETI must document the damage on an electronic tablet.

The results of the inspection during train preparation in Chiasso were recorded on various documents and then transferred to the upper part of train list 45016. Manually recording a summary of information on a verification document intended to show procedural compliance is suboptimal, as errors can be introduced when information is transferred.

Safety advice No 54

Target group: SBB Cargo AG

To ensure a uniform quality standard, SBB Cargo AG should record the results of technical inspections and train preparation on the same medium.

Glossar

AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung vom 15. Dezember 1983, Stand am 1. November 2020 (SR 742.141.11)
AVV	Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen. Die Präambel des Vertrages beschreibt: <i>Die Verwendung von Güterwagen als Beförderungsmittel durch Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) erfordert die Schaffung von Vertragsbestimmungen, die die Rechte und Pflichten der Vertragspartner festlegen.</i>
BAV	Bundesamt für Verkehr
COTIF	Übereinkommen über den internationalen Eisenbahnverkehr
DED	Dragging Equipment Detection: Profilortung nach unten
EBV	Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung) vom 23. November 1983, Stand am 1. Januar 2021 (SR 742.141.1)
ECM	Entity in Charge of Maintenance (für die Instandhaltung zuständige Stelle)
ERA	European Union Agency for Railways – Eisenbahnagentur der Europäischen Union
ETCS	European Train Control System
FDV	Schweizerische Fahrdienstvorschriften (R 300.1–.15) vom 4. November 2019, Stand am 1. Juli 2020 (SR 742.173.001)
FS	Full Supervision
GBT	Gotthard-Basistunnel
HFO	Heissläufer- / Festbrems-Ortungsanlage
LL	«low noise, low friction» (wenig Lärm, wenig Reibung)
LRZ	Lösch- und Rettungszug SBB Infrastruktur
MA	Movement Authority
MFS	Multifunktionsstelle
PAO	Profil- und Antennenortungsanlage
RBC	Radio Block Center
RLC	Radlastcheckpoint: Radlastwaage zur Erkennung von asymmetrischen Radlasten und Überlasten, sowie Radunrundheiten bei fahrenden Zügen.
RSSB	Rail Safety and Standards Board
SN/EN 13262	Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelles – Räder. Produkthanforderungen, Version 2020, <i>[gültig für Stahlgüte ER 7]</i>
TKC	Technischer Kontrolleur Cargo
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
UES	Unconditional Emergency Stop
VAP	Verband der verladenden Wirtschaft
VPI	Vereinigung der Privat Güterwagen-Interessenten
VPI-01	Leitfaden VPI EMG, Instandhaltung von Güterwagen, Allgemeiner Teil, Revisionsfristen
VPI-04	Leitfaden VPI EMG, Instandhaltung Güterwagen, Radsätze
VPI-09	Leitfaden VPI EMG, Instandhaltung Güterwagen, Zerstörungsfreie Prüfung
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
ZIS	Zug Informationssystem (zuvor CIS: Cargo-Informations-System)
ZKE	Zugkontrollenrichtungen der Infrastruktur auf der Strecke

2 Untersuchung

2.1 Entscheid über die Einleitung einer Untersuchung

Am 10. August 2023 um 14:00 Uhr traf die Meldung über die Entgleisung eines Güterzuges im Gotthard-Basistunnel beim Untersuchungsdienst der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) ein. Die SUST eröffnete eine Untersuchung und publizierte dies mit einem Vorbericht.

2.2 Begründung der Entscheidung

Der Entscheid der SUST für die Eröffnung einer Untersuchung erfolgte nach Art. 20 VSZV² sowie in Anwendung der Kriterien gemäss Art. 3 Bst. a, Art. 4 und in Ausführung von Art. 20 Abs. 1 der Richtlinie (EU) 2016/798 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über die Eisenbahnsicherheit.

2.3 Umfang und Grenzen der Untersuchung

Nach den ersten Erkenntnissen der metallurgischen Untersuchung an der gebrochenen Radscheibe verfasste die SUST einen Zwischenbericht mit zwei Sicherheitsempfehlungen, der am 22. September 2023 publiziert wurde. Ebenfalls wurde ein Safety Alert im SIS³ ausgelöst.

Neben den Ermittlungen der Ursache für den Radscheibenbruch untersuchte die SUST unter anderem das ZKE-Überwachungssystem, sowie die Hydrostarweichen. Die vorhandene, einschlägige Fachliteratur und entsprechende Publikationen aus Studien und Forschung wurden in die Betrachtungen miteinbezogen.

2.4 Untersuchungsteam

Die Untersuchung wurde von einem Untersuchungsleiter der SUST geleitet, der fachgebietsbezogen durch weitere Untersuchungsleiter und unabhängige, mandatierte Untersuchungsbeauftragte unterstützt wurde. Die Personendaten unterliegen dem Datenschutz gemäss schweizerischem Recht.

² SR 742.161

³ SIS: Das Safety Information System SIS ist ein System für Aufsichts- und Untersuchungsbehörden, das ermöglicht, untereinander Sicherheitswarnungen auszutauschen.

2.5 An der Untersuchung involvierte Personen und Stellen

Im Rahmen der Untersuchung wurden die nachfolgenden in den Unfall involvierten Personen, Unternehmen und Stellen befragt, die untersuchungstechnisch massgebliche Informationen vorlegen konnten:

- Eisenbahnverkehrsunternehmen;
- Infrastrukturbetreiberin;
- Wagenhalter;
- ECM;
- Lokführer;
- Technische Kontrolleure.

Nach Abschluss der Untersuchung hat die SUST einen Berichtsentwurf erarbeitet und sie allen von der Untersuchung direkt Betroffenen und an der Untersuchung Beteiligten gemäss Art. 47 Abs. 4 VSZV zur Stellungnahme unterbreitet.

2.6 Qualität der Kooperation

Die schwedische Untersuchungsstelle (NIB-SE) wurde über die Entgleisung im GBT umgehend durch die SUST informiert, da der Wagen 11 mit der defekten Achse in Schweden immatrikuliert war. Die NIB-SE organisierte die Kontaktdaten zum Fahrzeughalter in Schweden. Die SUST informierte die NIB-SE regelmässig über die Untersuchungsfortschritte. Die Zusammenarbeit zwischen SUST und NIB-SE war einwandfrei.

2.7 Untersuchungsmethoden und -techniken

Für die Untersuchung standen zur Verfügung und wurden ausgewertet:

- Bestandsaufnahme auf der Unfallstelle;
- Fotos;
- Metallurgische Gutachten;
- Diverse Vermessungsprotokolle;
- Fahrdaten des Zuges;
- Datenaufzeichnungen der Sicherungsanlagen, der Leittechnik sowie der Zugkontrolleinrichtungen;
- Videoüberwachung der Multifunktionsstelle Faido;
- Technischen Daten der Wagen;
- Instandhaltungsdokumentationen;
- Gleispläne;
- Befragungen der Beteiligten;
- Fachliteratur und Publikationen.

2.8 Herausforderungen

Während der Untersuchung vor Ort wurde die SUST mit folgenden Herausforderungen konfrontiert:

- Die Temperatur während den Spurensicherungen sowie bei der Bergung der Teile im Tunnel bei der Multifunktionsstelle (MFS) Faido lag bei ca. 42 °C.
- Sehr enge Platzverhältnisse für die Bergung der Teile im Tunnel, die für die Untersuchung nötig waren.
- Die lange Dauer zwischen dem Unfalltag am 10. August 2023 und dem 18. September 2023, an welchem die letzten, relevanten Wagen für die Untersuchung zugänglich waren.

2.9 Zusammenarbeit mit den Justizbehörden

Die SUST führt die Untersuchung unabhängig von Verfahren der Justizbehörden durch. Einzig anlässlich der Faktenaufnahmen (Art. 23 Abs. 2 VSZV⁴) erfolgte eine Koordination mit der Staatsanwaltschaft Tessin. Die Ergebnisse der durch die SUST in Auftrag gegebenen metallurgischen Untersuchung wurden auf Antrag der Staatsanwaltschaft Tessin zur Verfügung gestellt.

⁴ SR 742.161

3 Ereignis

3.1 Informationen über das Ereignis

3.1.1 Art des Ereignisses

Entgleisung eines Güterzuges

3.1.2 Datum, Zeit, Ort

10. August 2023, ca. 12:50 Uhr, Gotthard-Basistunnel, MFS Faido.

3.1.3 Ereignisort

Der 57 km lange Gotthard-Basistunnel besteht aus zwei parallel verlaufenden Tunnelröhren. Das Nordportal befindet sich in Erstfeld (Tunnelkilometer 0) und das Südportal in Bodio (Tunnelkilometer 57). Der mittlere Achsabstand zwischen den beiden Röhren beträgt 40 Meter. In einem Abstand von 325 m befinden sich zwischen den beiden Röhren druckdichte Querverbindungen.

An zwei Stellen, in den Drittelpunkten Faido und Sedrun, liegen Multifunktionsstellen mit Nothaltestellen und Spurwechselstellen zwischen den beiden Röhren.



Abbildung 1: Übersichtskarten zum Ort des Unfalls. Quelle der Karte: Bundesamt für Landestopografie.

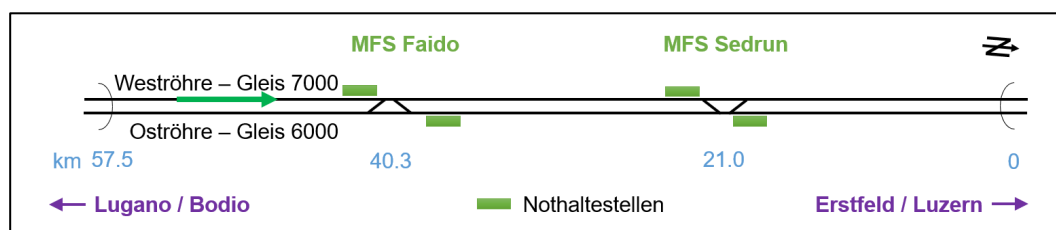


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Gotthard-Basistunnels.
Hinweis: **Grüner Pfeil:** Fahrtrichtung des Zuges 45016. Dieser wird bei den folgenden Abbildungen in gleicher Weise verwendet und dient jeweils als Orientierungshilfe.

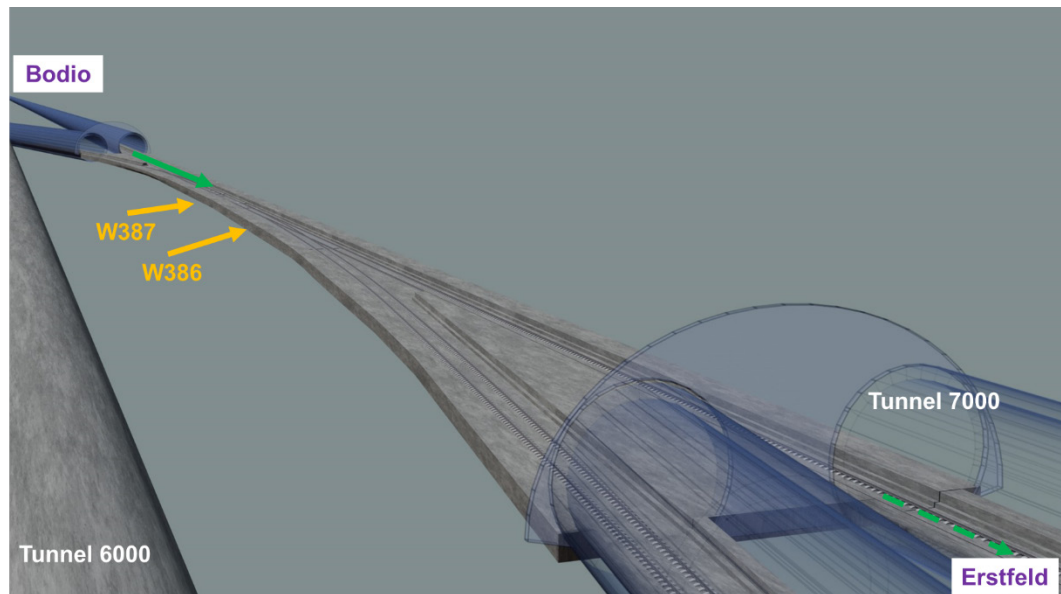


Abbildung 3: Multifunktionsstelle Faido.

3.1.4 Schäden

3.1.4.1 Personen

Keine.

3.1.4.2 Fahrzeuge

Die entgleisten und teilweise umgekippten Wagen wurden stark beschädigt, einige davon komplett zerstört. Die Zugbildung mit den involvierten Wagen ist der Anlage 1 zu entnehmen.

3.1.4.3 Infrastruktur

Die Infrastruktur wurde im Bereich der Multifunktionsstelle Faido beträchtlich beschädigt. Die zwei Weichen und das Spurwechseltor in der Verbindung zur Tunnelröhre Ost wurden komplett zerstört.

Die Schäden an der Infrastruktur zwischen km 47 und km 40 sind im Kapitel 3.1.8.1.3 beschrieben.

3.1.5 Weitere Folgen

42 Tage nach dem Unfall waren alle Fahrzeuge aus dem Tunnel geborgen.

Nach dem Unfall mussten beide Tunnelröhren für den Verkehr gesperrt werden.

Der Betrieb in der Tunnelröhre Ost (Gleis 6000) wurde nach der provisorischen Installation eines mobilen Erhaltungstores anstelle des zerstörten Spurwechseltors bei der Spurwechselstelle Faido am 23. August 2023 mit verminderter Geschwindigkeit wieder freigegeben.

Während der Komplettsperre des Gotthard-Basistunnels wurden alle Züge über die Gotthard-Bergstrecke umgeleitet, was zu einer markanten Fahrzeitverlängerung führte.

Die komplette Wiederinbetriebnahme des Tunnel erfolgte am 2. September 2024.

3.1.6 Beteiligte und betroffene Personen und Unternehmen**3.1.6.1 Beteiligte und betroffene Unternehmen****3.1.6.1.1 Infrastrukturbetreiberin**

SBB AG, Infrastruktur (SBBI), Bern

3.1.6.1.2 Eisenbahnverkehrsunternehmen

SBB Cargo AG (SBBC), Olten

3.1.6.1.3 Fahrzeughalter

Wagen 11 und 14: TRANSWAGGON AB (TWA SE), Schweden

3.1.6.1.4 ECM Wagen 11

ECM 1 bis 3: TRANSWAGGON AG (TWA CH), Zug

ECM 4: Diverse

3.1.6.2 Beteiligte und betroffene Personen – Bahnpersonal**3.1.6.2.1 Lokführer Zug 45016 Chiasso–Bellinzona**

Person	Jahrgang 1977 Anstellung bei SBBC
Berechtigung	BAV ⁵ -Ausweis Kategorie B
Dienstantritt	10. August 2023 in Chiasso

3.1.6.2.2 Lokführer Zug 45016 Bellinzona–GBT

Person	Jahrgang 1982 Anstellung bei SBBC
Berechtigung	BAV-Ausweis Kategorie B
Dienstantritt	10. August 2023 in Bellinzona

3.1.6.2.3 Technischer Kontrolleur Cargo Chiasso

Person	Jahrgang 1967 Anstellung bei SBBC
Berechtigung	Technischen Kontrolleur TKC Cargo, seit 1990 in dieser Funktion tätig

3.1.6.2.4 Technischer Kontrolleur Cargo Bellinzona

Person	Jahrgang 1980 Anstellung bei SBBC
Berechtigung	Technischen Kontrolleur TKC Cargo, seit 2006 in dieser Funktion tätig

⁵ BAV: Bundesamt für Verkehr

3.1.7 Fahrzeuge

3.1.7.1 Zug 45016

3.1.7.1.1 Beschreibung

Der Güterzug 45016 war mit zwei Lokomotiven (BR 185) und 30 Güterwagen von mehreren Wagenhaltern und unterschiedlichen Bauarten von Chiasso nach Basel unterwegs.

3.1.7.1.2 Lokomotiven

An der Spitze des Zuges befanden sich die Lokomotiven BR 185 110-4 (bedient) und die BR 185 104-7 (ferngesteuert). Die durch die SUST durchgeführten technischen Kontrollen ergaben keine Beanstandungen.

3.1.7.1.3 Wagen 1 bis 10

Die Wagen 1 bis 10 wurden durch die SUST im Tunnel und später nochmals ausserhalb des Tunnels untersucht.

Alle Bremsen waren eingeschaltet und alle Bremsumstellvorrichtungen standen auf Stellung «G». Alle Wagen waren in ordnungsgemäsem Zustand. Die Kontrolle der Wagen 1 bis 9 ergab keine Beanstandungen.

Die Schraubenkupplung zwischen den Wagen 10 und 11 (Abbildung 4) hielt den vordersten Teil des Wagens 11 in vertikaler Lage relativ stabil und verhinderte somit, dass die Achse 1 des elften Wagens vollständig auf dem Tunnelboden auflag.

Als Folge wurde die Zughakenführung der hintersten Kupplung des Wagens 10 leicht nach unten verbogen.



Abbildung 4: Aufnahme der Kupplung zwischen Wagen 10 und 11 nach dem Stillstand des Zuges. Im Bereich unterhalb des roten Pfeiles befindet sich die Achse 1 mit dem gebrochenen Rad des elften Wagens.

3.1.7.1.4 Wagen 11

Der Wagen 11 (24 74 422 0 466-2) bestand aus zwei kurzgekuppelten zweiachsigen Wagenhälften der Bauart Laalis. Die abgebrochenen Radscheibenelemente stammen von der rechten Radscheibe der Achse 1. Die Achse stand nicht mehr 90° quer unter dem Wagenkasten, sondern wurde um ca. 45° in Fahrtrichtung nach hinten gedrückt (Abbildung 5). Die Blattfederpakete verblieben am Wagenkasten.

Beide Bremsdreiecke der Achse 1 waren im Bereich der Bremssohlenhalter stark beschädigt (Abbildung 6). Der in Fahrtrichtung hintere rechte Bremssohlenhalter war weitgehend zerstört; er wies massive Schleifspuren vom Betonboden auf.

Die Achsen 2 – 4 waren intakt. Alle Radscheiben sowie einige Achslagergehäuse wiesen Beschädigungen auf, die auf die Entgleisung zurückzuführen sind.

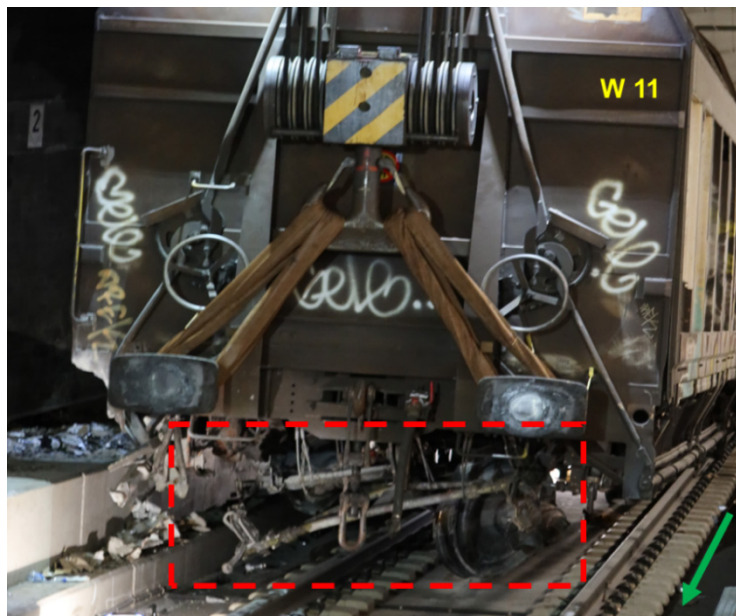


Abbildung 5: Wagen 11. Mittig die ca. 45° nach hinten verschobene Achse mit gebrochener Radscheibe.



Abbildung 6: Detailaufnahme der Achse. Im gelben Kreis ist der Rest der gebrochenen Radscheibe sichtbar. Im Vordergrund ist das herunterhängende, in Fahrtrichtung vordere, Bremsdreieck erkennbar.

3.1.7.1.5 Wagen 12 und 13

Ausser den entgleisungsbedingten Schäden waren bei der visuellen Kontrolle der Wagen 12 (Abbildung 7) und 13 (Abbildung 8) keine Mängel feststellbar.



Abbildung 7: Wagen 12 (Quelle: Kapo TI).



Abbildung 8: Wagen 13 (Quelle: Kapo TI).

3.1.7.1.6 Wagen 14

Beim Wagen 14 handelt es sich um die gleiche Bauart wie die des Wagens 11 mit zwei kurzgekuppelten, zweiachsigen Wagenhälften [*später im Bericht werden die Bezeichnungen Wagen 14-1 und 14-2 verwendet*]. Die erste Achse (A1) befand sich unter dem Wagenkasten 14-1 im Tunnel Gleis 7000 (Abbildung 9). Die zweite Achse (A2) befand sich unter dem Wagen 14-1 im Verbindungsgleis zum Gleis 6000. Der Wagenkasten 14-1 zerschellte an der Tunnelquerwand und wurde komplett zerstört.



Abbildung 9: Der komplett zerstörte Wagen 14-1 liegt quer an der Tunnelwand auf der Mittelkonsole (Aufnahme in Fahrtrichtung) zwischen Gleis 7000 und dem Verbindungsgleis zur Tunnelröhre Ost. Die gestrichelte rote Linie stellt das effektive Profil von Wagen 14-1 dar. Die Wagen 14-2, 15 und 16 kamen im Verbindungstunnel Richtung Tunnelröhre Ost zum Stillstand.



Abbildung 10: Detailaufnahme von Wagen 14-1. Anhand der rot gestrichelten Linie soll die Lage des Wagenbodens dargestellt werden.

Der Wagenkasten 14-2 durchbrach das fest installierte und im Normalzustand geschlossene Spurwechsellor in Richtung der Tunnelröhre Ost (Gleis 6000). Die dritte Achse von Wagen 14 wurde abgerissen und lag nach dem Spurwechsellor auf dem Betonbankett im Bereich der Tunnelröhre Ost neben dem Wagen (Abbildung 11).

Die vierte Achse hing an ihrer angestammten Position und intakt am Wagenkasten vor dem Spurwechseltor (Abbildung 12).

Die Bremsen von Wagen 14 waren ausgeschaltet.

Nach der Bergung wurden die vier Achsen von Wagen 14 in einer Instandhaltungswerkstatt vertieft untersucht.

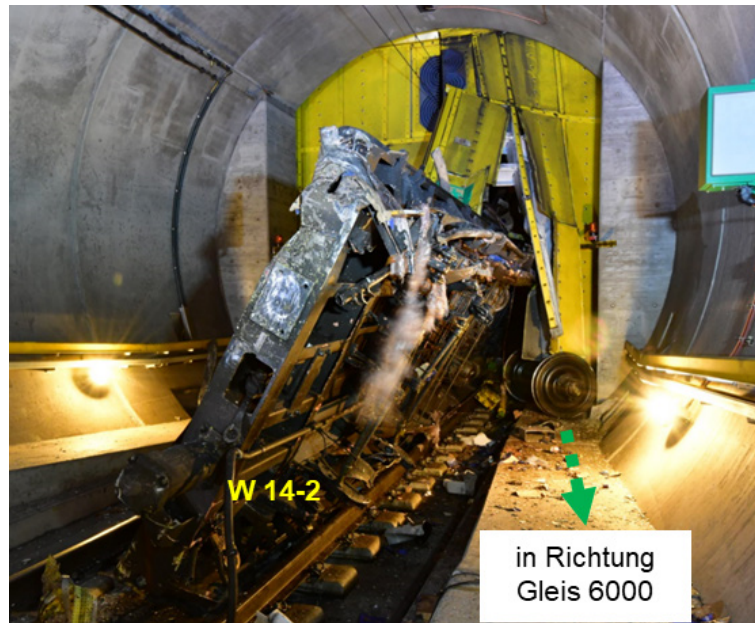


Abbildung 11: Wagen 14-2 durchbrach das Spurwechseltor. Rechts auf dem Bankett befindet sich die abgerissene Achse 3 (Aufnahme aus der Tunnelröhre Ost gegen die Fahrtrichtung gesehen).



Abbildung 12: In Fahrtrichtung rechtes Rad der Achse 4 von Wagen 14-2. Die hintere Wagenhälfte durchbrach das Spurwechseltor nicht und kam davor zum Stillstand. Die Achse hing an ihrer ursprünglichen Position, die Bremsen waren gelöst.

3.1.7.1.7 Wagen 15

Der Wagen 15 lag hinter dem zweiten Teil des Wagens 14 im Verbindungstunnel kurz vor dem Spurwechseltor und war umgekippt.

Die Achse 1 wies keine Spurkranzbeschädigungen auf (Abbildung 13). Das Bremsdreieck sowie die Bremssohlen waren intakt.

Die Achsen 2–4 wiesen starke Spurkranzbeschädigungen auf.



Abbildung 13: Wagen 15, Achse 1, Rad links.

3.1.7.1.8 Wagen 16 bis 26

Die Wagen 16 bis 26 befanden sich nach der Weiche W386 auf dem Verbindungsgleis in Richtung Tunnelröhre Ost (Gleis 6000).

Ausser den entgleisungsbedingten Schäden konnten bei der visuellen Kontrolle sämtlicher Wagen keine weiteren Mängel festgestellt werden.



Abbildung 14: Wagen 19 (offene Schiebewand und Ladungsverschiebung als Folge des Aufpralls).



Abbildung 15: Wagen 20 und 21.



Abbildung 16: Wagen 21 und 22 (Quelle: Kapo TI).



Abbildung 17: Wagen 24 (Quelle: Kapo TI).

3.1.7.1.9 Wagen 27 bis 30

Die letzten vier Wagen des Zuges (Wagen 27 bis 30) sind nicht entgleist. Bei der visuellen Kontrolle an den Wagen wurden keine Mängel festgestellt. Bei den Wagen 27 bis 29 handelte es sich um Wagen mit Gefahrgutkennzeichnung mit der UN-Nummer «1093» (Acrylnitril stabilisiert) und der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr «336». Die Kesselwagen waren leer und ungereinigt.



Abbildung 18: Wagen 30 am Zugschluss (Quelle: Kapo TI).

3.1.7.1.10 Feststellungen

Im Tunnel bei km 47.30 wurde das erste Radfragment der Achse 1 des Wagens 11 gefunden (Abbildung 19). Zwischen km 47.10 und km 46.70 wurden sechs weitere Radfragmente gefunden (Abbildung 20 bis Abbildung 25).

Im Bereich der ersten Weiche W387 der Multifunktionsstelle Faido bei km 40.50 wurde das letzte Radfragment gefunden (Abbildung 26).



Abbildung 19: Erstes Fragment [1] bei km 47.30.



Abbildung 20: Fragment [2] bei km 47.10.



Abbildung 21: Fragment [3] bei km 46.93.



Abbildung 22: Fragment [4] bei km 46.90.



Abbildung 23: Fragment [5] bei km 46.80.



Abbildung 24: Fragment [6] bei km 46.77.



Abbildung 25: Fragment [7] bei km 46.70.



Abbildung 26: Fragment [8] bei km 40.50.

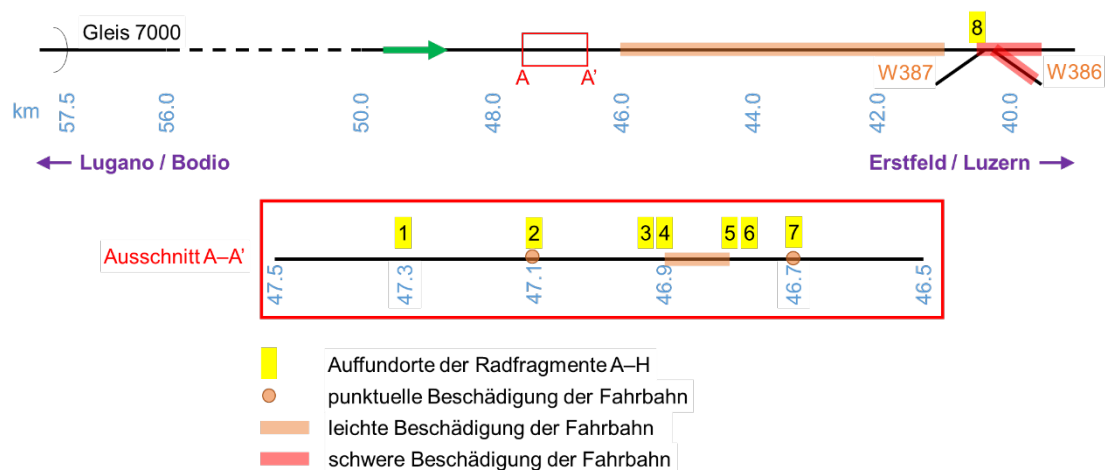


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Fundorte der Fragmente [1] – [8].

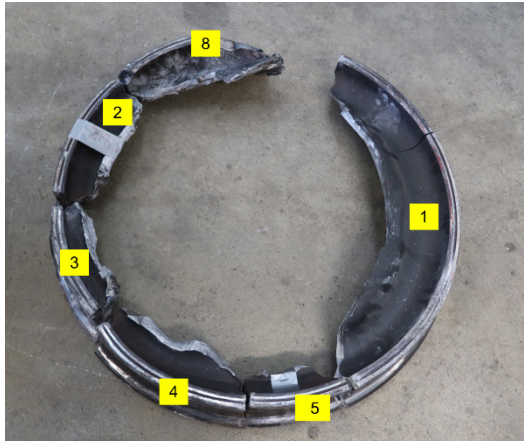


Abbildung 28: Zusammenstellung der Fragmente.

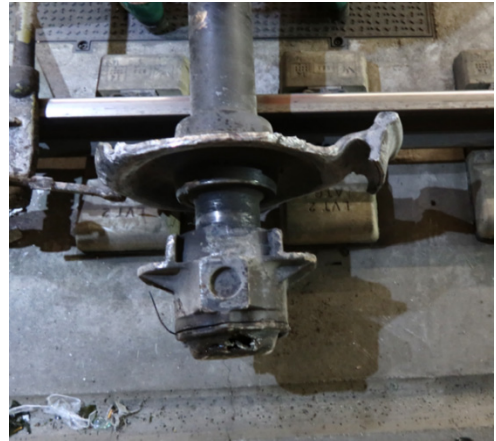


Abbildung 29: Rest der gebrochenen, rechten Radscheibe.

3.1.8 Infrastruktur

3.1.8.1 Bahnanlage

3.1.8.1.1 Beschreibung der Multifunktionsstelle Faido

Bei der Multifunktionsstelle Faido ist neben den Nothaltestellen in beiden Tunneln eine Spurwechselstelle zwischen den beiden Tunnelröhren vorhanden. Diese Verbindungen dienen insbesondere bei Instandhaltungsarbeiten oder bei betrieblichen Störungen zum Wechseln in die andere Tunnelröhre. Im Normalfall benutzen die Züge in südlicher Richtung die östliche Röhre (Gleis 6000) und diejenigen in nördlicher Richtung die westliche Röhre (Gleis 7000). Findet ein Spurwechsel statt, müssen hierzu die im Normalbetrieb geschlossenen Spurwechseltore in den entsprechenden Verbindungstunneln geöffnet werden. Diese Tore verhindern ein Überströmen des bei einer Zugdurchfahrt entstehenden hohen Luftdrucks in die andere Röhre. Zudem wird bei einem Brand im Tunnel verhindert, dass Rauch in die andere Tunnelröhre gelangen kann. In der westlichen Röhre sind zwei Schnellfahrweichen (W386 und W387) eingebaut (Abbildung 30, Abbildung 31). Die in Fahrtrichtung Norden erste Weiche W387 wird von der Wurzel her, die zweite Weiche W386 gegen die Spitze befahren. Die Distanz zwischen der Spitze der Weiche W386 und dem Spurwechseltor beträgt ca. 270 m.

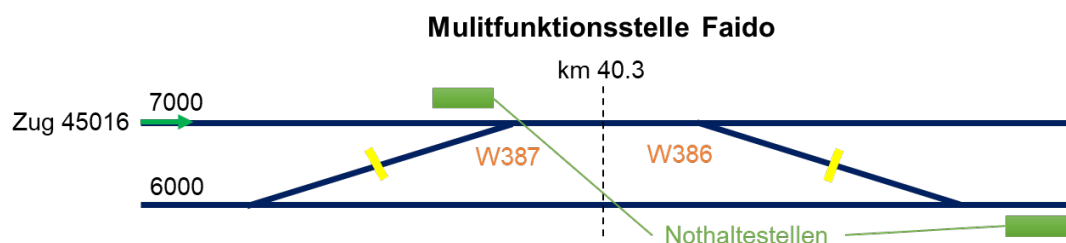


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Multifunktionsstelle Faido. Gelb: Spurwechseltore.



Abbildung 31: Graphische Darstellung der Multifunktionsstelle Faido mit der Situierung der Fahrzeuge nach dem Stillstand.

3.1.8.1.2 Vereinfachte Funktionsbeschreibung der Hydrostarweiche

Die Weichen W386 und W387 sind Schnellfahrweichen des Typs Hydrostar⁶. Die Verschlüsse der Weichen sind nicht mit herkömmlichen elektromechanischen, sondern mit hydraulischen Antrieben versehen. Das bewegliche Herzstück wird ebenfalls hydraulisch umgestellt. Die Weichenzungen und das bewegliche Herzstück werden hydraulisch in der Endlage verriegelt resp. verschlossen.

Die Verschlüsse sowie die Zungenverbindungsstangen, die als Rückfallebene für den Spitzenverschluss dienen, befinden sich oberhalb der Schwellenoberkante (Abbildung 33).

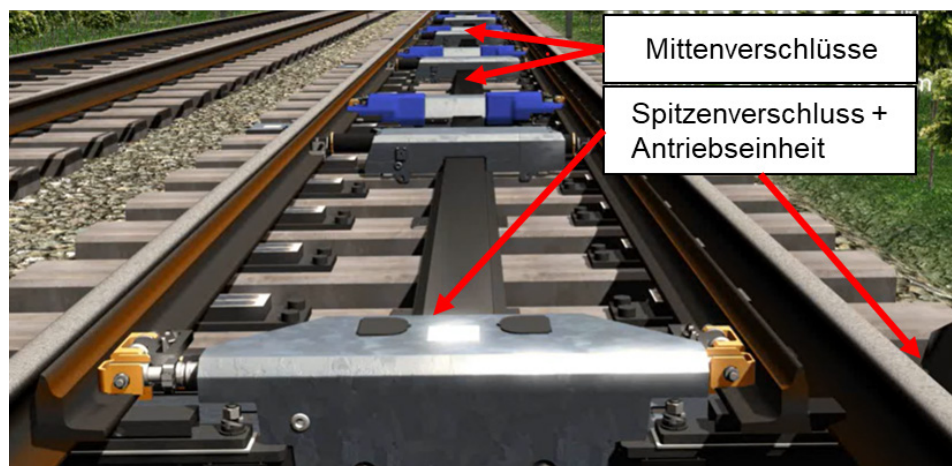


Abbildung 32: Stellvorrichtung der Zungen einer Hydrostarweiche (Quelle: Voestalpine, Komponentenbeschreibung: SUST).

⁶ Registrierte Marke von Voestalpine.

Mittig oben befinden sich der Spitzenverschluss sowie die Verbindungsstangen zwischen Verschluss und Zungen. Die Zungenendlage wird durch mehrere Kontakte im Spitzenverschluss und in den Zungenverbindungsstangen sowie durch den Hydraulikdruck überwacht (Abbildung 33). Sämtliche Bauteile befinden sich oberhalb der Schwellenoberkante.

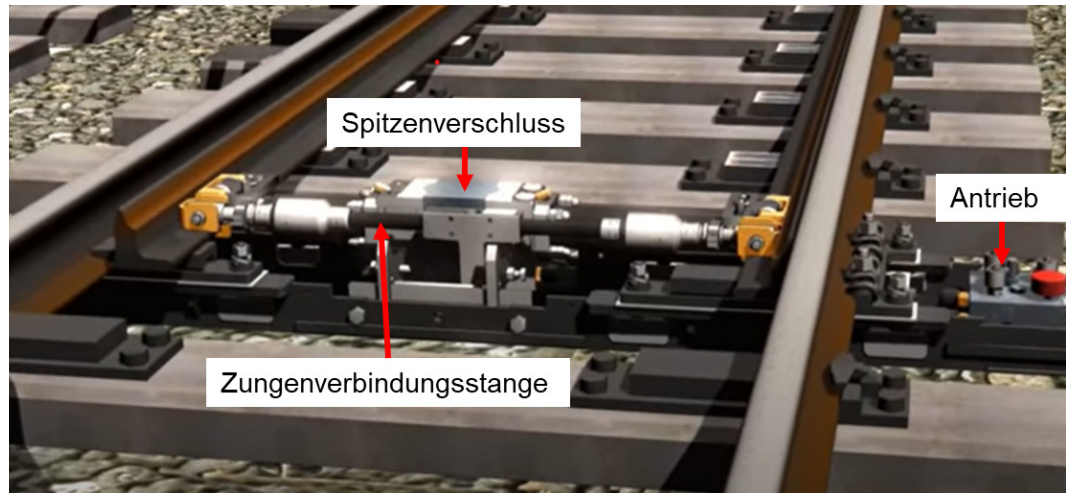


Abbildung 33: Gegen die Spitze gesehene Detailansicht einer Hydrostarweiche ohne Schutzblech mit den verschiedenen Komponenten. Der Antrieb selbst liegt ausserhalb des Spurkanals (Quelle: Voestalpine, Komponentenbeschreibung: SUST).

3.1.8.1.3 Feststellungen

3.1.8.1.3.1 Weiche W387

Bei der von der Wurzel her befahrenen Weiche W387 wurden durch die entgleiste Achse die Stellvorrichtung und die hydraulischen Verbindungsleitungen der Verschlüsse zerstört (Abbildung 34). Der Spitzenverschluss selbst sowie die Mittenverschlüsse wurden abgerissen (Abbildung 41). Die beiden Zungen waren somit nicht mehr in ihren vorgesehenen Stellungen fixiert.

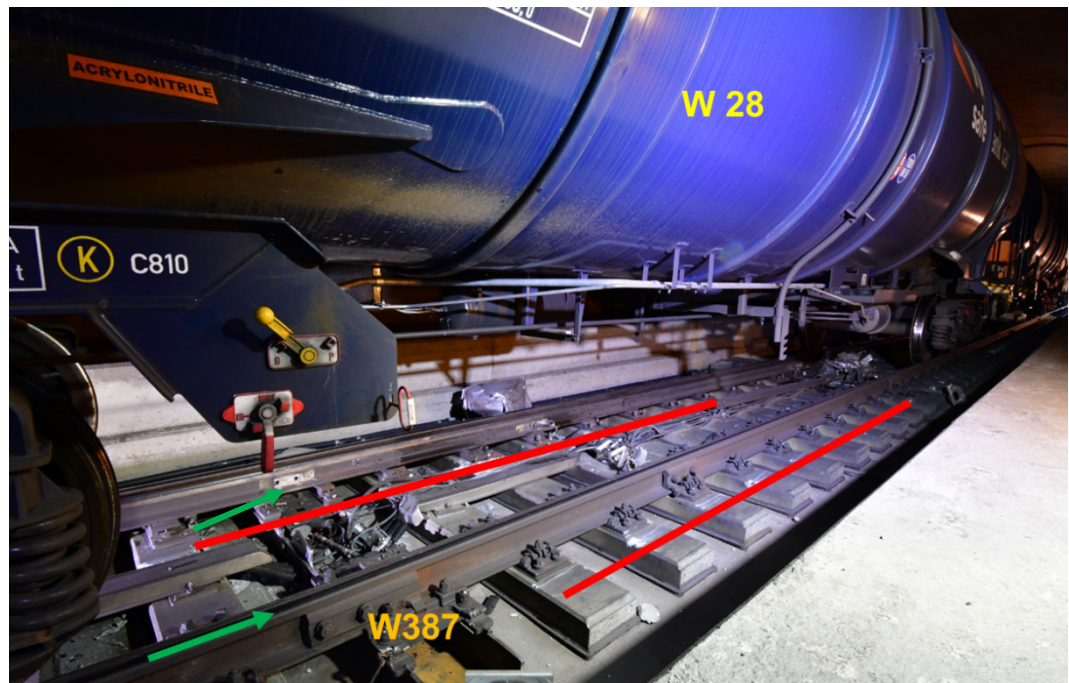


Abbildung 34: Beschädigungen der Weiche W387 unterhalb von Wagen 28. Zerstörte Mittenverschlüsse und Hydraulikleitungen. Rote Linien: Position der entgleisten Achse des Wagens 11.

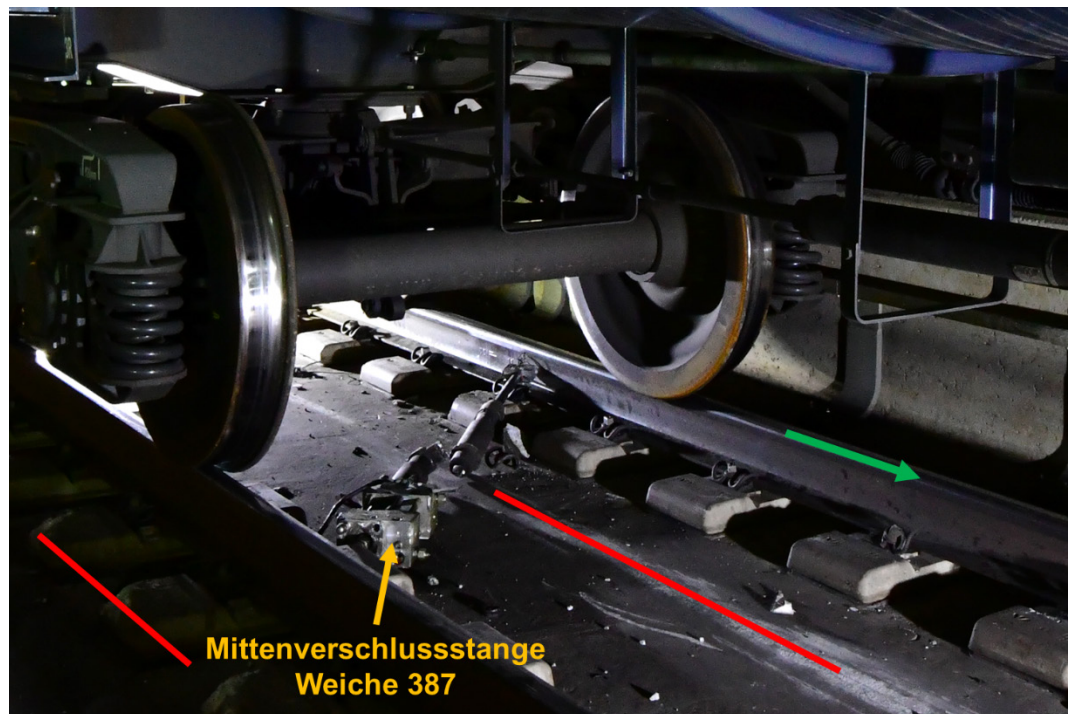


Abbildung 35: Eine Zungenverbindungsstange eines Mittenverschlusses der Weiche W387 wurde mitgerissen. Diese lag kurz vor der nachfolgenden Weiche W386. Rote Linien: Position der entgleisten Achse des Wagens 11.

3.1.8.1.3.2 Weiche W386

Die gegen die Spitze befahrene Weiche W386 wurde komplett zerstört (Abbildung 36).

Die herunterhängende Radscheibe zerstörte wie bei der vorgängig befahrenen Weiche sämtliche Verschlüsse und Hydraulikleitungen. Der Spitzenverschluss sowie die nachfolgenden Mittenverschlüsse (Abbildung 32, Abbildung 33) wurden weggerissen. Somit wurden die Zungen nicht mehr in ihren regulären Positionen gehalten.

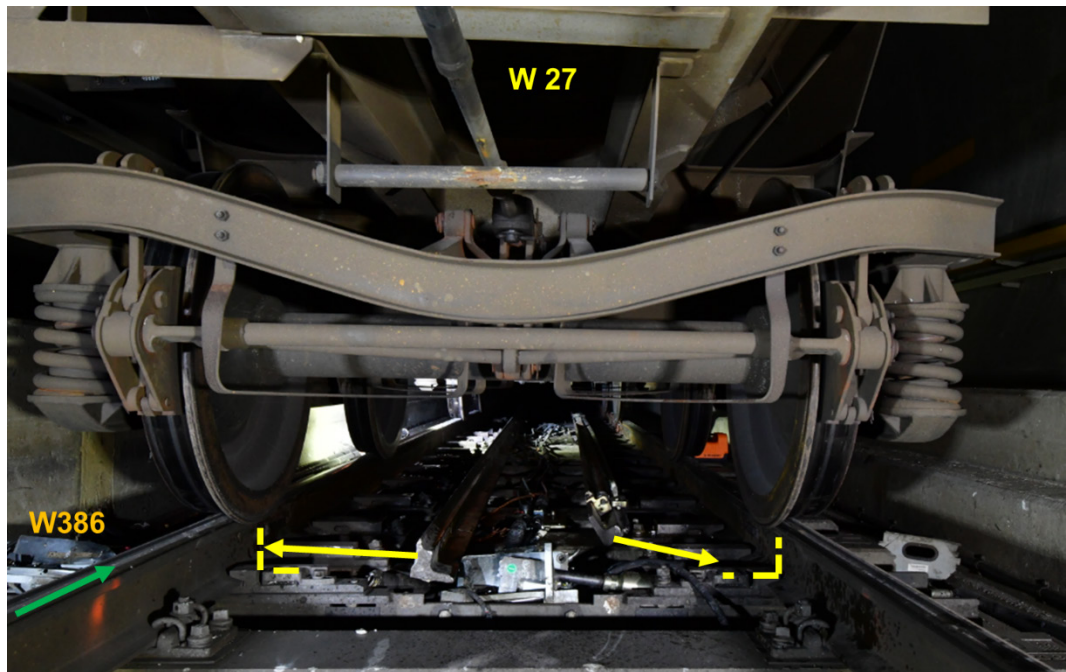


Abbildung 36: Beschädigung an der Spitze der Weiche W386. Gelbe Pfeile: Normale Position der Weichenzungen (Quelle: Kapo TI, Ergänzung SUST).

3.1.8.1.3.3 Gleisabschnitt zwischen km 47 und km 40

Ein abgebrochenes Fragment der Radscheibe schlug auf eine Bi-Block Betonschwelle beim km 47.1 auf.



Abbildung 37: Beschädigung der Betonschwelle bei km 47.1 durch abgebrochenes Radstück der Achse 1 des Wagens 11.



Abbildung 38: Abgebrochenes Radstück der Achse 1 des Wagens 11.

Kurz nach der Position, an der sich das zweite Radfragment gelöst hatte (Abbildung 20), sind auf einer Länge von ca. 150 m Aufschlagspuren auf dem rechten Schienenkopf sichtbar (Abbildung 39 und Abbildung 40).



Abbildung 39: Spur auf dem in Fahrtrichtung rechten Schienenkopf (km 46.9–46.8).



Abbildung 40: Weitere Spur auf dem in Fahrtrichtung rechten Schienenkopf (km 46.9–46.8).

Die defekte Achse 1 des Wagens 11 verlor bei km 46.7 die Spurführung. Das linke Rad prallte auf die Bi-Block Betonschwellen und beschädigte diese auf einer Länge von rund 15 m auf der Innenseite (Abbildung 41). Durch den Aufprall hing die Achse nun in Fahrtrichtung rechts um rund 45° zur Normallage unter dem Wagenboden.



Abbildung 41: Durch die entgleiste Achse beschädigte Betonschwellen links und rechts des Gleises (km 46.7).

Ab km 46.60 hing die Achse 1 des Wagens 11 so tief, dass der Spurkranz des linken Rades auf dem Betonboden des Tunnels Schleifspuren hinterliess.

Es wurde jedoch keine einzige im Gleisbett montierte ETCS-Balise zerstört. Die Betonschwellen wiesen jedoch Beschädigungen auf (Abbildung 42).



Abbildung 42: Schleifspuren auf dem Betonboden vom Spurkranz des linken Rades der Achse 1, Wagen 11. Beidseitige Beschädigungen an den Betonschwellen (km 46.60).

Ab km 46.5 war der Tunnelboden mit Trümmerteilen von beschädigten Betonschwellen übersät (Abbildung 43).



Abbildung 43: Schleifspuren des auf dem Tunnelboden aufliegenden Spurkranzes sowie Trümmerteile von beschädigten Betonschwellen (ca. km 46.5).

Zwischen km 46 und km 41 wiesen die meisten Bi-Block Betonschwellen leichte Beschädigungen auf. Mehrere Bremssohlensplitter wurden auf dem Betonboden gefunden. In diesem Streckenabschnitt touchierte das linke Rad von Achse 1 des Wagens 11 den Betonboden nicht (Abbildung 44).



Abbildung 44: Die Aufnahme aus dem Führerstand des Lösch- und Rettungszuges (LRZ) bei km 41.1 zeigt die leichten Beschädigungen zwischen km 46 und 41, hier auf der rechten Seite der Betonschwellen (rote Kreise).

3.1.8.1.3.4 Multifunktionsstelle Faido

Im Gegensatz zum Streckengleis sind die Weichen der Multifunktionsstelle Faido auf Monoblockbetonschwellen aufgelegt. Das entgleiste linke Rad von Achse 1 des Wagens 11 schlug gegen die erste Monoblockbetonschwelle der Weiche W387 und beschädigte auch die weiteren Schwellen (Abbildung 45). Durch den harten Aufprall geriet die entgleiste Achse in Querrichtung noch weiter in Schräglage.



Abbildung 45: Massive Anschlagspuren an der ersten Monoblockbetonschwelle der Weiche W387.

Auf dem Abschnitt zwischen den Weichen W387 und W386 ist das Gleis wie das übrige Streckengleis mit Bi-Block Betonschwellen versehen (Abbildung 46).

Die vom linken Rad der Achse 1 des Wagens 11 hinterlassenen Spuren auf dem Betonboden sind wesentlich breiter, was darauf schliessen lässt, dass die Achse seit dem Anprall an die Monoblockschwelle der Weiche noch weiter in Schräglage geriet (Abbildung 46). In diesem Gleisabschnitt lag ein abgerissener Mittenverschluss der Weiche W387 zwischen den Schwellen.



Abbildung 46: Breite Schleifspuren auf dem Betonboden zwischen Weiche W387 und W386 herrührend von der entgleisten Achse 1, Wagen 11. Zwischen den Schwellen der abgerissene Verschluss der Weiche W387.

Auch auf dem Verbindungsgleis zur Tunnelröhre Ost nach der Weiche W386 ruhen die Schienen wieder auf Bi-Block Betonschwellen. Beim Übergang von den Monoblockschwellen zu den Bi-Block Schwellen wurde die rechte Schiene von Gleis 7000 nach rechts weggedrückt und aus der Befestigung gerissen (Abbildung 48).

Der Radlenker auf der linken Seite des beweglichen Herzstücks der Weiche W386 wurde zerstört.



Abbildung 47: Abgerissener Radlenker auf der linken Seite des beweglichen Herzstücks der Weiche W386 (Quelle: Kapo TI, Ergänzung SUST).

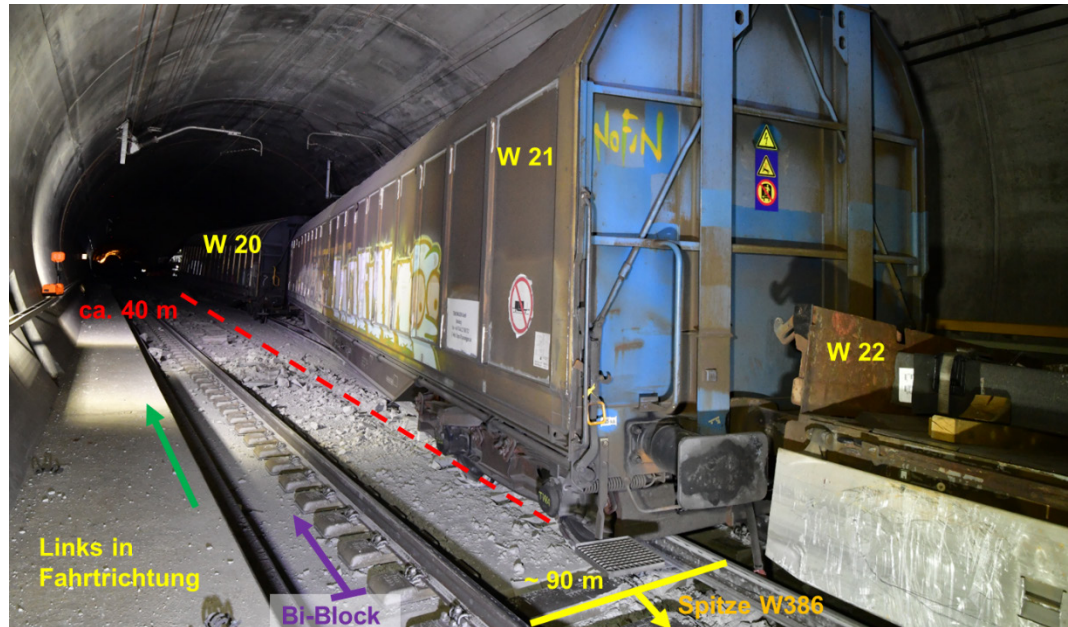


Abbildung 48: Zerstörtes Gleis nach der Weiche W386. Die in Fahrtrichtung rechte Schiene und die Bi-Block Betonschwellen wurden weggerissen und lagen unter den entgleisten Wagen. Die Schiene lag unter dem entgleisten Wagen 21. (Quelle: Kapo TI, Ergänzungen SUST).

3.1.8.2 Stellwerk und Leittechnik

3.1.8.2.1 Beschreibung

Der Gotthard-Basistunnel (GBT) ist mit einem Stellwerk des Typs Elektra 2 mit Führerstandssignalisierung ETCS Level 2 ausgestattet. Bedient und überwacht wird der GBT über das Leitsystem Ittis von der Betriebszentrale Süd, Pollegio (TI). Ittis ist ein Leitsystem zur Fernbedienung von Stellwerken und hat keine sicherheitsrelevante Funktion. Die Ittis- sowie die RBC-Aufzeichnungen wurden der SUST zur Verfügung gestellt.

Um eine hohe Verfügbarkeit der Strecke gewährleisten zu können, sind auf ETCS Level 2-Anlagen im erweiterten Geschwindigkeitsbereich redundante Achszähler⁷ (linke Schiene - rechte Schiene) vorhanden. Solange zwischen den gegenüberliegenden Achszählern keine Differenz auftritt, bleibt die Strecke befahrbar. Valenzstörungen (Abbildung 49) werden angezeigt, wenn eine Differenz auftritt. Ist nach einer Fahrt eine Valenzstörung vorhanden, darf normal weitergefahren werden. Eine Valenzstörung hat keinen Einfluss auf die nächsten Zugsfahrten und verlangt keinen Eingriff des Fahrdienstleiters.

Wenn Achszähler-Abschnitte belegt bleiben, werden die Abschnitte weiterhin rot ausgeleuchtet. Dies generiert keine Fehlermeldung. Die Sicherheitsfunktion des Stellwerkes besteht darin, dass kein weiterer Zug in diesen Abschnitt einfahren darf. Der Fahrdienstleiter erhält erst eine Meldung, wenn der nächste Zug in diesen belegten Abschnitt einfahren möchte. Solange dies nicht der Fall ist, erfolgt keine Meldung.

⁷ Redundante Achszähler: Regelwerk SBB, I-30060, Besonderheiten von ETCS Level 2 Anlagen.

3.1.8.2.2 Feststellung Leittechnik

Die Fahrstrasse für den Zug 45016 durch den Gotthard-Basistunnel wurde durch die Leittechnik automatisch über das Gleis 7000 eingestellt.

3.1.8.2.3 Feststellungen an den Weichen auf dem Ittis-Bildschirm

Die Weiche W387 (erste Weiche der Multifunktionsstelle Faido in Fahrtrichtung Norden) wurde um 12:48:11 Uhr als gestört gemeldet (Verlust der Kontrollposition). 1 Sekunde später wurde durch die Überwachung der Weiche W386 die gleiche Meldung registriert.

3.1.8.2.4 Feststellungen an den Achszählern und auf dem Ittisbildschirm

Auf dem Ittis-Bildschirm wiesen die Abschnitte 7705–7709 nach der Zugdurchfahrt Achszählervalenzstörungen⁸ (magenta-farbige Kreise) auf (Abbildung 49). Dies als Folge der Beschädigungen der Verkabelung der Achszähler (Abbildung 50) durch die entgleiste Achse 1 des Wagens 11. Die Abschnitte 7711 und 7713 blieben belegt.

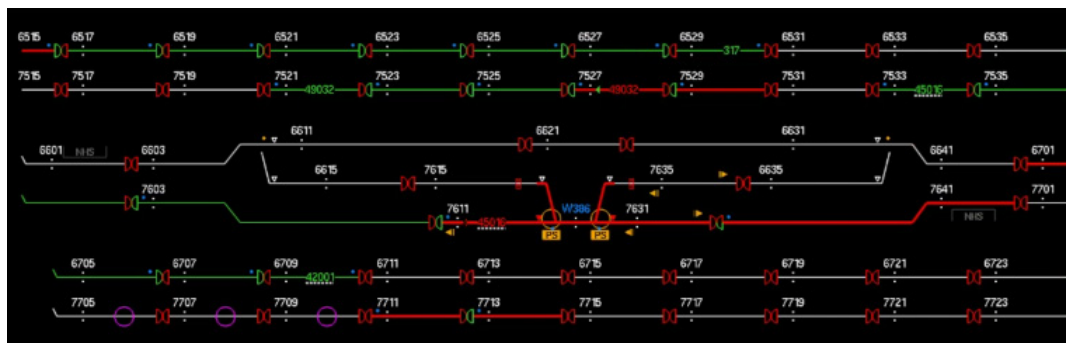


Abbildung 49: Auszug aus der Ittis-Aufzeichnung:

Die nordwärts fahrenden Züge auf Gleis 7000 fahren im Abschnitt 7723 in den Bereich ein und verlassen diesen im Gleis 7515. Die Magenta-farbigen Kreise in den Gleisen 7705, 7707 und 7709 signalisieren Achszählervalenzstörungen; rechts von diesen, in den Abschnitten 7711 und 7713, bleibt eine Belegung (rote Linie). Eine Belegung kann auch resultieren, wenn beide Achszähler gestört sind.

Die orangenen Kreise und die Belegungen der beiden Weichenschenkel sowie die Symbole «PS» (Posizione dello scambio, deutsch: Weichenlage) in der Bildmitte deuten auf den Endlageverlust der Weichen W386 und W387 hin.

⁸ Eine Valenzstörung tritt auf, wenn die Anzahl gezählter Achse der linken Schiene mit der Anzahl der gezählten Achsen der rechten Schiene nicht übereinstimmen.



Abbildung 50: Beschädigte Verkabelung des Achszählers von Abschnitt 7707.

Die äussere Hülle der Achszählerverkabelung von Abschnitt 7705 wies nur eine leichte Beschädigung durch den Spurkranz der Achse 1 des Wagens 11 auf (Abbildung 51). Die Verkabelung wurde nicht beschädigt.



Abbildung 51: Leichte Markierung der Hülle der Achszählerverkabelung ohne Kabelschaden (Abschnitt 7705).

Eine Achszählervalenzstörung nach der Durchfahrt eines Zuges hat keinen Einfluss auf die «Movement Authority» dieses Zuges.

3.1.8.3 Videoüberwachung Multifunktionsstelle Faido

3.1.8.3.1 Beschreibung

Die Nothaltestellen der Multifunktionsstellen Faido und Sedrun (Abbildung 2) verfügen über eine Videoüberwachung, die insbesondere im Notfall bei der Evakuierung von Personenzügen für dispositive Zwecke genutzt wird. Die Videoanlage zeichnet im Hintergrund dauernd auf. Erst in einem Notfall muss die Videoanlage durch einen benannten Interventionsmitarbeiter der BZ Süd aktiv genutzt werden.

Die Aufzeichnung der Durchfahrt des Zuges 45016 wurde der SUST von SBBI zur Verfügung gestellt.

3.1.8.3.2 Feststellung

Die Videoaufzeichnung zeigt, dass während der Durchfahrt des Zuges unter dem Wagen 11, Achse 1, Funken sprühten (Abbildung 52).



Abbildung 52: Durchfahrt des Zuges in der MFS Faido (ca. km 40.8). Funkenbildung durch die Bremsdreiecke und von Achse 1, Wagen 11. Gut sichtbar ist auch der einseitig tiefer hängende Wagenkasten von Wagen 11 (Quelle: Bild aus der Videoüberwachung der MFS Faido der SBBI).

Nach der Durchfahrt des Zuges wies das Gleis an dieser Stelle nur geringe Schäden auf. Einige wenige Spuren, verursacht durch den Spurkranz oder durch die Bremsdreiecke, waren auf dem Betonboden sichtbar (Abbildung 53).



Abbildung 53: Gleiszustand nach der Zugdurchfahrt in der MFS Faido (ca. km 40.8). Die roten Kreise markieren die Spuren auf dem Betonboden. (Quelle: Bild aus der Videoüberwachung der MFS Faido der SBBI).

3.1.8.4 Zugkontrolleinrichtungen

3.1.8.4.1 Beschreibung

Auf dem Schweizer Normalspurnetz sind mehrere, unterschiedliche Systeme von Zugkontrolleinrichtungen (ZKE) vorhanden. Sie führen Messungen an vorbeifahrenden Zügen durch, reagieren bei Abweichungen durch Alarmmeldungen und leisten dadurch einen wichtigen Beitrag für die Sicherheit des Eisenbahnverkehrs.

Zwischen Chiasso und dem Südportal des Gotthard-Basistunnels sind zwei ZKE-Messstellen installiert: Die erste in Mendrisio (HFO–RLC–PAO–DED) und die zweite in Claro (HFO–RLC–PAO).

Die zwei folgenden Systeme haben im Zusammenhang mit dem vorliegenden Ereignis eine Bedeutung:

- Heissläufer- und Festbrems-Ortungsanlage (HFO)
- Radlastcheckpoint (RLC)

Die detaillierte Beschreibung der ZKE-Systeme, sowie die Warn- und Alarmwerte sind in der Anlage 4 aufgeführt.

3.1.8.4.2 Auswertung der Daten

Die für die Untersuchung angeforderten Daten wurden der SUST zur Verfügung gestellt. Die ZKE-Anlagen funktionierten bestimmungsgemäss.

Die Analyse der von ZKE aufgezeichneten Daten zeigt Folgendes:

- Allgemeines

Die Daten der Fahrten von Wagen 466-2 (Wagen 11 des Unfallzuges) durch die Schweiz zwischen dem 4. August 2022 und dem 23. Dezember 2022, aufgezeichnet von diversen RLC- und HFO-Anlagen, wurden durch die SUST

ausgewertet. In diesem Zeitraum wurde ein maximaler Wert bezüglich «Radlastverhältnis» links–rechts von 1.2:1 detektiert (Alarm-Eingriffswert $\geq 1.7:1$). Vom 4. August 2022 bis am 23. Dezember 2022 wurde weder von einer RLC- noch von einer HFO-Anlage ein Alarm bei der Durchfahrt des Wagens 466-2 ausgelöst.

Zwischen dem 23. Dezember 2022 und dem 3. August 2023 verkehrte der Wagen 466-2 in der Schweiz nicht. Dieser Wagen wurde vom ZKE-System von Süden nach Norden letztmals am 23. Dezember 2022 erfasst.

Am 3. August 2023, kurz nach 23 Uhr, erfasste das ZKE-System bei Gellert (Basel) die Einfahrt des Wagens in die Schweiz. Am 4. August 2023, um 03:19 Uhr, fuhr der Wagen an der ZKE-Kontrollanlage Claro vorbei, bevor er weiter in Richtung Italien fuhr. Bei dieser Fahrt wurden keine Unregelmässigkeiten festgestellt.

Am 10. August 2023, um 09:53 Uhr, erfasste die ZKE-Kontrollanlage in Mendrisio die Rückfahrt des Wagens 466-2 aus Italien als elfter Wagen des Güterzuges 45016. Um 12:15 Uhr fuhr der Zug an der ZKE-Anlage in Claro vorbei.

- Radlastcheckpoint (RLC)

Bei der Vorbeifahrt am 10. August 2023, an den beiden RLC-Messstellen, um 09:53 Uhr in Mendrisio und um 12:15 Uhr in Claro, wurde bei der vordersten Achse von Wagen 11 zwischen dem linken und dem rechten Rad ein Radlastverhältnis von 1.01:1 festgestellt (Alarm-Eingriffswert $\geq 1.7:1$).

Bei der Durchfahrt der RLC-Messstelle in Claro (Anlage 2, Abbildung 93) wurde eine dynamische Radkraft bei der vordersten Achse von Wagen 11 < 18 t gemessen (Alarm-Eingriffswert Radfehler: Dyn. Radkraft ≥ 40 t).

- Heissläufer- und Festbrems-Ortungsanlage (HFO)

Bei der Durchfahrt an diesen beiden Messstellen am 10. August 2023, hatte kein Wagen des Zuges 45016 einen HFO-Alarm ausgelöst (Anlage 3, Abbildung 95).

3.1.9 Regelwerk VPI

Der VPI-Instandhaltungsleitfaden wird von den Privatgüterwagen-Verbänden VPI Deutschland, V.P.I. Österreich sowie VAP Schweiz herausgegeben. Er behandelt die Instandhaltung von Güterwagen und deren Komponenten und gibt Empfehlungen über Zeitpunkt, Art und Umfang von Instandhaltungsmassnahmen ab. Dazu gehören u.a. folgende Module:

VPI-01 Instandhaltung von Güterwagen, Allgemeiner Teil, Revisionsfristen

VPI-04 Instandhaltung von Güterwagen, Radsätze

VPI-09 Instandhaltung von Güterwagen, Zerstörungsfreie Prüfung

Die wichtigsten Punkte der Instandhaltung der Radsätze, die einen Zusammenhang mit diesem Unfall haben, sind nachfolgend zusammengefasst:

Die Instandhaltungsstufe 2 (IS2) der Radsätze beinhaltet eine Profilbearbeitung im ausgebauten Zustand mit zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) (IS1) plus eine Radsatzlageruntersuchung und erweiterter ZfP.

Die Radsätze von Wagen 466-2 (Wagen 11) sind in der Gruppe C (VPI-04) angesiedelt (jährliche Laufleistung $\geq 50\,000 - < 80\,000$ km).

Nach Ablauf der maximalen Laufleistung (660 000 km), spätestens jedoch nach Überschreitung der maximalen Einbaudauer der entsprechenden Radsatzgruppe (8 Jahre) sind die Radsätze auszubauen und einer Radsatzinstandhaltung zuzuführen (VPI-04, Anhang 12).

3.1.10 Sicherheitsmanagementsystem der Eisenbahnverkehrsunternehmen

3.1.10.1 Allgemein

Das Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) SBB Cargo AG verfügt über ein Sicherheitsmanagementsystem (SMS).

Im Zusammenhang mit dem Unfall wurden folgende Kapitel des Sicherheitsmanagementsystems untersucht:

5.6.2 Transportdienstleistung erfüllen, Handbuch für den technischen Wagendienst.

Das Handbuch für den technischen Wagendienst ist die Grundlage für die Produktion und beschreibt den einheitlichen Qualitätsstandard.

Im Folgenden werden nur die Elemente, die mit dem vorliegenden Unfall in Zusammenhang stehen, zusammengefasst.

Die technische Wagenuntersuchung wird vom befähigten Personal (TKC) durchgeführt. Sie besteht darin, die Wagen auf ihre Betriebssicherheit und Verkehrstauglichkeit zu untersuchen, erkennbare Mängel oder Hinweise darauf gemäss AVV Anlage 9 (Fehlerkatalog) festzuhalten und die erforderlichen Massnahmen zu ergreifen.

Technische Untersuchung der Wagen - Aufgaben der TKC

- *Kontrolle aller Güterwagen bezüglich des technischen Zustands und der Einsatzbereitschaft (inkl. Bremstechnische Untersuchung und Bremsprobe)*
- *Technische Kontrolle der Güterwagen und ihrer Ladungen gemäss Prüfkatalog AVV Anlage 9 Anhang 5.*

Massnahmen bei Unregelmässigkeiten am Wagen und an der Ladung

Stellt der TKC Mängel und Schäden an Wagen / Ladung fest, leitet er die Massnahmen zur Instandsetzung und / oder Besserverlad / Umlad ein. Die festgestellten Schäden müssen mit einem Kreuz gekennzeichnet werden. Die Wagen werden entsprechend bezettelt.

Alle diese Arbeiten müssen dokumentiert werden, damit die Informationen an die Wagenhalter und Kunden weitergeleitet werden können.

Dokumentation Unregelmässigkeiten und Schäden

Für die TKC ist das elektronische System «SCHEMA» für die Erfassung von Unregelmässigkeiten verfügbar. Meldungen müssen gemäss der AAW «Eingabe in die SCHEMA Datenbank» erfasst werden.

3.1.10.2 Zugvorbereitung in Chiasso

Gemäss der der SUST zur Verfügung gestellten Kontrollliste des Zuges 45016 wurde der Zug von einem TKC in Chiasso einer technischen Untersuchung unterzogen.

Die Zugvorbereitung erfolgte in fünf Teilen. Der elfte Wagen (Wagen 466-2) wurde im ersten Teil (insgesamt 13 Wagen) behandelt.

Als alle 30 Wagen eingereiht waren, wurde eine Bremsprobe durchgeführt.

Anschliessend wurde der Zug 45016 als «controlle tecnico e prova freno completa» der zuständigen Cargo-Leitstelle in Chiasso gemeldet. Das Protokoll wurde vom TKC unterschrieben (Anlage 9, Abbildung 102). Die Leitstelle protokollierte die Freigabe des Zuges 45016 im Tagesjournal und übertrug seine Freigabe im ZIS-System.

3.1.11 Instandhaltung der Wagen und Radsätze

3.1.11.1 Wagen 466-2 (Wagen 11)

Revision

Der Wagen wurde im Januar 2018 einer Revision G 4.2 gemäss VPI-Leitfaden unterzogen. Während der Revision wurden die vier Achsen ausgebaut, revidiert und wieder eingebaut.

Für die Instandhaltung arbeitet der Wagenhalter TWA ausschliesslich auf der Basis des VPI-Leitfadens.

Reparaturen

Der Wagen war zwischen Januar 2018 und August 2023 mehrmals für diverse Reparaturen in verschiedenen Instandhaltungswerkstätten. Die Betriebsfreigabeprotokolle wurden der SUST zur Verfügung gestellt.

Eine einzige Meldung über eine Bremsstörung ist am 25. Juli 2022 registriert. Im Betriebsfreigabeprotokoll wird Folgendes festgehalten:

Die Bremsanlage wurde gemäss den geltenden Vorschriften geprüft und kontrolliert. Das Bremssystem funktioniert einwandfrei.

Aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen des Wagenhalters ist keine Meldung von korrektiven oder präventiven Massnahmen an den Achsen von Wagen 11 ersichtlich.

Der Wagen war am 19. Juli 2023 letztmals für die Reparatur einer Schiebewand in einem Instandhaltungswerk in Schweden. Im Freigabeprotokoll ist zusätzlich aufgeführt, dass auch zwei Paar LL-Bremssohlen ausgetauscht wurden. Im Protokoll ist jedoch nicht vermerkt, an welcher Achse die Bremssohlen getauscht wurden. Nach dem Wechsel der Bremssohlen wurde eine Bremsprobe durchgeführt.

3.1.11.2 Achse 1 (81987)

Die letzte IS2 des Radsatzes mit der gebrochenen Radscheibe wurde am 26.10.2017 in Schweden durch eine zertifizierte Instandhaltungswerkstatt durchgeführt. Seit der letzten IS2 hat dieser Radsatz ca. 173 000 km zurückgelegt.

Die Sichtung der Instandhaltungsprotokolle der IS2 ergab Folgendes:

- Nach der Reprofilierung lag der Radsatzdurchmesser bei 862 mm;
- Bei der Ultraschallprüfung der beiden Radscheiben wurden keine Auffälligkeiten festgestellt;
- Die Eigenspannungsmessungen der beiden Radkränze ergaben Werte von 171 und 198 MPa (gem. VPI-09 zulässiger Wert: –350 bis +400 MPa).

3.2 Sachverhalt

3.2.1 Ablauf der Entgleisung bei der Spurwechselstelle Faido

Anhand der gesicherten Spuren seitens der Infrastruktur und der Wagen lässt sich der Verlauf der Entgleisung ab der Weiche W386 bei der Spurwechselstelle der Multifunktionsstelle Faido wie folgt erklären:

Die entgleiste Achse 1 mit der in Fahrtrichtung rechts gebrochenen Radscheibe, die unter dem Wagen 11 ca. 45° schräg nach hinten hing, zerstörte die gesamte Stellvorrichtung der Weiche W386 (Abbildung 54 und Abbildung 55).

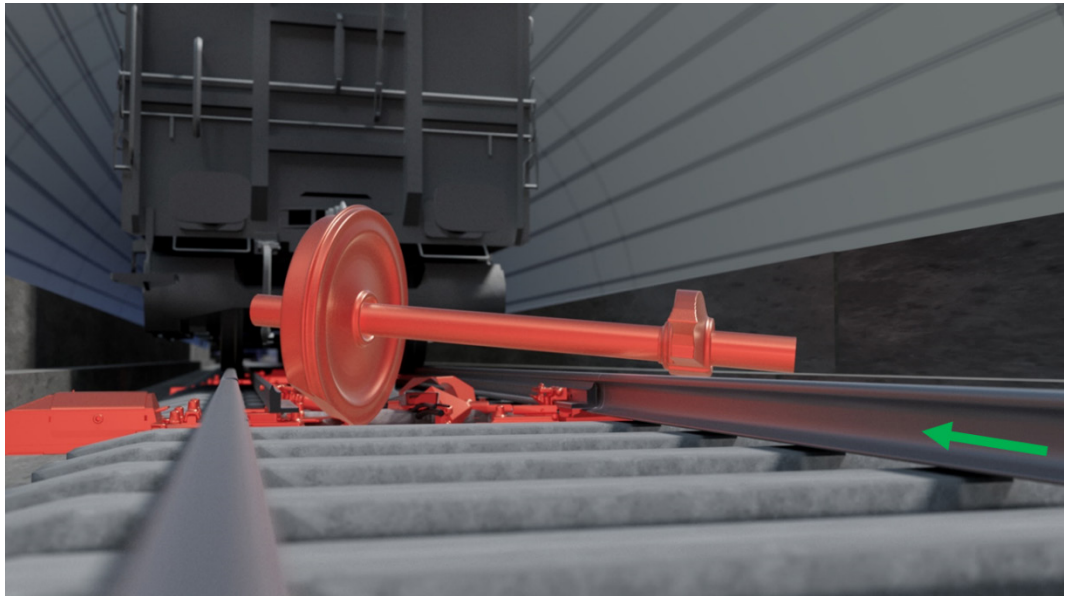


Abbildung 54: Zerstörung des Spitzenverschlusses der Weiche W386 durch die entgleiste Achse.

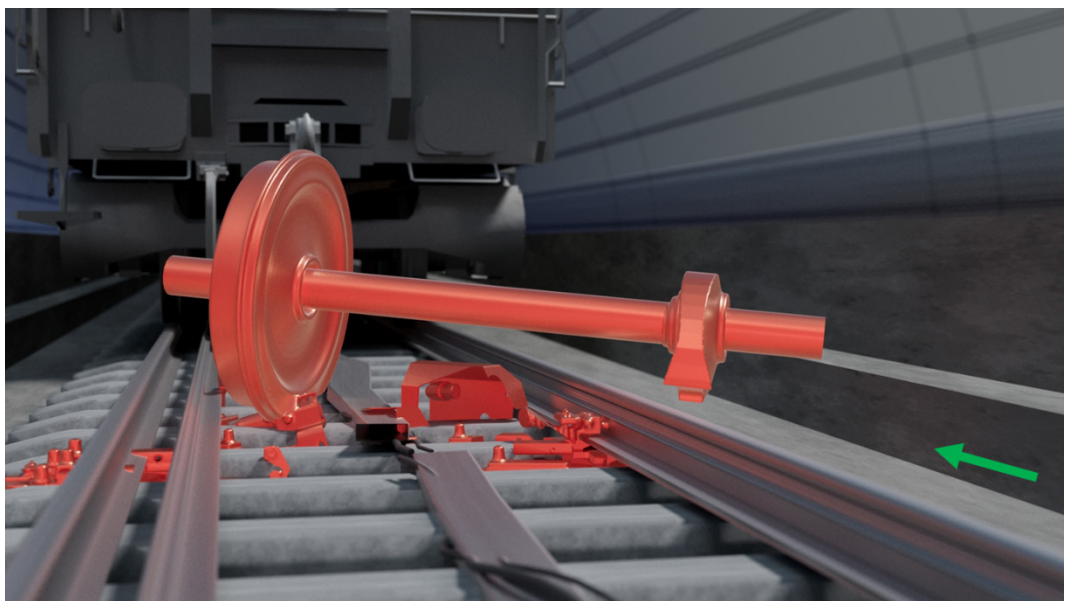


Abbildung 55: Zerstörung des Mittenverschlusses und der hydraulischen Leitungen der Weiche W386 durch die entgleiste Achse.

Nach ca. 70 m wurde im Bereich des Herzstückes auch der Radlenker zerstört (Abbildung 47).

Trotz der Zerstörung von Weiche W386 passierten die Achsen 2–4 von Wagen 11, die nachfolgenden Wagen 12 und 13 (Abbildung 56) sowie die erste Achse des Wagens 14 die Weiche noch in gerader Richtung ins Gleis 7000 (Abbildung 57).

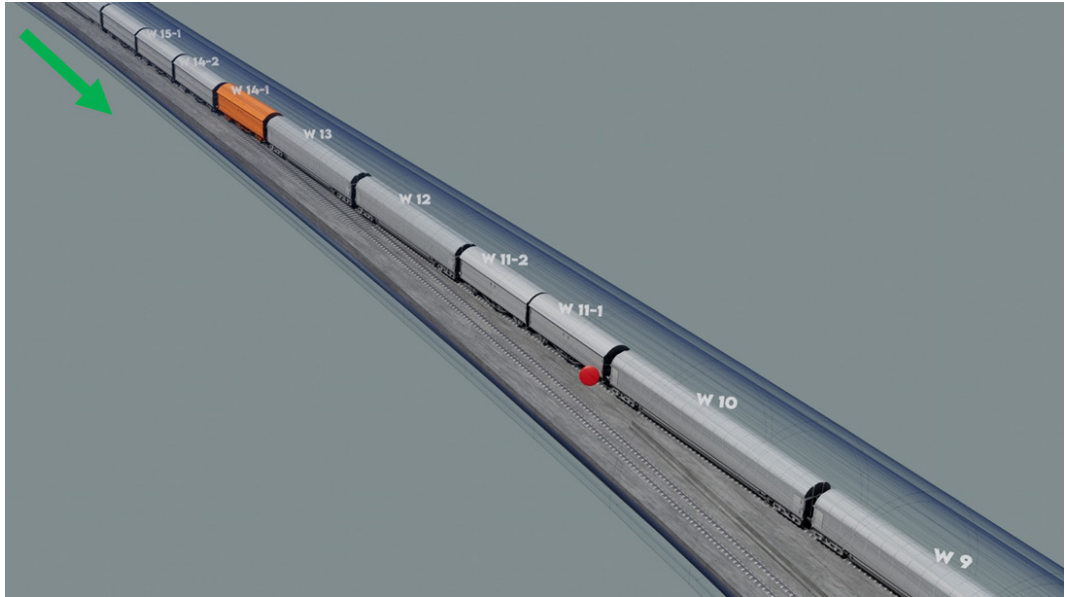


Abbildung 56: Darstellung der Zugfahrt im Bereich der Weiche W386 der Multifunktionsstelle Faido. Roter Punkt: Entgleiste Achse 1 des Wagens 11. Oranger Wagen: Wagen 14.

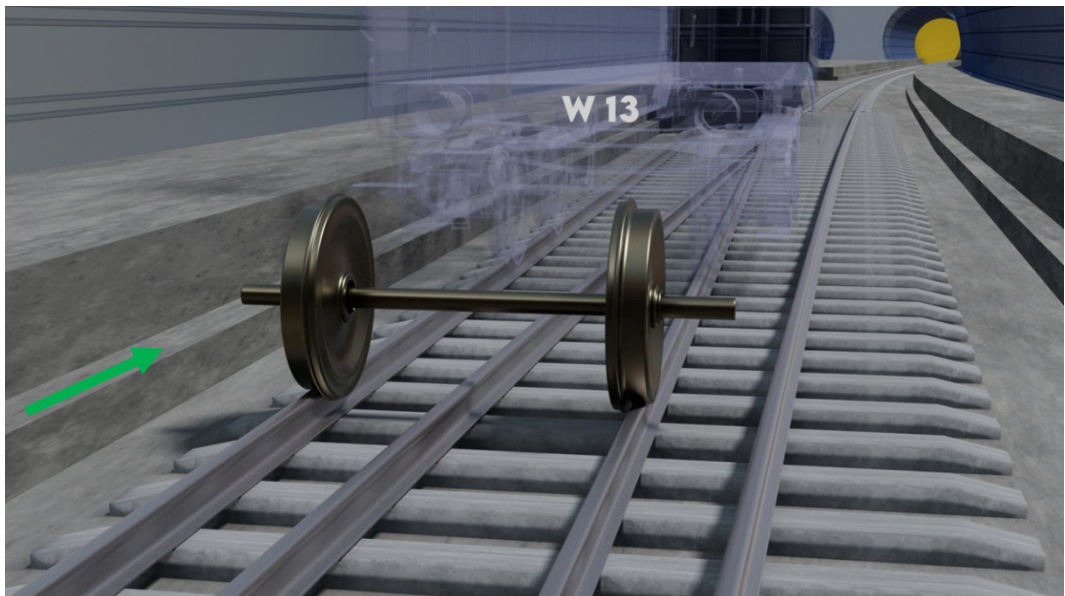


Abbildung 57: Wagen 14, Achse 1.

Die Achse 2 von Wagen 14 wurde in Richtung des Verbindungsgleises zur Tunnelröhre Ost (Gleis 6000) abgelenkt.

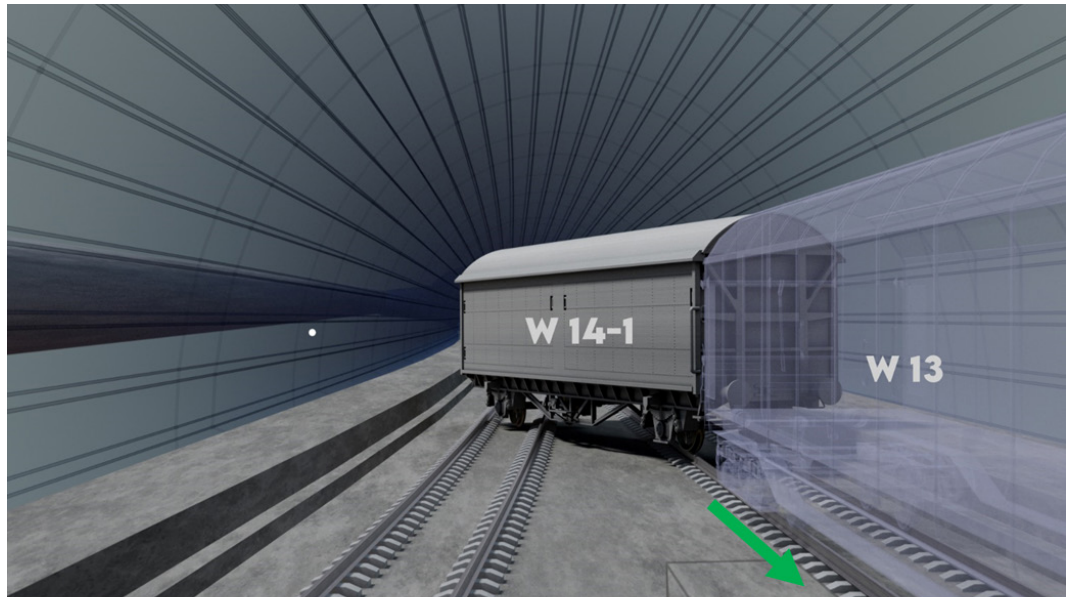


Abbildung 58: Wagen 13 auf dem Gleis 7000 und dahinter der abgelenkte Wagen 14-1, mit der vorderen Achse ebenfalls auf dem Gleis 7000 (rechts) und mit der hinteren Achse auf dem Verbindungsgleis (links).

In der Folge schlitterte die erste Hälfte des Wagens 14 quer über die Mittelkonsole (Abbildung 9) bis dieser Wagenteil gegen die Tunnelquerwand zwischen Gleis 7000 und dem Verbindungsgleis prallte und komplett zerstört wurde (Abbildung 9). Der zweite Teil von Wagen 14 fuhr entlang des Verbindungsgleises zur Tunnelröhre Ost, Gleis 6000, durchbrach das Spurwechselltor und kam anschließend rund 90° verdreht zum Stillstand. Die Achse 3 kam nach dem Spurwechselltor (Abbildung 11) und die Achse 4 noch vor dem Tor zu liegen (Abbildung 10).

Durch das Anheben des ersten Teils von Wagen 14, der dann quer auf der erhöhten Mittelkonsole rutschte, wurde der vorlaufende Wagen 13 einseitig ebenfalls angehoben, was in der Folge zur Entgleisung, zur Zugtrennung und zum Kippen des Wagens 13 in der Tunnelröhre West, Gleis 7000, führte. Der Wagen 13 kam ca. 150 m nach der Tunnelquerwand zum Stillstand (Abbildung 8). Durch die entstandene Dynamik entgleiste auch Wagen 12 (Abbildung 7).

Die erste Achse des Wagens 15 wies keine Beschädigungen am Spurkranz auf, die auf einen Kontakt mit dem Betonboden zurückzuführen wären. Somit war der Wagen erst kurz vor dem Kippen entgleist (Abbildung 59).

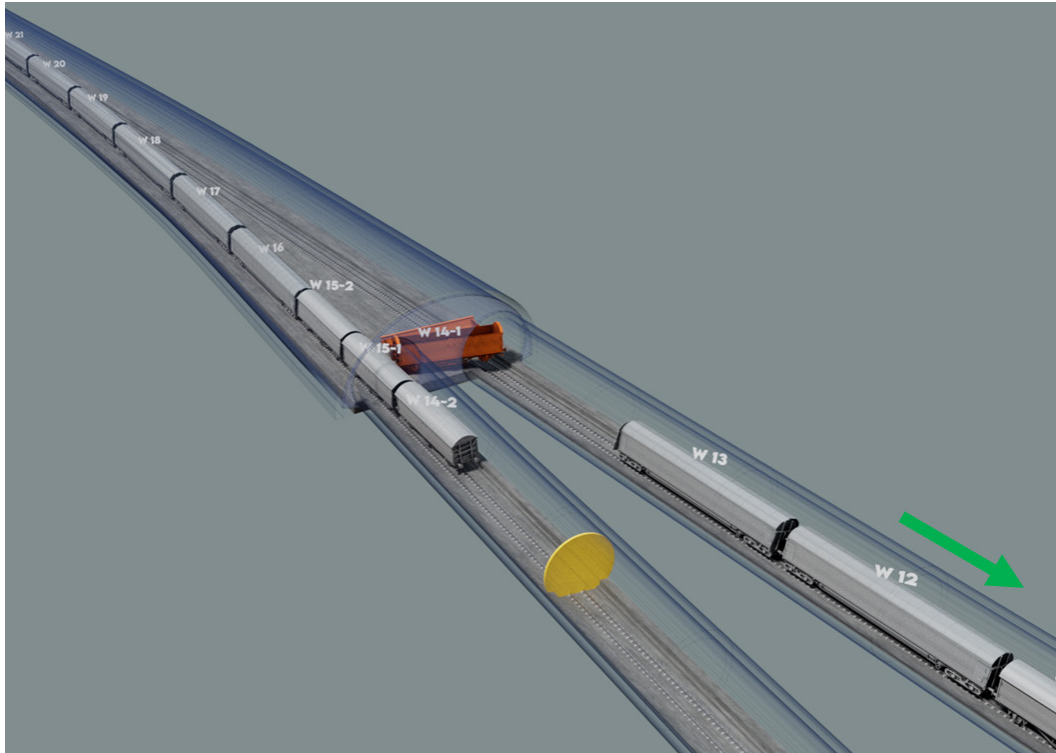


Abbildung 59: Situation kurz vor dem Stillstand der Wagen.

Die Wagen 14-2 bis 16 entgleisen und befanden sich auf dem Verbindungsgleis in Richtung Tunnelröhre Ost, Gleis 6000 (Abbildung 60).

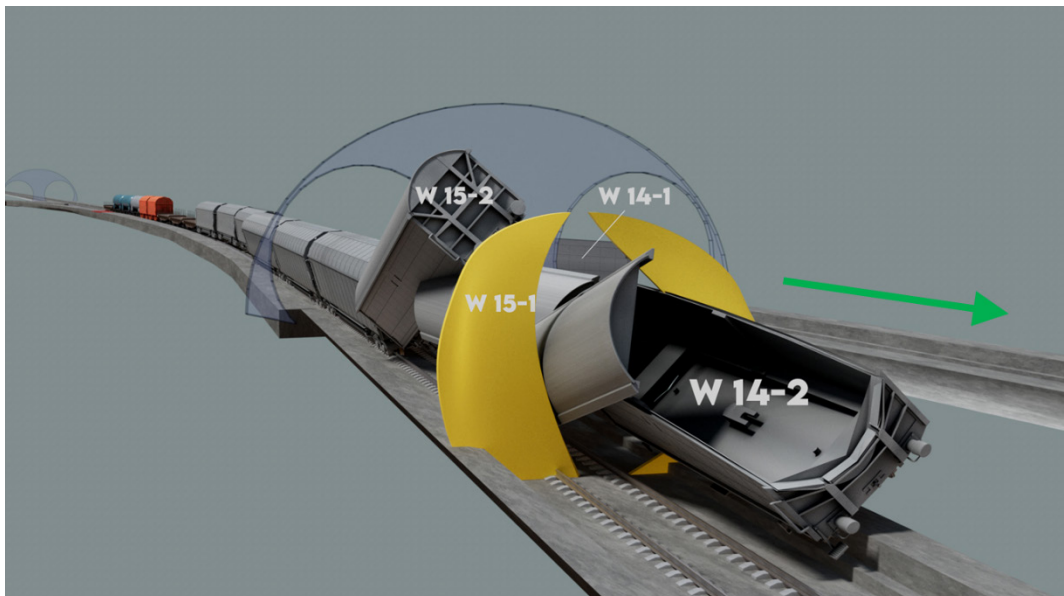


Abbildung 60: Situation nach dem Stillstand der Wagen.

Die Wagen 17 bis 26 entgleisen und zerstörten das Verbindungsgleis nach der Weiche W386 komplett (Abbildung 48).

4 Auswertung

4.1 Aufgaben und Pflichten

4.1.1 Eisenbahnunternehmen, Infrastrukturbetreiberin

Der «Allgemeine Vertrag für die Verwendung von Güterwagen» (AVV) regelt die Bedingungen bezüglich der Überlassung von Güterwagen zur Verwendung als Beförderungsmittel durch EVU im nationalen und internationalen Eisenbahngüterverkehr. Die Pflichten und Rechte der Wagenhalter und der EVU sind darin geregelt.

Die Anlage 9 des AVV, der sogenannte «Fehlerkatalog», regelt und beschreibt im Anhang 1 den für den Übergang verbindlich einzuhaltenden technischen Zustand der gegenseitig zu übergebenden Güterwagen in dem Umfang, wie er durch eine technische Übergangsuntersuchung gewährleistet sein muss.

Als Fehler wird eine Abweichung von den im Prüfkatalog beschriebenen Qualitätsmerkmalen bezeichnet, die dazu führt, dass der Wagen oder der Zug nicht den festgelegten Erfordernissen entspricht.

Unter anderem sind Schäden am Laufwerk, wie Radprofil, Beschädigungen an den Rädern, z. B. Flachstellen, Risse, thermische Überbeanspruchungen, mit den entsprechend zu treffenden Massnahmen aufgelistet.

Im Bahnhof Bellinzona wurden bei der Intervention des TKC die Bremsen des Wagens 14 (Wagen 579-2) ausgeschaltet und mit Hilfe des Tablets ein Schadenprotokoll ausgefüllt.

Das Schadenprotokoll zeigt Folgendes auf:

Als Beschreibung des Schadens, gemäss Anlage 9 des AVV, wurde der Code 1.2.2 «Thermische Überbeanspruchung durch die Bremsen» vermerkt. Die Bremsen des Wagens wurden ausgeschaltet. Der Wagen wurde mit den Formularen «Muster K» und «R1» bezettelt. Somit war die Bremsstörung beim Wagen 14 (Wagen 579-2) behoben und der Wagen gemäss Anlage 9 des AVV richtig bezettelt.

4.1.2 Für die Instandhaltung zuständige Stellen

Das ECM⁹-Instandhaltungssystem deckt gemäss Richtlinie (EU) 2016/798¹⁰ die folgenden vier Funktionen ab:

- 1 eine Managementfunktion zur Beaufsichtigung und Koordinierung der in den Ziffern 2 bis 4 genannten Instandhaltungsfunktionen und zur Gewährleistung des sicheren Zustands des Fahrzeugs im Eisenbahnsystem;
- 2 eine Instandhaltungsentwicklungsfunktion mit Zuständigkeit für die Verwaltung der Instandhaltungsunterlagen, einschliesslich des Konfigurationsmanagements, auf der Grundlage von Konstruktions- und Betriebsdaten sowie Leistungen und Erfahrungen;
- 3 eine Fuhrpark-Instandhaltungsmanagementfunktion zur Verwaltung der Abzweigung von Fahrzeugen zur Instandhaltung und deren Wiederinbetriebnahme nach der Instandhaltung;

⁹ ECM: Entity in Charge of Maintenance (die für die Instandhaltung zuständige Stelle).

¹⁰ Richtlinie (EU) 2016/798 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über Eisenbahnsicherheit.

- 4 eine Instandhaltungserbringungsfunktion zur Erbringung der technischen Instandhaltung eines Fahrzeuges oder Teile davon, einschliesslich der Betriebsfreigabeunterlagen.

Die Funktionen ECM 1 bis 3 werden durch TWA CH ausgeübt.

Die Funktion 4 (Durchführung der Instandhaltung) wird von verschiedenen Werkstätten erbracht, die bei TWA CH unter Vertrag stehen.

Untersuchungen, welche im Zusammenhang mit der Instandhaltung der Radsätze stehen, wurden bereits in mehreren Kapiteln in diesem Bericht behandelt.

Da dieses Ereignis nicht auf einen Mangel bei der Durchführung der Instandhaltung der Radsätze zurückzuführen ist, verzichtet die SUST auf weitere Abklärungen betreffend das ECM-System.

Da der betroffene Radsatztyp schon vor der Einführung der neuen Zulassungsprozesse in Betrieb war, werden diese in diesem Bericht nicht in Betracht gezogen.

4.1.3 Auswertung der Datenaufzeichnung

4.1.3.1 Fahrdaten Zug 45076

Die Auswertung der Fahrdaten ergab Folgendes:

- Zwischen dem Südportal des Tunnels und der Multifunktionsstelle Faido war der Zug mit einer ziemlich konstanten Geschwindigkeit von 90 km/h (v_{soll}) unterwegs.
- Um 12:50:01 Uhr, 446 m, respektive 28 s vor dem Stillstandpunkt, wurde die Betriebsart vom Modus «Full Supervision» auf Modus «Trip» (Zwangsbremse durch zurückgenommene «Movement Authority») via ETCS Level 2 ausgelöst.
- Um 12:50:02 Uhr, ca. 412 m vor dem Stillstandpunkt, wurde die Hauptluftleitung entlüftet.
- Um 12:50:13 Uhr, bei einer Geschwindigkeit von 68 km/h, bediente der Lokführer das Führerbremsventil (diese Aktion konnte allerdings keine Wirkung erzeugen, da die Hauptluftleitung bereits entleert war).
- Um 12:50:29 Uhr stand die Lok still.

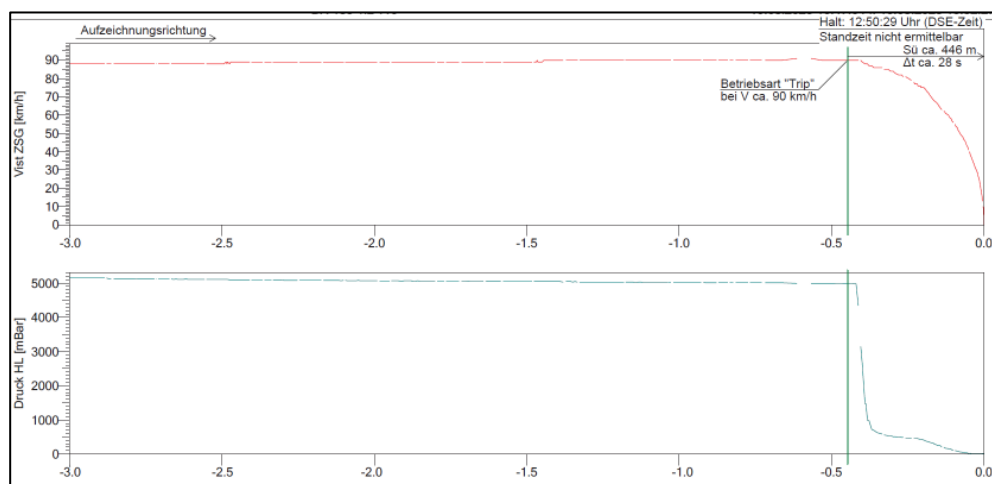


Abbildung 61: Graphische Darstellung der Fahrdaten. Rot: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm. Grün: Hauptleitungsdruck-Weg-Diagramm (HL: Hauptleitung); (0.5 = 500 m).

Die Auswertung der Fahrdaten und Stellwerkdaten ergab, dass zwischen den beiden Systemen eine Zeitdifferenz besteht. Diese Differenz ist für das vorliegende Ereignis irrelevant.

4.1.3.2 Radio Bloc Center (RBC)

Die Auswertung der RBC-Daten zwischen 12:47 Uhr und 12:50 Uhr ergab Folgendes:

- Der Zug 45016 verkehrte im Modus «Full Supervision» (FS) mit «Movement Authority» (MA) mit $v_{\max}$ 95 km/h.
- Die von der Wurzel her befahrene Weiche W387 (Abbildung 30) meldete einen Endlageverlust, Falschbefahrdetektion und Verbindungsverlust der Weichenüberwachung.
- In der Folge wurde vom Stellwerk ein Nothalt ausgelöst. Die MA für den Zug 45016 wurde entzogen.
- Das RBC sandte dem Zug einen UES (Unconditional Emergency Stop = «TRIP»), der zu einer Zwangsbremmung führte.
- Die Lok bestätigte den UES dem RBC «V 95 km/h auf Trip».

4.1.3.3 Hydrostar Weiche – Verlust der Verschlüsse durch Beschädigung

Beim Aufbau dieses Typs Hydrostarweichen befinden sich die Verschlüsse sowie die Zungenverbindungsstangen, die als Rückfallebene für die Spitzenverschlüsse dienen, oberhalb der Schwellenoberkante (Abbildung 62).

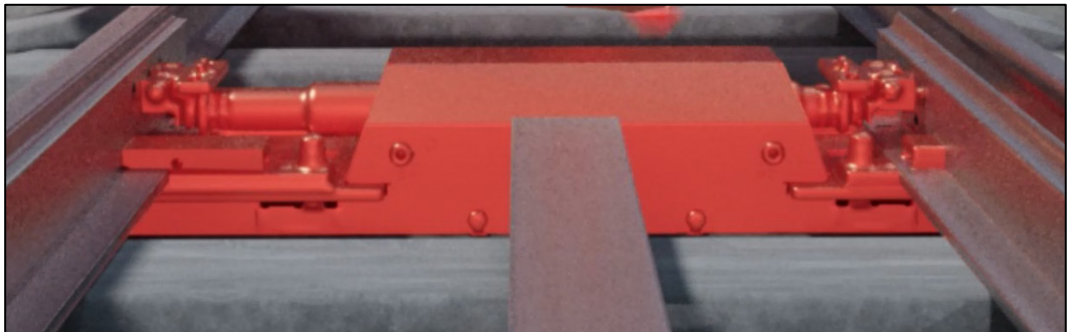


Abbildung 62: Hydrostarweiche, Spitzenverschluss.

Im Vergleich dazu befinden sich bei konventionellen Weichen mit Klinkenverschluss (Anlage 10, Abbildung 103) der Verschluss und die Rückfallebene (Zungenkontrollstangen) unterhalb der Schwellenoberkante.

Der Spitzenverschluss und die Zungenverbindungsstangen wurden bei der Weiche W387 durch die entgleiste Achse komplett abgerissen und über mehrere Meter mitgeschleift (Abbildung 35).

Die Achse 1 des Wagens 11 zerstörte auch bei der Weiche W386 alle Verschlüsse (Abbildung 54 und Abbildung 55). Dadurch konnten die Zungen und das Herzstück nicht mehr in korrekter Position gehalten werden.

4.1.3.4 Zugkontrolleinrichtungen

Bei der Durchfahrt des Zuges 45016 über die Zugkontrolleinrichtungen bei Claro wurden am gesamten Zug weder Heissläufer / Festbremser (HFO) noch Unregelmässigkeiten bezüglich asymmetrischer Radlasten, Überlasten oder Radunrundheiten (RLC) registriert.

Die Bremsen von Wagen 14 wurden in Bellinzona ausgeschaltet. Der Zug verliess den Bahnhof Bellinzona um 12.07 Uhr. Bei der Durchfahrt über die Zugkontrolleinrichtungen Claro kurz vor dem Südportal um 12:15 Uhr wurde keine «Warnung Festbremse» registriert. Dies zeigt, dass die Bremsen des Wagens 14 vor dem Tunnelportal nicht angelegt waren.

4.1.3.5 Video

Die Videoanalyse der Multifunktionsstelle Faido zeigt, dass bei der Zugdurchfahrt des Zuges 45016 nur unter dem Wagen 11 Funken sichtbar sind (Abbildung 52). Nachdem der Zug diesen Abschnitt freigelegt hatte, sind nur wenige Schäden am Betonboden des Tunnels sichtbar (Abbildung 53). Dies zeigt, dass in diesem Bereich die entgleiste Achse 1 von Wagen 11 unter dem Wagen quasi «in der Luft» hing und nicht auf den Betonschwellen aufschlug.

4.2 Fahrzeuge und technische Einrichtungen

4.2.1 Laufradsatz BA 390

Der gebrochene Radsatz von Wagen 11 ist ein Laufradsatz vom Typ BA 390 (Abbildung 63) mit einer Radsatzlast vom 22.5 t.

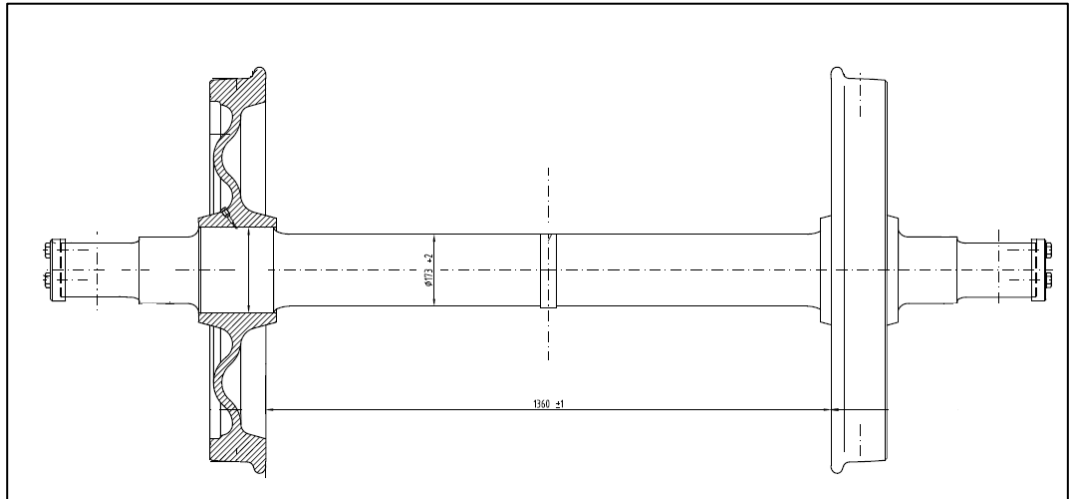


Abbildung 63: Typenzeichnung Laufradsatz BA 390.

Der Radtyp BA 390 ist ein Vollrad (Abbildung 64) der Stahlgüte ER7. Das Rad wurde im Jahr 2008 durch die Firma RAFIL (heute Bochumer Verein) hergestellt.

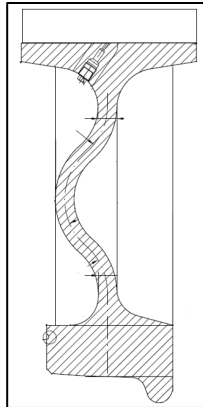


Abbildung 64: Typenzeichnung Radform BA 390.

Gemäss den Vorgaben von VPI-04 werden Radscheiben aussen mit thermosensibler Farbe angestrichen. Erhitzt sich die Radscheibe durch die Bremse übermässig, sollte die Farbe am Übergang vom Radkranz zum Steg abblättern.

4.2.2 Wagen 11 (Wagen 466-2)

4.2.2.1 Beschreibung

Der Wagen 466-2 ist ein 4-achsiger Schiebewandwagen vom Typ Laaiis, bestehend aus zwei kurzgekuppelten zweiachsigen Wageneinheiten (Abbildung 65). Die gesamte Wagenlänge (Länge über Puffer (LüP)) beträgt 27 m. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 120 km/h. Der Wagen war beladen und hatte ein Gesamtgewicht von 80.1 t. Er war an der elften Position im Zug eingereiht.



Abbildung 65: Wagentyp Laaiis – bauähnlich wie Wagen 11 (Quelle: TWA).

4.2.2.2 Feststellungen

Der Wagen 466-2 wurde im Januar 2018 einer Revision G 4.2 gemäss VPI-Leitfaden unterzogen.

Zwischen der letzten Revision und der Entgleisung war der Wagen 466-2 mehrmals für verschiedene kleinere Reparaturen in verschiedenen Werkstätten. Keine davon steht im Zusammenhang mit den Achsen. Auf den verschiedenen Freigabeprotokollen werden keine Anomalien an den Radsätzen erwähnt.

Die Arbeiten und Prüfungen an den Radsätzen wurden gemäss den Instandhaltungsvorgaben der VPI-04, respektive VPI-09 durchgeführt und dokumentiert.

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessung der letzten IS2 lagen unter den maximal zulässigen Werten, die durch die VPI-04 vorgegeben sind.

Seit der letzten IS2 hat der Radsatz mit der gebrochenen Radscheibe ca. 173 000 km zurückgelegt.

Der Radscheibenbruch ist nicht auf einen Instandhaltungsmangel der Radsätze des Wagens 466-2 zurückzuführen.

4.2.3 Kontrolle und Vermessung der Radsätze von den Wagen 11 und 14

4.2.3.1 Radsätze Wagen 11 (Wagen 466-2)

Alle Radsätze des Wagens 11 wurden aus dem Tunnel geborgen. Alle Radprofile wurden durch die SUST mittels Laservermessung erfasst.

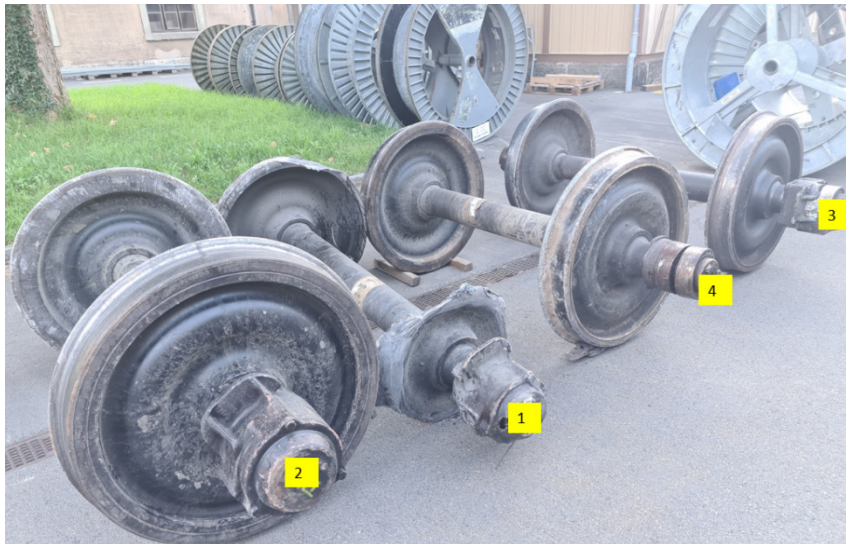


Abbildung 66: Aufnahme der vier Radsätze von Wagen 11 nach der Bergung.

4.2.3.1.1 Radsatz 1 (81987)

Das rechte Rad ist gebrochen.

Der Spurkranz des linken Rades wies eine starke Verformung im Bereich des Spurkranzes auf und hatte eine ca. 30 cm lange Flachstelle am Radumfang (Abbildung 67).

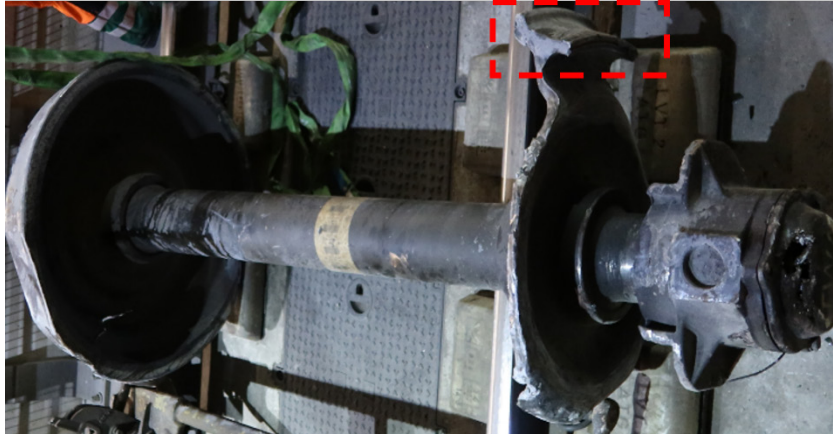


Abbildung 67: Radsatz 1, Aufnahme im Tunnel bei der Bergung.

Alle Spurkranzmasse des linken Rades (Sh, Sd, qR) entsprachen weitgehend den Neuwerten. Das linke Rad wies keinen Hohllauf auf. Grössere Ausbröckelungen waren nicht vorhanden.

Die Profilverformung (blaue Linie) an der Spurkranzkuppe der linken Radscheibe ist eine Folge der Entgleisung (Abbildung 68).

Es ist keine Farbabblätterung an den Rädern sichtbar. Gemäss IS2 Protokoll wurde die Farbe vom Typ BD 18 angebracht.

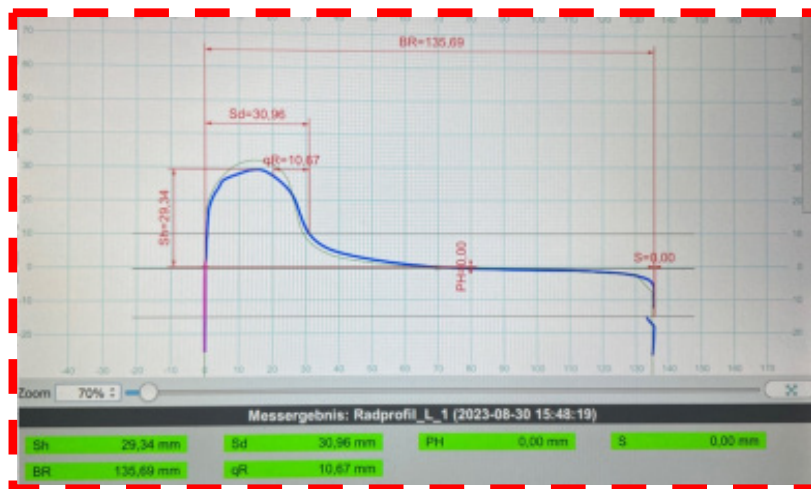


Abbildung 68: Soll- / Ist-Radprofil des gebrochenen Rades der Radsatz 1. Grün: Neu- / Soll-Profil; Blau: Ist-Profil.

4.2.3.1.2 Radsätze 2–4

Die Radsätze 2–4 (Abbildung 66) wiesen leichte Schäden auf, die auf die Entgleisung zurückzuführen sind.

Alle Spurkranzmasse (Sh, Sd, qR) entsprachen weitgehend den Neuwerten. An keinen Rädern war Hohllauf feststellbar. Grössere Ausbröckelungen sind nicht vorhanden. Es sind keine Farbabblätterungen an den Rädern sichtbar.

4.2.3.1.3 Bremssohlen

Die noch vorhandenen LL-Bremssohlen von Wagen 11 wurden demontiert und einer Sichtprüfung durch die SUST unterzogen.

Die Prüfung ergab Folgendes:

- Die Sohlen der Achse 1 wurden bei der Entgleisung zerstört.
- Abgesehen von den mechanischen Schäden als Folge der Entgleisung gibt der Zustand der Bremssohlen der Achsen 2–4 keinen Anlass für Beanstandungen. An den Sohlen sind keine Spuren von Überhitzung sichtbar.
- Es ist nicht nachvollziehbar, zu welchem Zeitpunkt die Bremssohlen eingebaut wurden.



Abbildung 69: Bremssohlen des Radsatzes 2 von Wagen 11.

4.2.3.2 Radsätze Wagen 14 (Wagen 579-2)

4.2.3.2.1 Untersuchung nach der Entgleisung

Die vier Radsätze von Wagen 14 wurden in einer Instandhaltungswerkstatt durch die SUST untersucht.

Die vier Radsätze sind für eine Achslast von 25 t ausgelegt. Ein Radsatz ist mit Radscheiben vom Typ BA 310, die drei anderen sind mit Radscheiben vom Typ BA 307 bestückt.

Alle Radprofile wurden erfasst. Die Eigenspannung aller Räder wurde gemäss VPI-Vorgaben für IS2 mittels Ultraschall geprüft (Abbildung 70).

Ergebnisse:

- Ein Rad des ersten Radsatzes, das in der Tunnelröhre West, Gleis 7000, aufgefunden wurde, ist verbogen. Alle anderen Achsen weisen keine grösseren Beschädigungen auf;
- Es sind keine grossen entgleisungsbedingten Spuren an den drei anderen Achsen erkennbar;
- Alle Radprofile sind weitgehend neuwertig;
- Die Eigenspannungswerte aller Räder befinden sich zwischen +19 und +139 MPa (Druckeigenspannung, zulässiger Maximalwert für diesen Radtyp: –300 bis +400 MPa).



Abbildung 70: Aufnahme eines Radsatzes bei der Eigenspannungsmessung.

4.2.3.2.2 Bremssohlen

Die Bremssohlen von Wagen 14-1 wurden zerstört.

Die noch vorhandenen LL Bremssohlen der Achsen des Wagens 14-2 wurden demontiert und einer Sichtprüfung unterzogen.

Abgesehen von den mechanischen Schäden infolge der Entgleisung gibt der Zustand der Bremssohlen der Achsen 2–4 keinen Anlass für Beanstandungen. An den Sohlen sind keine Spuren von Überhitzung sichtbar.



Abbildung 71: Bremssohlen der ersten Achse von Wagen 14-2.

4.2.3.3 Instandhaltung der Radsätze und Revision des Wagens 11 (Wagen 466-2)

4.2.3.3.1 Instandhaltung der Radsätze

Die Instandhaltung (IS2) der Radsätze wurde gemäss den VPI-Vorgaben (VPI-04 und VPI-09) durchgeführt.

Der Radsatz 1 (81987) mit der gebrochenen Radscheibe wurde im Oktober 2017 einer IS2 unterzogen.

Der Radsatz 3 wurde im August 2016 und der Radsatz 4 im Januar 2017 einer IS2 unterzogen.

4.2.3.3.2 Revision des Wagens 11 (Wagen 466-2)

Bei der Wagenrevision G 4.2 im Januar 2018 wurden die Radsätze zu Beginn der Revision ausgebaut und eingelagert. Nach der Revision wurden die Radsätze 2–4 wieder eingebaut. Der Radsatz 1 (81987), der im Oktober 2017 eine IS2 erhielt, wurde neu unter dem Wagen 466-2 eingebaut.

Im Dezember 2021 wurde der Radsatz 2 durch die Achse mit der Nr. 128066 ersetzt.

Die folgende Tabelle fasst die zur Unfallzeit eingebauten Radsätze mit dem Datum der letzten IS2 zusammen.

	Radsatz Nr.	Durchmesser	Jahrgang	Radtyp	Letzte IS2
1	81987 (X)	862 mm	2008	BA 390	10/2017
2	128066	920 mm	2021	BA 390	Keine - (neu 2021)
3	00410	896 mm	2010	BA 390P	08/2016
4	417326	902 mm	2011	59P	01/2017

Tabelle 1: IS2-Revision der vier Radsätze von Wagen 11 (Stand am 10.08.2023).

4.2.4 Gutachten – Metallurgische Untersuchung der Radsätze

Der Radsatz mit der gebrochenen Radscheibe von Wagen 11 sowie die drei anderen intakten Radsätze des gleichen Wagens wurden einer metallurgischen Untersuchung unterzogen.

Am defekten Radsatz wurden eine fraktografische Untersuchung, eine lichtmikroskopische Untersuchung, eine chemische Analyse sowie mechanische Prüfungen (Kerbschlagbiegeprüfungen und Härtemessungen) durchgeführt.

Die Eigenspannung aller Radscheiben, inklusive dem grössten Bruchstück der gebrochenen Radscheibe, wurden mit verschiedenen Messmethoden (Ultraschall und Röntgenbeugung¹¹) ermittelt.

4.2.4.1 Defekter Radsatz 1 (81987)

4.2.4.1.1 Mechanische Prüfungen und Chemische Analyse der Radscheiben

Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung sowie der Härtemessungen am Radkranz sowie am Radsteg entsprechen den Normenwerten für das Material ER7.

Die Härte im Bereich des Radkranzes entspricht den Vorgaben der EN 13262¹² und liegt oberhalb des geforderten Mindestwertes.

Die chemische Zusammensetzung entspricht den Vorgaben an den Werkstoff ER7.

4.2.4.1.2 Makroskopische und fraktographische Untersuchung

Der defekte Radsatz mit der gebrochenen Radscheibe, den entsprechenden Bruchstücken sowie die gegenüberliegende Radscheibe wurden untersucht.

¹¹ Röntgenbeugung: Sog. X-ray diffraction.

¹² EN 13262: Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Produktanforderungen.

Alle Bruchflächen weisen Ermüdungsrisse ausgehend von den Laufflächen auf. Alle Risse starten ungefähr senkrecht zur Lauffläche.

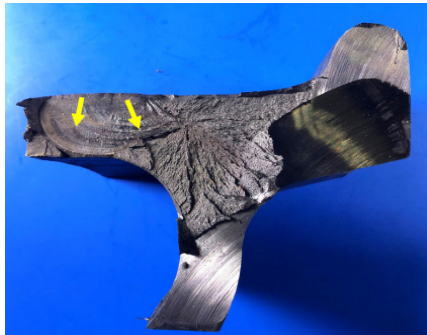


Abbildung 72: Bruchstück A.



Abbildung 73: Bruchstück B.

Abbildung 72 und Abbildung 73 zeigen Aufnahmen der fraktografischen Untersuchung zweier Bruchstücke (Bruchstücke A und B) der gebrochenen Radscheibe. Gelbe Pfeile: Rissausbreitung ausgehend von der Lauffläche. Blauer Pfeil: Restgewaltbruch (helle Oberfläche).

4.2.4.1.3 Raster- und Lichtmikroskopische Untersuchung

Die Rastermikroskopaufnahme zeigt Folgendes:

- Mehrere Bruchausgänge sind im Bereich der Lauffläche erkennbar. Zahlreiche weitere Anrisse sind auf der Lauffläche vorhanden.
- Das Versagen wurde gemäss den Analysen aufgrund von Ermüdung (Schwingungsrisse) ausgehend von der Lauffläche ausgelöst.

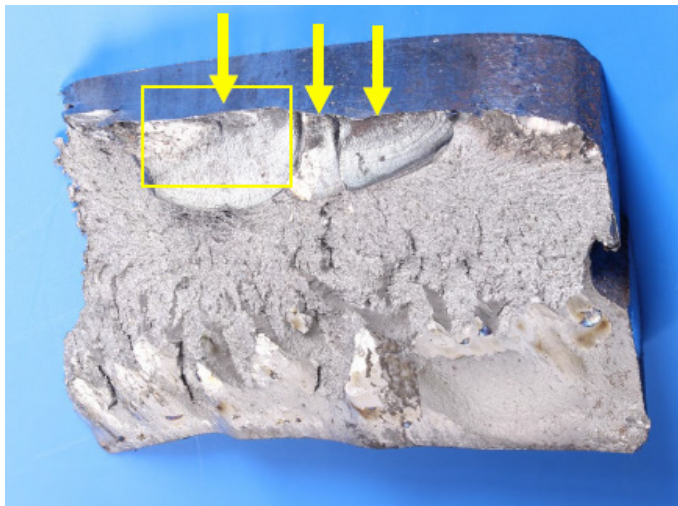


Abbildung 74: Rastermikroskopische Aufnahme des Bruchteils.

Die lichtmikroskopische Aufnahme zeigt Folgendes:

- Mehrere Risse wuchsen parallel zur Lauffläche.
- Im Bereich der Rissinitiierung (Abbildung 75, grünes Rechteck) sind keine mechanischen Beschädigungen wie Verformung oder Rollkontaktermüdung sichtbar (Anlage 6, Abbildung 100). Das Material ist in diesem Bereich homogen. Es sind keine «Einschlüsse» im Ausgangsbereich des Bruches sichtbar.

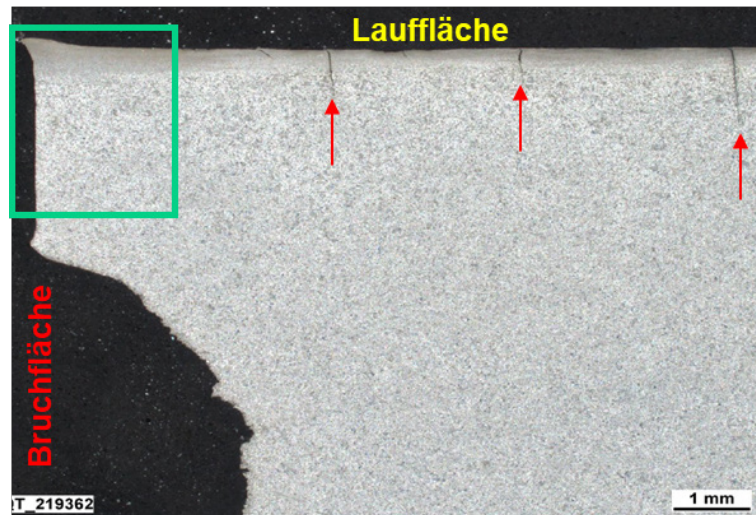


Abbildung 75: Lichtmikroskopische Aufnahme, Lauffläche mit mehreren Rissen.

- Die Risse sind mit Produkten gefüllt (Abbildung 76). Vermutlich handelt es sich hier um eine Kombination aus Korrosion und Reiboxidation («Aneinanderreiben» der Rissflanken und damit einhergehende Oxidation der Oberflächen).



Abbildung 76: Mikroschliff, Risse mit Produkten gefüllt.

4.2.4.1.4 Eigenspannung

4.2.4.1.4.1 Eigenspannungsmessung der gebrochenen Radscheibe (rechts)

Die Messungen wurden beim grössten Bruchstück mittels Ultraschall sowie mit der Röntgenbeugung durchgeführt.

Nachfolgend sind die Messergebnisse der Röntgenbeugung ersichtlich (Abbildung 78, Abbildung 80 und Abbildung 81).

Die Eigenspannungen wurden im Radsteg sowie an der Oberfläche ermittelt.

- Radsteg



Abbildung 77: Eigenspannungsmessung am Radsteg im Messpunkt MP2.

Im Radsteg liegt die Druckeigenspannung¹³ an der Oberfläche bei ca. -200 MPa.

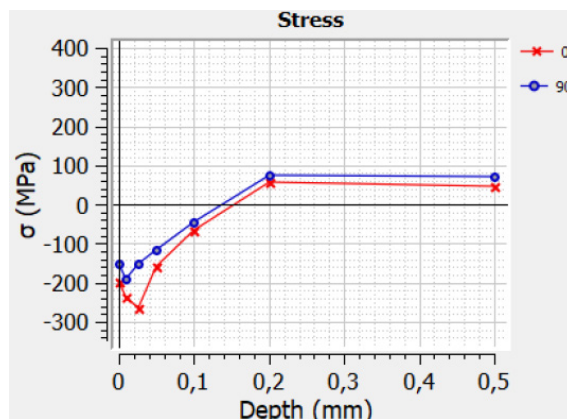


Abbildung 78: Werte im Messpunkt MP2 der Eigenspannung im Radsteg.

- Lauffläche

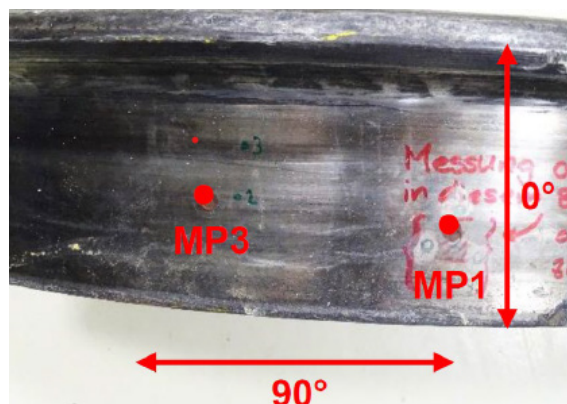


Abbildung 79: Eigenspannungsmessung an der Oberfläche in den Messpunkten MP1 und MP3.

¹³ Die Druckeigenspannungen werden mit negativen Werten angegeben, Zugeigenspannungen mit positiven.

Die Messungen zeigen lokal grosse Unterschiede im Eigenspannungszustand:

- Im Messpunkt MP1 beträgt die Druckeigenspannung an der Oberfläche ca. -250 MPa.
- Im Messpunkt MP3 liegt eine hohe Zugeigenspannung an der Oberfläche von ca. +370 MPa vor.
- Mit zunehmender Tiefe nimmt der Wert der Eigenspannung ab.

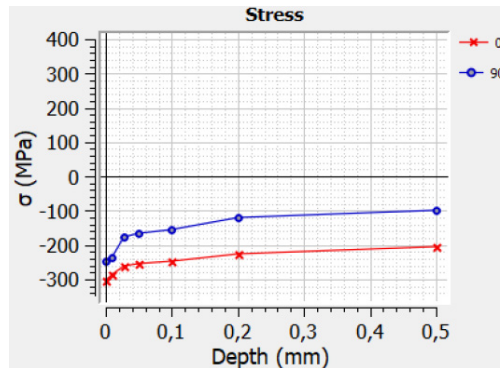


Abbildung 80: Werte der Eigenspannung an der Oberfläche im Messpunkt MP1.

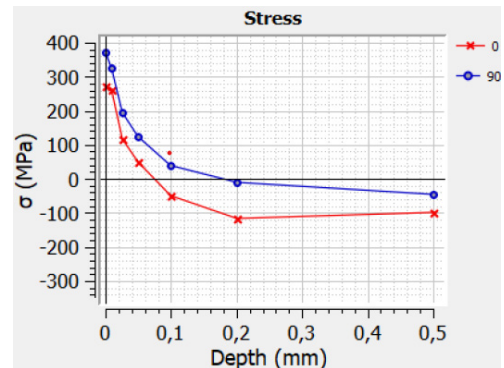


Abbildung 81: Werte der Eigenspannung an der Oberfläche im Messpunkt MP3.

4.2.4.1.4.2 Eigenspannungsmessung intakte Radscheibe (links)

Die Messungen mittels Ultraschall wurden am linken Rad an jeweils vier gleichmässig über den Umfang des Radkranzes verteilten Positionen auf der Innenseite durchgeführt.

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen (Mittelwert) zeigen Zugeigenspannungen zwischen +54 MPa und +605 MPa.

4.2.4.2 Radsatz 2 (128066)

4.2.4.2.1 Magnetpulververfahren

Die Radscheiben des Radsatzes wurden einer Magnetpulverprüfung¹⁴ unterzogen.

Die Radscheiben waren weitgehend neuwertig (Fertigung 2021). Dieser Radsatz wurde im Dezember 2021 im Wagen 466-2 eingebaut. Die Laufleistung bis zur Entgleisung betrug ca. 50 000 km.

Die Prüfung zeigt vereinzelt lineare Anzeichen von Rissen (ca. 15 mm Länge) in axialer Richtung auf der Lauffläche (Abbildung 82).

¹⁴ Magnetpulverprüfung: Oberflächenprüfverfahren. Das Prüfstück wird magnetisiert und mit einer, mit pulverförmigen Eisenpartikeln angereicherten Lösung besprüht. Die Veränderung der Feldlinien an Rissen/Unstetigkeiten führt zu einer Ansammlung der Partikel an deren Rändern.

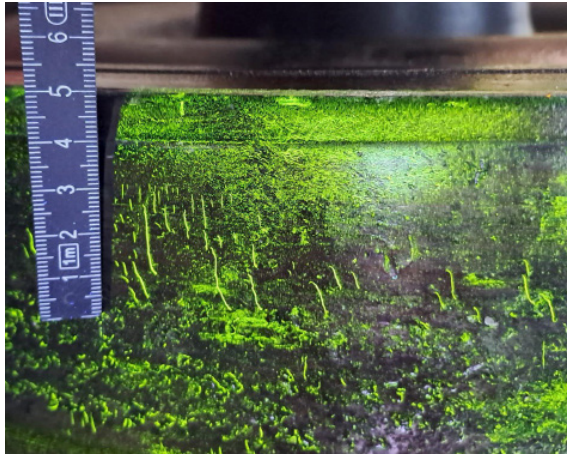


Abbildung 82: Magnetpulverprüfung mit linearen Rissanzeichen.

4.2.4.2.2 Fraktografische Untersuchung

Die Radscheiben wurden für die vertiefte Untersuchung mittels Mikroschliff vorbereitet. Im Mikroschliff wurde eine beginnende Rissbildung ausgehend von der Lauffläche detektiert. Die weitere Ausbreitung lässt sich noch nicht eindeutig feststellen.

4.2.4.2.3 Eigenspannungsmessung

Die Messungen mittels Ultraschall wurden bei beiden Rädern an jeweils vier gleichmässig über den Umfang des Radkranzes verteilten Positionen auf der Innenseite durchgeführt.

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen (Mittelwert) zeigen Druckeigenstressungen zwischen -51 MPa und -129 MPa .

4.2.4.3 Radsatz 3 (00410)

4.2.4.3.1 Visuelle Inspektion

Die visuelle Inspektion der Laufflächen der Radscheiben ergab Folgendes:

Auf den Laufflächen sind blaue Verfärbungen sichtbar (Abbildung 83)



Abbildung 83: Blaue Verfärbung der Lauffläche. Gelbe Pfeile: Rissanzeichen.

4.2.4.3.2 Magnetpulverprüfung, metallographische und fraktografische Untersuchung

Die Magnetpulverprüfung zeigt lineare Anzeichen (ca. 25–35 mm Länge) in axialer Richtung auf der Lauffläche über den gesamten Umfang.

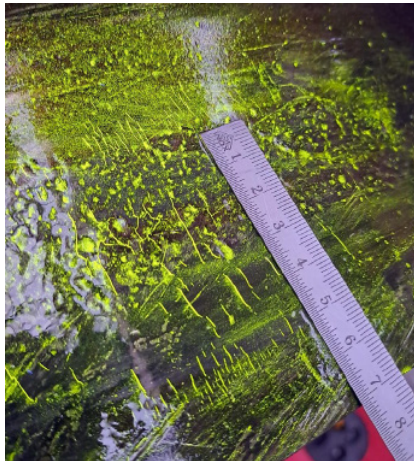


Abbildung 84: Rissanzeichen auf der Lauffläche einer Radscheibe von Radsatz 3.

Die Radscheiben wurden für die vertiefte Untersuchung mittels Mikroschliff vorbereitet.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Risse zeigt Folgendes:

- Die Risse gehen von der Lauffläche aus. Der Riss verläuft mit zunehmender Tiefe (gelbe Rahmen) ungefähr senkrecht zur Oberfläche und ist analog zu den Symptomen, wie beim gebrochenen Rad am Radsatz 1 festgestellt wurden (Abbildung 85).
- Im Bereich der Rissinitiierung sind keine mechanischen Beschädigungen z. B. Anzeichen von Rollkontaktermüdung (Anlage 6, Abbildung 100) sichtbar.

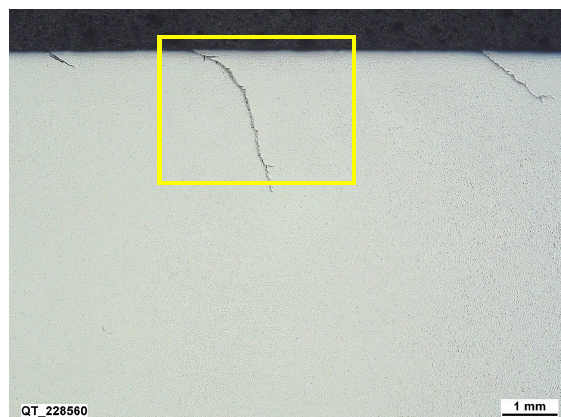


Abbildung 85: Fraktografische Untersuchung der Risse am Radsatz 3.

4.2.4.3.3 Eigenspannungsmessung

Die Messungen mittels Ultraschall wurden bei beiden Rädern an jeweils vier gleichmässig über den Umfang des Radkranzes verteilten Positionen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen (Mittelwert) zeigen Zugeigenstressungen zwischen +63 MPa und +101 MPa.

4.2.4.4 Radsatz 4 (417326)

4.2.4.4.1 Visuelle Prüfung, Magnetpulverprüfung, metallographische und fraktografische Untersuchung

Nach der Reinigung und mit einer guten Beleuchtung sind die Risse an der Oberfläche visuell erkennbar (Abbildung 86).



Abbildung 86: Visuelle Rissanzeichen an der Oberfläche.

Die Ergebnisse der Magnetpulverprüfung sind vergleichbar mit denen von Radsatz 3.

Im Mikroschliff sind sichtbare Risse ausgehend von den Laufflächen vorhanden (Abbildung 87). Die Risse breiten sich ungefähr senkrecht zur Oberfläche und teilweise unter einem flacheren Winkel aus. Mit zunehmender Tiefe erfolgt jedoch eine Ablenkung hin zu einer ungefähr senkrechten Rissausbreitung.



Abbildung 87: Fraktografische Untersuchung der Risse.

4.2.4.4.2 Eigenspannungsmessung

Die Messungen mittels Ultraschall wurden bei beiden Rädern an jeweils vier gleichmässig über den Umfang des Radkranzes verteilten Positionen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen (Mittelwert) zeigen Zugeigenspannungen zwischen +48 MPa und +126 MPa.

4.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung zusammengefasst. Die komplette Analyse ist in der Anlage 8 vorhanden.

4.2.5.1 Ergebnisse betreffend die gebrochene, rechte Radscheibe von Radsatz 1

- Die visuellen und rasterelektronischen Untersuchungen der Bruchflächen am gebrochenen Rad haben gezeigt, dass bei allen Bruchstücken und dem an der Radscheibe verbliebenen Bereich Schwingungsrisse vorhanden sind. Diese haben sich an der Lauffläche gebildet und breiteten sich senkrecht dazu in das Material hinein aus.
- Weder die rasterelektronischen noch die metallografischen Untersuchungen der Bruchausgangsbereiche haben im Material Defekte zutage gefördert, die die Rissentstehung begünstigt hätten.
- Neben Druckeigenspannungen (-250 MPa) sind an der Oberfläche auch hohe Zugeigenspannungen ($+370$ MPa) nachgewiesen worden.
- Die an der Lauffläche vorhandenen Zugeigenspannungen dürften die Rissentstehung deutlich begünstigt resp. erst ermöglicht haben. Sobald sich Anrisse gebildet haben, begünstigen die Spannungsüberhöhungen (hohe lokale Spannungsintensitäten) an den Risspitzen die weitere Rissausbreitung sehr stark.
- Die an der Lauffläche vorhandenen hohen Eigenspannungen werden als massgeblicher Faktor für die Rissentstehung angesehen.
- Die Vorgänge beim Bremsen werden als massgeblich für die Entstehung der lokalen Zugeigenspannungen an der Lauffläche betrachtet.

4.2.5.2 Ergebnisse betreffend den Radsatz mit der gebrochenen Radscheibe und die Radsätze 2–4

- Die Untersuchungen an der zweiten (linken) Radscheibe des Radsatzes 1 zeigen, dass auch dieses Rad Risse aufweist, die sich vom Radkranz in den Steg hinein ausgebreitet haben. Die fraktografische Untersuchung bestätigte, dass es sich ebenfalls um Schwingungsrisse handelt, die von der Lauffläche ausgehen. Das Schädigungsbild ist somit identisch mit dem der gebrochenen Radscheibe. Aus Grund der Kombination aus Schadenbild mit einem Rad-durchmesser nahe am minimalen Wert ist es daher davon auszugehen, dass auch dieses Rad bei einem Weiterbetrieb hätte versagen können.
- Das Vorhandensein von Schwingungs- oder Ermüdungsrisse auf den Bruchflächen bedeutet, dass die zyklische Festigkeit des Materials überschritten worden sein muss.
- Das Vorhandensein von zahlreichen weiteren von der Lauffläche ausgehenden Rissen legt nahe, dass es sich um ein systematisches Phänomen handelt, das nicht auf einzelne Materialdefekte zurückgeführt werden kann. Der Radsatz 2 (128066), der im Jahr 2021 produziert wurde und ca. 50 000 km zurückgelegt hatte, wies schon Risse, die unter einem relativ flachen Winkel verlaufen, auf. Bei den beiden Radsätzen 3 (00410) und 4 (417 326) sind jeweils deutlich sichtbare Risse ausgehend von den Laufflächen vorhanden (Anlage 6, Abbildung 97 und Abbildung 99). Die Risse breiten sich ungefähr senkrecht zur Oberfläche aus.

- Die an der Lauffläche nachgewiesenen Zugeigenspannungen (Radsatz 1, intakte Radscheibe) liegen oberhalb der für die Auslegung herangezogenen Dauerfestigkeit des Stahls. Die Zugeigenspannungen haben sehr wahrscheinlich dazu geführt, dass in Summe mit den Betriebsbeanspruchungen die Dauerfestigkeit überschritten worden ist und die Rissentstehung dadurch erklärt werden kann.

4.2.5.3 Allgemeine Aussagen

- In einer unter zyklischen Beanspruchungen eingesetzten Komponente verbessern Druckeigenspannungen die Ermüdungsbeständigkeit, da diese Druckeigenspannungen zuerst überwunden werden müssen, bevor Zugeigenspannungen entstehen, die für die Rissentstehung notwendig sind. Die im Radkranz erzeugten Eigenspannungen zielen somit darauf ab, der Entstehung von Schwingungsrissen vorzubeugen. Umgekehrt wirken Zugeigenspannungen wie eine Vorlast auf das Material zusätzlich zu den Betriebsbeanspruchungen.
- Einige Metalle, wie der für die Räder eingesetzte Stahl, besitzen einen Grenzwert für die aufgetragenen Spannungen, die sogenannte Dauerfestigkeit, unterhalb derer während einer technischen Nutzungsdauer nicht mit dem Auftreten von Ermüdungsrissen gerechnet werden muss. Die Auslegung eines Radsatzes erfolgt daher so, dass die während des Betriebs zu erwartenden zyklischen Lasten unterhalb der Dauerfestigkeit liegen. Die Bildung von Schwingungsrissen in metallischen Werkstoffen geschieht dadurch, dass auch unterhalb der Streckgrenze¹⁵ bereits Versetzungsbewegungen auftreten. Versetzungen sind in Metallen die Träger der plastischen Verformung und während eines Belastungszyklus kann es zu einer geringfügigen Versetzungsbewegung kommen. Die Voraussetzung dafür ist, dass an der Materialoberfläche Zugspannungen vorliegen, die eine Versetzungsbewegung ermöglichen.
- Obwohl alle drei intakten Radsätze des Wagens 11 einen unterschiedlichen Lebenslauf in Bezug auf die Laufleistung (zurückgelegte Kilometer) sowie unterschiedliche Produktionsjahre der Räder aufweisen, ergab die metallurgische Untersuchung, dass alle Räder die gleichen Rissmerkmale aufwiesen.
- Visuelle blaue Anlauffarben sind auf einigen Laufflächen sichtbar, aber keine Radscheibe wies Farbabblätterungen infolge Überhitzung an den Radkörpern auf.
- Die Risseinleitung und -ausbreitung aller untersuchter Bruchflächen identisch. Alle Risse gehen von der Lauffläche aus, auch mit zunehmender Tiefe ungefähr senkrecht zur Oberfläche. Somit ergibt sich ein analoges Bild wie beim gebrochenen Rad. Es handelt sich hier um ein systematisches Problem.
- Die vergleichende Untersuchung der Eigenspannungen mittels Ultraschall und Röntgenbeugung zeigte auf, dass die während der Instandhaltung durchgeführten Ultraschallmessungen nur beschränkt eine Aussage zum Eigenspannungszustand direkt an der Lauffläche ermöglichen. Der für die Risseinleitung massgebliche Bereich an der Lauffläche kann damit nicht ausreichend erfasst werden.
- Die Methode zur Messung der Eigenspannung im Labor unterscheidet sich von der in der Instandhaltung verwendeten Methode. Die Untersuchungen,

¹⁵ Streckgrenze: Übergang zwischen elastischer und plastischer Verformung

zeigten, dass an der Oberfläche aller untersuchten Räder Werte mit hohen Zugeigenspannungen erreicht wurden. Dies, obwohl die Eigenspannung im gesamten Verschleissbereich als Druckeigenspannung ausgewiesen sein müsste (Anlage 7, Vorgaben EN 13262).

- Die Zugeigenspannungen an der Lauffläche können durch plastische Verformungen, inhomogenes Gefüge oder durch thermische Einflüsse entstehen. Bei allen untersuchten, intakten Rädern waren weder plastische Verformungen, die durch Rollbeanspruchungen verursacht werden, noch ein inhomogenes Gefüge vorhanden (Abbildung 88).



Abbildung 88: Intaktes Rad der Achse 3, mit senkrechtem Riss, ohne plastische Verformung. Details sind in der Anlage 6, Abbildung 100 aufgeführt.

- Somit bleibt als äusserer Faktor nur, dass die Eigenspannungen an der Radoberfläche durch thermische Überbeanspruchung entstehen.
- Thermische Überbeanspruchungen an der Radoberfläche entstehen während der Fahrt, wenn die Bremssohlen am Rad anfliegen, dies als Folge einer Festbremse oder wenn sich die Bremsen nicht ganz gelöst haben oder zu langsam lösen.

4.2.5.4 Vorschläge aus metallurgischer Sicht, um zukünftige Fälle zu vermeiden

Die Untersuchungen zeigten, dass die für das Versagen verantwortlichen Schwingungsrisse sich von der Lauffläche aus in die Radscheiben ausgebreitet haben. Die Länge der Risse war erheblich, bis es zum Versagen und zur Entgleisung gekommen ist.

- Es erscheint daher sinnvoll, geeignete, zerstörungsfreie Prüfungen zu evaluieren, um Oberflächenrisse in den Laufflächen detektieren zu können.
- Da die Risse von der Lauffläche ausgehen, wird zudem empfohlen, Massnahmen zu prüfen, die insbesondere die thermische Belastung während der Bremsvorgänge zu reduzieren, da dies den Eigenspannungszustand im Bereich der Laufflächen verschlechtert.

4.2.6 Technische Kontrolle vor Zugabfertigung

Der Zug wurde in Chiasso einer technischen Kontrolle unterzogen.



Abbildung 89: Mögliche Sicht auf eine Radscheibe eines Wagens vom Typ Laaiis. (Vergleichbare Aufnahme ausserhalb des Tunnels von Wagen 8 des Güterzuges 45016.)

Für eine visuelle Kontrolle des Zustandes der äusseren Seite der Radscheibe ist die Sicht nur im unteren Bereich gegeben (Abbildung 89), da die im linken und rechten Bereich des Achslagergehäuses vorhandenen Achshalter diese stark einschränken.

Eine visuelle Kontrolle der inneren Seite der Radscheibe im Gleisfeld ist nicht möglich.

Daher ist eine wirksame Kontrolle für die Suche nach entstehenden Radscheibenrissen nur während der Instandhaltung auf einer Grube möglich.

4.3 Menschliche Faktoren

4.3.1 Menschliche und individuelle Merkmale

Die beiden technischen Kontrolleure (TKC) verfügten über die nötigen Ausbildungen, um ihre Arbeit durchzuführen.

Der TKC, der den Zug in Chiasso vorbereitete und kontrollierte, ist seit 1990 in der Funktion als technischer Kontrolleur tätig und gilt somit als erfahren. Der letzte Weiterbildungskurs als TKC hatte er im Oktober 2022 absolviert.

Der TKC, der die Bremsen des Wagens 14 in Bellinzona ausschaltete, ist seit 2006 in dieser Funktion tätig und gilt somit als erfahren. Der letzte Weiterbildungskurs als TKC hatte er im September 2021 absolviert.

4.3.2 Organisatorische Faktoren und Aufgaben

Nicht relevant.

4.4 Feedback- und Kontrollmechanismen

4.4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

4.4.1.1 Regelungen VPI – Instandhaltung der Radsätze

Der VPI-Leitfaden wird dann verbindlich, wenn er vom Wagenhalter als sein gültiges Instandhaltungsregelwerk in Kraft gesetzt wird.

In diesem Kapitel werden nur die wichtigsten Vorgaben des VPI-Instandhaltungsleitfadens erwähnt, die im Zusammenhang mit der Instandhaltung der Radsätze (VPI-04) stehen.

Die Instandhaltung der Radsätze (Profilüberarbeitung mit ZfP Prüfung) ist heute an das Intervall der Radsatzlageruntersuchung (660 000 km oder 8 Jahre) gekoppelt. Diese jahrelang entwickelte und etablierte Praxis wurde eingeführt, als die Güterwagen noch mit Graugussbremssohlen ausgerüstet waren. Bei der Einführung der LL-Bremssohlen (Kapitel 4.4.5.2) wurde diese Praxis beibehalten.

Die heutige Messmethode (Abbildung 70) erfasst die Eigenspannung nur in einem bestimmten Bereich des Radkranzes und liefert einen gemittelten Wert. Dieses Messsystem ist nicht in der Lage, eine erhöhte Eigenspannung an der Oberfläche des Rades zu detektieren. Somit ist mit der heutigen Messmethode nicht festzustellen, an welcher Stelle die Rissinitiierung infolge einer zu hohen Eigenspannung entsteht. Wie in diesem Bericht unter Kapitel 4.2.4 «Gutachten – Metallurgische Untersuchung der Radsätze» dargestellt wird, ist das Vorhandensein von Zugspannungen ein massgeblicher Faktor für die Rissentstehung auf der Lauffläche einer Radscheibe.

Im Weiteren haben sich die betrieblichen Bedingungen von Güterwagen verändert: Die Geschwindigkeit der Güterzüge wurde erhöht. Zudem wurden die Graugussbremssohlen durch Bremsklotzsohlen aus Verbundstoff ersetzt. Daher sind das Instandhaltungsintervall (660 000 km oder 8 Jahre) und die Methode der Eigenspannungsmessung, wie sie im Instandhaltungsleitfaden VPI-04 definiert wurde, nicht mehr zeitgemäss. Unter den heutigen Umständen besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass die kritische Rissentstehung und die lokal erhöhten Zugspannungen an der Radscheibenoberfläche in einem frühen Stadium nicht erkannt werden können.

4.4.2 Safety Management System

Das Safety Management System (SMS) eines EVU soll sicherstellen, dass die Organisation die Risiken, die sich aus ihren unternehmerischen Zielen und ihrem Handeln ergeben, sicher kontrolliert und alle geltenden Sicherheitsanforderungen erfüllt.

Das SMS verbindet die Richtlinien, Prozesse, Regeln und Anweisungen des Unternehmens zu einem Ganzen und sorgt dafür, dass das Sicherheitsniveau jederzeit aufrechterhalten wird.

Die SMS-Prozesse von SBBC für die Zugvorbereitung und Massnahmen bei Unregelmässigkeiten am Wagen werden im Kapitel 4.4.3 beschrieben und durch die SUST analysiert und beurteilt.

4.4.3 Prozesse

4.4.3.1 Zugvorbereitung Chiasso – Intervention in Bellinzona

4.4.3.1.1 Zugvorbereitung Chiasso

Die technische Untersuchung der 30 Wagen des Zuges 45016 fand im Bahnhof Chiasso statt.

Da der Zug 45016 aus fünf Wagengruppen formiert wurde, liegen auch fünf Protokolle vor (technische Kontrolle, Teilliste mit Unterschrift der TKC). Die Ergebnisse der technischen Kontrolle wurden im oberen Teil der Zugliste 45016 zusammengefasst. Die Ergebnisse der Bremsprobe wurden ebenfalls in diesem Dokument (Anlage 9, Abbildung 102) protokolliert. Alle Namen der TKC sind ebenfalls im Kopf der Liste eingetragen (in der Anlage 9 geschwärzt).

Die Qualität dieser Art der Dokumentation weist Schwachstellen auf. Mehrere Reportings von Teillisten auf einem anderen Dokument können zu Fehlern bei der Übertragung führen und machen eine Analyse und einen Nachweis schwierig.

4.4.3.1.2 Intervention in Bellinzona

Nach dem Halt des Zuges in Bellinzona wurden die Bremsen von Wagen 14 (Wagen 579-2) durch den aufgebotenen TKC ausgeschaltet. Die Achslagergehäuse wurden überprüft. Anzeichen von Überhitzungen oder Farbabblätterungen an den Radscheiben wurden keine festgestellt. Anschliessend wurde eine Bremsprobe durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Bremsen von Wagen 14 gelöst waren. Die Bremsrechnung des Zuges wurde angepasst. Um 12:07 Uhr verliess der Zug 45016 den Bahnhof Bellinzona. Um 12:15 Uhr fuhr der Zug an der ZKE-Kontrollanlage in Claro vorbei. Es wurden von keinem Wagen des Zuges die Alarm-Eingriffswerte HFO überschritten (Anlage 3, Abbildung 95). Auch beim Wagen 14 wurde keine erhöhte Temperatur detektiert; somit waren die Bremsen gelöst.

Der Wagen 14 wurde in Bellinzone gemäss Anlage 9 des AVV richtig bezettelt. Die Vorgaben, die im SMS von SBBC im Kapitel 5.6.2 «Transportdienstleistung erfüllen, Massnahmen bei Unregelmässigkeiten am Wagen» beschrieben sind, wurden eingehalten.

4.4.4 Aufsichtstätigkeit

Nicht relevant.

4.4.5 Genehmigungen, Bescheinigungen, Bewertungsberichte

4.4.5.1 Radsatztyp BA 390

Nicht relevant, da der betroffene Radsatztyp vor der Einführung des neuen Zulassungsprozesses schon in Betrieb und im Markt eingeführt war.

4.4.5.2 LL-Bremssohlen

In Rahmen von Lärmsanierungsmassnahmen bei Eisenbahnen wurden unter anderem bei Güterwagen die Graugussbremssohlen durch Bremsklotzsohlen aus Verbundstoff ersetzt.

Die folgenden Dokumente wurden durch die UIC erstellt, respektiv überarbeitet:

- *Die UIC-Codex 541-4, 4. Ausgabe, Dezember 2010 «Bremsen mit Bremsklotzsohlen aus Verbundstoff – Allgemeine Bedingungen für die Zertifizierung von Verbundstoffbremsklotzsohlen»,*
- *die Anlage M zum UIC-Merkblatt 541-4, «Für den internationalen Verkehr freigegebene Verbundstoffbremsklotzsohlen»,*
- *die Anlage M3 zum UIC-Merkblatt 541-4 (10. Ausgabe, August 2013) – Verbundstoffbremsklotzsohlen mit niedrigem Reibwertniveau (LL).*

In der Anlage M3 wird die Tauschbarkeit von Graugussbremssohlen durch LL-Bremssohlen (IB 116*) als «vollständig freigegebenes Produkt» aufgeführt.

4.4.6 Entgleisungsdetektor

Der entgleiste Wagen 11 (Wagen 466-2) war nicht mit einem Entgleisungsdetektor ausgerüstet.

Das Thema wird hier trotzdem behandelt, da Entgleisungsdetektoren einen Einfluss auf das Schadenausmass an der Infrastruktur haben können.

Entgleisungsdetektoren können am Wagenkasten angebracht werden. Die bis heute verwendeten mechanisch- / pneumatischen Systeme reagieren auf eine Vertikalbeschleunigung, die durch eine entgleiste Achse generiert wird, wenn diese auf Schwellen aufschlägt. Beim Ansprechen eines Detektors wird die Hauptluftleitung entleert und so der Zug zum Stillstand gebracht.

Ein Radscheibenbruch wird von einem heutigen Entgleisungsdetektor nicht direkt erfasst. Erst wenn infolge eines Radscheibenbruchs eine Achse die Spurführung verliert, entgleist und auf den Schwellen aufschlägt, treten vertikale Beschleunigungen auf, die dann zum Ansprechen des Entgleisungsdetektors führen können.

Bei vorliegendem Ereignis verlor die Achse 1 die Spurführung kurz nach dem Radscheibenbruch. Das noch intakte linke Rad geriet kurz in Kontakt mit Bi-Block Betonschwellen. Durch den Aufschlag wurde die Achse um rund 45° zur Normalstellung nach hinten verschoben. Danach lief das linke Rad kurz auf dem Betonboden und hinterliess nur eine schmale Spur, während das gebrochene rechte Rad in der Luft hing (Abbildung 42).

Zwischen km 46 und km 41 touchierte das linke Rad den Betonboden nicht (Abbildung 46). Somit traten in dieser Phase keine durch das Ereignis bedingten Vertikalbeschleunigungen auf. Die Achse war noch mit dem Blattfederpaket in Kontakt. Auf diesem Streckenabschnitt schlugen ebenfalls ab und zu die Bremssohlenhalter auf den Bi-Block Betonschwellen auf. Die beiden Bremsdreiecke (Abbildung 6), die noch lose in den Halteseilen hingen, konnten kaum eine genügend grosse Vertikalbeschleunigung erzeugen, um diese auch auf den Wagenkasten und somit auch auf einen Entgleisungsdetektor zu übertragen.

Es ist somit nicht gesichert, dass ein kurzer Kontakt mit Betonschwellen (Abbildung 41) für das Auslösen eines Entgleisungsdetektors ausgereicht hätte.

Wie ebenfalls aus dem Bild des Videos (Abbildung 53) nach der Zugdurchfahrt in der MFS Faido zu entnehmen ist, wies die Infrastruktur in diesem Bereich nur leichte Spuren am Betonboden auf.

Nur im Bereich der Spurwechselstelle kurz vor der Weiche W387, wo massive Schlagspuren auf den Monoblockschwellen von der entgleisten Achse hinterlassen wurden (Abbildung 45), hätte ein Entgleisungsdetektor wohl angesprochen.

Allerdings hätte zu diesem Zeitpunkt ein Ansprechen eines Entgleisungsdetektors das Schadensausmass im Bereich der MFS Faido nicht reduziert. Fast gleichzeitig wurde ohnehin die Hauptluftleitung durch den Entzug der «Movement Authority» durch das RBC infolge des Verlustes der Weichenkontrolle entleert.

4.5 Frühere Ereignisse ähnlicher Art – Radscheibenbrüche

Der Schienengüterverkehr in Europa funktioniert grenzüberschreitend. Die Grundvoraussetzung dazu ist die Gewährleistung der Interoperabilität der Güterwagen.

In den Jahren 2016 und 2017 traten in Italien und Belgien bei Güterwagen mit Rädern der Typen BA 314 und BA 004 mehrere Brüche und Risse am Radkranz sowie im Radsteg auf.

Eine Task Force "Urgent Procedure JNS Broken wheels¹⁶" wurde einberufen, um diese Fälle zu analysieren.

Am 28. Juli 2017 hat die Task Force in ihrem Schlussbericht bezüglich der beiden betroffenen Radtypen kurz- und langfristige Massnahmen zur Risikobegrenzung beim Betrieb und bei der Instandhaltung der Radsätze definiert und Vorschläge für Änderungen in Normen und Verordnungen unterbreitet.

Bezüglich der Risse im Radkranz des Radtyps BA 004 wird im Schlussbericht erwähnt, dass in einigen Anwendungen die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung thermisch initiiert Defekte höher ist.

Schliesslich hat die Task Force als Massnahme zur Risikobegrenzung im Betrieb für die beiden Radtypen unter anderem der Minstdurchmesser auf 880 mm begrenzt.

Die Radform BA 390 (Abbildung 64) ist vergleichbar mit dem Typ BA 004.

4.6 JNS Broken Wheels Gotthard

Gestützt auf den Zwischenbericht der SUST vom 22. September 2023 reichte das BAV am 17. Oktober 2023 bei der ERA einen Antrag für ein JNS Verfahren ein. Am 24. Oktober 2023 wurde die JNS Task Force "Accident Gotthard base tunnel – broken wheels" ins Leben gerufen, um diesen Fall zu analysieren. Die JNS-Berichte sind auf der ERA-Homepage publiziert¹⁷.

74 Fälle (Broken wheel – visuel crack detection or cracks found by NDT Testing), die verschiedene Radtypen betreffen, wurden von der JNS Arbeitsgruppe analysiert.

Aus diesen 74 Fällen hat die Task Force zehn Fälle identifiziert, die zu einem Radscheibenbruch geführt haben oder bei denen mit einer visuellen Kontrolle Räder mit Rissen entdeckt wurden. Bei allen zehn Fällen wiesen die Radsätze einen Raddurchmesser gleich oder kleiner als 880 mm auf.

¹⁶ JNS - Joint Network Secretariat: procedures aim at EU-wide harmonisations of any action taken after any issue, e.g. accidents or incidents in railways in the EU.

¹⁷ Link to all JNS Procedure: [Joint Network Secretariat \(JNS\) | European Union Agency for Railways \(europa.eu\)](https://www.eurail.eu/en/jns/)

4.7 Literatur Review

4.7.1 Studie aus Schweden – thermomechanisches Verhalten von laufflächengebremsten Rädern

Diese Studie über das thermomechanische Verhalten von laufflächengebremsten Rädern, Materialmodellierung und experimentelle Untersuchungen wurde in der Abteilung für angewandte Mechanik der Chalmers University of Technology im Zeitraum 2019–2022 durchgeführt¹⁸.

Sie ist Teil des Projekts SD11 "Tread Braking - Capacity, Wear and Life" in Rahmen des Swedish National Centre of Excellence in Railway Mechanics.

Nachfolgend sind kursiv die wichtigsten Auszüge der Studie aufgeführt (Übersetzung der englischen Fassung):

Einige Vorfälle, bei denen Räder durch thermomechanische Einflüsse beschädigt oder gebrochen wurden, werden vom JNS auf der offiziellen Website der Europäischen Union veröffentlicht. Im Jahr 2016 wurden gerissene ungebrochene Räder der Typen BA314/ZDB29 und BA004 untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Ausfälle zumindest teilweise durch thermische Überlastung verursacht wurden. Solche Vorfälle haben zu neuen Vorschlägen für die Radnutzung und für Änderungen von Normen und Vorschriften, insbesondere hinsichtlich der thermomechanischen Vordimensionierung und Anforderungen an die Radkonstruktion geführt.

Laufflächenbremsen, auch bekannt als Klotzbremsen, sind eine Art von Reibungsbremsen, die häufig in der Eisenbahnindustrie Verwendung finden. Moderne Verbundstoffbremsklötze, die zur Senkung der Geräuschemissionen ausgelegt sind, führen jedoch zu einer erhöhten thermischen Belastung des Rades, da diese Klötze im Vergleich zu älteren Graugussklötzen geringere Mengen an Reibungswärme aufnehmen und speichern können. Langfristiges Schleppbremsen kann die Temperatur der Radkranz um mehrere hundert Grad erhöhen. Nach dem Abkühlen können die daraus resultierenden Eigenspannungen in der Radkranz zu einem Radbruch führen. Auch führen die hohen Temperaturen zu einer dauerhaften Zersetzung des perlitischen Gefüges.

Untersuchung auf dem Prüfstand

Hier wurde die Temperaturverteilung und -entwicklung auf einer Radlauffläche während 30 kW- und 50 kW-Bremsszenarien mit Hilfe eines neuartigen Bremsprüfstands untersucht. Eine Thermografiekamera wurde eingesetzt, um Bilder von der Lauffläche und der Radkranz während des Bremsvorgangs aufzunehmen und um heiße Stellen zu ermitteln. Ergänzt durch gleitende Thermolemente für die durchschnittlichen Laufflächentemperaturen. Die Versuche zeigen, dass die Temperaturverteilung ungleichmässig erfolgt, mit auffälligen und fast stationären Hot Spots um den Radumfang herum.

Thermische Modellierung

Simulationen unter Verwendung des thermomechanisch kalibrierten Materialmodells zeigen, dass es einen messbaren Anstieg der durchschnittlichen und maximalen Eigenspannungen in der Nähe der Hot Spots gibt. Das Ausmass der Spannungen steigt mit höherer Hot-Spot-Temperatur zunehmend, was darauf

¹⁸ Chalmers University of Technology, Material modelling and experimental investigations, Thermomechanical behaviour of tread braked wheels, Eric Voortman Landström (2022).

hindeutet, dass Analysen, die nur Durchschnittstemperaturen annehmen, die induzierte Schädigung unterschätzen.

4.7.2 Wheel Tread Damage Guide T 963¹⁹

Das Rail Safety and Standards Board (RSSB-UK ist die unabhängige Sicherheits- Normungs- und Forschungseinrichtung für den britischen Eisenbahnsektor).

The RSSB research project T963 [Verbesserung der Lebensdauer von Radsätzen durch besseres Verständnis der Ursachen von Radschäden] has investigated the links between wheelset life and train configuration, route, maintenance practices and the use of condition monitoring.

Chapter: *Influence in running - stress in the wheel*

Sustained heat input from heavy tread braking can cause relaxation and reversal of the protective residual stresses, which can lead to sudden catastrophic failure of the wheel by cracking. Localised high heat inputs during wheel spin or slide events followed by rapid cooling can cause the steel to transform from pearlite to a hard brittle structure called martensite. This often leads to formation of cavities and cracks.

4.7.3 Zusammenfassung Literatur Review

Wie die Studie aus Schweden darlegt (Kapitel 4.7.1), führen Verbundstoffbremssohlen zu einer erhöhten thermischen Belastung des Rades. Die Temperaturverteilung auf der Lauffläche ist ungleichmässig, mit auffälligen und faststationären Hot Spots um den Radumfang herum.

Das RSSB erwähnt in seinem Projekt T963 «Verbesserung der Lebensdauer von Radsätzen durch besseres Verständnis der Ursachen von Radschäden», dass anhaltende Wärmeeinwirkung durch starkes Bremsen zu einer Umkehrung der Druckeigenspannung zu Zugeigenspannung führen kann, was zu einem plötzlichen katastrophalen Versagen des Rades durch Rissbildung führen kann.

Der am 28. Juli 2017 publizierte Schlussbericht der die JNS Task Force "Broken wheels" erwähnt: «... Für Risse im Radkranz des Radtyps BA 004 in einigen Anwendungen die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung thermisch initiierten Defekte höher ist.»

Die hier aufgeführten Ergebnisse bestätigen die Schlussfolgerungen der metallurgischen Untersuchung, dass eine thermische Überlastung der Lauffläche zur Entstehung der Risse führt. Senkrechte Risse, die sich aus der Lauffläche als Ermüdungsrisse weiterentwickeln, sind schwerwiegende Fehler, die mit der Zeit zu Radscheibenbrüchen führen können, wenn sie nicht in einem frühen Stadium entdeckt und behandelt werden.

¹⁹ [Improving wheelset life by better understanding the causes of wheel damage \(T963\)](#)

5 Schlussfolgerungen

5.1 Zusammenfassung

5.1.1 Eisenbahnverkehrsunternehmen

5.1.1.1 Zugvorbereitung in Chiasso und Intervention in Bellinzona

- Die technische Untersuchung der 30 Wagen des Zuges 45016 fand im Bahnhof Chiasso statt.
- Die Ergebnisse der technischen Kontrollen sowie die Ergebnisse der Bremsprobe wurden in die Zugliste 45016 übertragen. Es wurden keine Unregelmässigkeiten protokolliert.
- Der Wagen 14 (Wagen 579-2) wurde in Bellinzona untersucht und die Bremsen ausgeschaltet.
- Als Folge der Ausschaltung der Bremsen des Wagens 14 wurde die Bremsrechnung des Zuges 45016 neu erstellt.

5.1.2 Infrastruktur

5.1.2.1 Betriebsführung

Der Zug 45016 verkehrte durch den Gotthard-Basistunnel (Gleis 7000) im Modus «Full Supervision» (FS) mit «Movement Authority» (MA) mit einer erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 95 km/h.

5.1.2.2 Zugkontrolleinrichtungen

- Bei der Durchfahrt des Zuges 45016 über die Zugkontrolleinrichtung in Claro (kurz vor dem Südportal des GBT) wurden keine Unregelmässigkeiten durch die HFO- und RLC-Anlagen detektiert.
- Es gibt keine Anhaltspunkte für eine Fehlfunktion an den Zugkontrolleinrichtungen.

5.1.2.3 Sicherungsanlagen

- Die betroffenen Weichen W387 und W386 der Multifunktionsstelle Faido meldeten einen Endlageverlust.
- Das RBC entzog unmittelbar nach dem Endlageverlust der Weichen die «Movement Authority» des Zuges, was zu der Auslösung einer Zwangsbremmung auf der bedienten Lokomotive führte.
- Eine Achszählerstörung nach der Durchfahrt eines Zuges hatte keinen Einfluss auf die «Movement Authority» dieses Zuges.
- Die Sicherungsanlagen haben ordnungsgemäss funktioniert.

5.1.2.3.1 Gleisanlage

- Im Tunnel bei km 47.30 wurde das erste Radfragment von Radsatz 1, Wagen 11 (Wagen 466-2) gefunden. Das Fragment schlug auf die Bi-Block Betonschwellen auf und blieb danach auf dem Bankett liegen.
- Zwischen km 47.10 und 46.70 wurden sechs weitere Radfragmente gefunden.

- Als die Achse ihre Führung verlor (km 46.7), schlug das linke Rad kurz auf den Bi-Block Betonschwellen auf.
- Kurz darauf hinterliess der Spurkranz des linken entgleisten Rades bei km 46.60 Schleifspuren auf dem Betonboden des Tunnels.
- Zwischen km 46 und km 41 berührte das linke Rad der entgleisten Achse für rund 5 km den Betonboden nicht.
- Als Folge der Entgleisung des Radsatzes schlugen die Bremssohlenhalter zwischen km 46 und 41 mehrmals auf den Betonschwellen auf.
- Mehrere Bremssohlensplitter wurden auf dem Streckenabschnitt zwischen km 46 und 41 am Boden und auf den seitlichen Banketten gefunden.
- Das entgleiste linke Rad schlug in der Multifunktionsstelle Faido gegen die erste Monoblock-Betonschwelle der Weiche W387.
- Das Spurwechsellor wurde durch den Wagen 14-2 durchbrochen.

5.1.2.3.2 Hydrostarweichen

- Die Antriebe und Verschlüsse der Hydrostarweichen W386 und W387 wurden durch die entgleiste Achse zerstört.
- Die Weichenzungen und das bewegliche Herzstück der Weiche W386 gerieten dadurch in undefinierte Stellungen und ein Radlenker wurde teilweise zerstört. Dies führte dazu, dass kein bestimmter Fahrweg mehr bestand und die Spurführung verloren ging.

5.1.3 Rollmaterial

5.1.3.1 Lokomotiven und Wagen 1 bis 10

Die Kontrollen der zwei Lokomotiven und der zehn ersten Wagen des Zuges ergaben keine Beanstandungen.

5.1.3.2 Wagen 11

5.1.3.2.1 Radsatz 1 (81987)

- Die letzte Instandhaltung IS2 des Radsatzes 1 im Oktober 2017 wurde gemäss VPI-Leitfaden durchgeführt und protokolliert.
- Der Raddurchmesser lag nach der IS2 bei 862 mm.
- Das Radprofil (Spurkranzmasse Sh, Sd, qR) war nach ca. 173 000 km Laufleistung nach der IS2 weitgehend neuwertig.
- Der Radscheibenbruch des rechten Rades des ersten Radsatzes von Wagen 11 (Wagen 466-2) ist nicht auf einen Mangel an der Durchführung der Instandhaltungsarbeiten am Radsatz zurückzuführen.

Gebrochenes Rad

- Neben Druckeigenspannungen (–250 MPa) sind an der Oberfläche auch hohe Zugeigenspannungen (+370 MPa) nachgewiesen worden.
- Die metallografischen Untersuchungen zeigten, dass in unmittelbarer Nähe der Messposition der Zugeigenspannungen Risse vorhanden sind.

- Neben der Position der Eigenspannungsmessung wies das Rad einen senkrechten Riss von ca. 2 mm Tiefe auf (Abbildung 90).

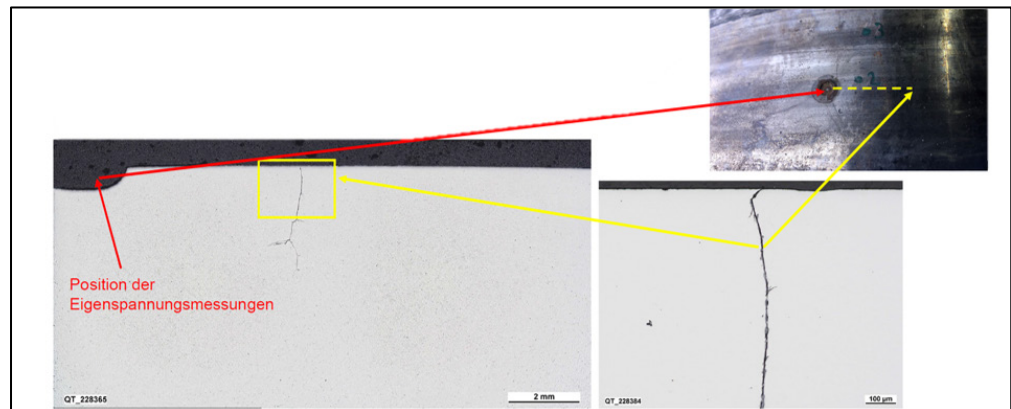


Abbildung 90: Position der Eigenspannungsmessung und Position des Risses. Der Riss verläuft senkrecht zur Obefläche.

- Mehrere Bruchausgänge sind im Bereich der Lauffläche erkennbar. Zahlreiche weitere Anrisse sind auf der Lauffläche vorhanden (Abbildung 74).
- Im Bereich der Rissinitiierung sind keine mechanischen Beschädigungen (Rollkontaktermüdung) sowie keine Einschlüsse im Material sichtbar (Abbildung 75).

Intaktes Rad

Die an der Lauffläche nachgewiesenen Zugeigenspannungen liegen oberhalb der für die Auslegung herangezogenen Dauerfestigkeit des Stahls mit der Güte ER7. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Eigenspannungen ab.

5.1.3.2.2 Radsatz 3

- Alle Spurkranzmasse (Sh, Sd, qR) entsprachen weitgehend den Neuwerten.
- Grössere Ausbröckelungen sind nicht vorhanden.
- Mehrere Risse, ausgehend von der Lauffläche, sind vorhanden. Der Rissverlauf (Abbildung 91), mit zunehmender Tiefe ungefähr senkrecht zur Oberfläche, ist analog dem des gebrochenen Rades (Abbildung 75).
- Im Bereich der Rissinitiierungen sind keine mechanischen Beschädigungen (Rollkontaktermüdung) sowie keine Einschlüsse im Material sichtbar.

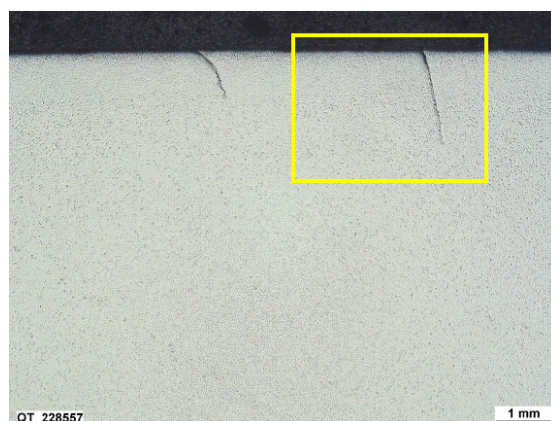


Abbildung 91: Lichtmikroskopischen Aufnahme der Lauffläche.

- Die an der Lauffläche vorhandenen hohen Eigenspannungen werden als massgeblicher Faktor für die Rissentstehung angesehen.
- Das Vorhandensein von mehreren, gleichartigen Bruchflächen und von zahlreichen weiteren, von der Lauffläche ausgehenden senkrechten Risse legt nahe, dass es sich um ein systematisches Phänomen handelt und nicht auf einzelne Materialdefekte zurückzuführen ist.

5.1.3.2.3 Radsätze 2 und 4

- Beide Radsätze wiesen keine grossen Beschädigungen auf.
- Alle Spurkranzmasse (Sh, Sd, qR) entsprachen weitgehend den Neuwerten.
- Grössere Ausbröckelungen sind nicht vorhanden.
- Nach Reinigung und mit einer guten Beleuchtung sind Risse an der Oberfläche der Achse 4 (417326) visuell erkennbar.

5.1.3.2.4 Bremsen von Wagen 11

- Eine Aussage über den Zustand der Bremssohlen des Radsatzes 1 mit der gebrochenen Radscheibe kann nicht gemacht werden, da diese komplett zerstört sind.
- Auf den noch vorhandenen LL-Bremssohlen sind keine Spuren von Überhitzung erkennbar.
- Beide Bremsdreiecke von Radsatz 1 wurden durch die zerbrochene und verschobene Radscheibe aus ihren Halterungen gerissen und nur durch die Notseile unter dem Wagen gehalten.

5.1.3.3 Wagen 14

- Die vier Radsätze sind für eine Achslast von 25 t ausgelegt. Alle Spurkranzmasse (Sh, Sd, qR) entsprachen weitgehend den Neuwerten.
- Trotz einer kurzen Fahrt mit Festbremsen zwischen dem Ceneri Tunnel und dem Bahnhof Bellinzona wiesen keine der Radscheiben Farbabblätterungen auf. Die Räder wiesen im Vergleich zu den Messungen der letzten Instandhaltung IS2 keine erhöhten Eigenspannungswerte auf.
- Die Bremsen wurden im Bahnhof Bellinzona ausgeschaltet.
- Die ausgeschalteten Bremsen dieses Wagens hatten keinen Einfluss auf den Laufweg der zweiten Achse in Richtung des Verbindungsgleises.

5.1.3.4 Wagen 15 bis 30

- Die Schäden an den Wagen 15 bis 26 sind eine Folge der Entgleisung.
- Die vier letzten Wagen des Zuges (Wagen 27–30) sind nicht entgleist und blieben unbeschädigt.

5.1.3.5 ECM, Instandhaltungsfrist

- Es liegen keine Hinweise auf Mängel in der Instandhaltungsausführung gemäss den Vorgaben des VPI-Leidfadens vor, die den Unfallhergang hätten beeinflussen oder den Unfall hätten verursachen können.

- Das maximale Intervall (660 000 km oder 8 Jahre) zwischen der letzten und der nächsten IS2 des Radsatzes 1 (81987) wurde nicht überschritten.

5.1.4 Rissinitiierung – Ermüdungsrisse – Radscheibenbruch

- Die Zugeigenspannungen an der Lauffläche können durch plastische Verformungen, inhomogene Gefüge oder durch thermische Einflüsse entstehen. Bei allen untersuchten intakten Rädern waren weder plastische Verformungen, die durch Rollbeanspruchungen verursacht werden noch inhomogene Gefüge vorhanden.
- Somit bleibt als äusserer Faktor nur, dass die Zugeigenspannungen an der Radoberfläche durch thermische Überbeanspruchung entstehen.
- Thermische Überbeanspruchungen an der Radoberfläche entstehen während der Fahrt, wenn die Bremssohlen am Rad anliegen, dies als Folge einer Festbremse oder wenn sich die Bremsen nicht ganz gelöst haben.
- Obwohl alle drei intakten Radsätze des Wagens 11 einen unterschiedlichen Lebenslauf in Bezug auf die Laufleistung (zurückgelegte Kilometer) sowie unterschiedliche Produktionsjahre der Räder aufweisen, ergab die metallurgische Untersuchung, dass alle Räder die gleichen Rissmerkmale aufwiesen.
- In Anbetracht der obigen Ausführungen stützen die Beweise die Schlussfolgerung der metallurgischen Untersuchung, dass eine thermische Überlastung der Lauffläche zur Entstehung der Risse geführt hat.
- Senkrechte Risse, die sich aus der Lauffläche als Ermüdungsrisse weiterentwickeln, sind schwerwiegende Fehler, die mit der Zeit zu Radscheibenbrüchen führen können, wenn sie nicht in einem frühen Stadium entdeckt und behandelt werden.

5.1.5 Safety Management System SBB Cargo AG, Transportdienstleistung erfüllen

Die Ergebnisse der Kontrolle bei der Zugvorbereitung in Chiasso wurden auf verschiedenen Dokumenten protokolliert und dann in den oberen Teil der Zugliste 45016 übertragen (Abbildung 102). Die Nachweisführung mit einem zusammengefassten, handschriftlichen Datenreporting ist fehleranfällig.

5.2 Seit dem Ereignis getroffene Massnahmen

Die der SUST bekannten Massnahmen werden im Folgenden kommentarlos aufgeführt.

Die JNS Task Force "Accident Gotthard base tunnel – broken wheels", die am 24. Oktober 2023 gegründet wurde, kommt in ihrem Abschlussbericht vom 11. Juli 2024 unter anderem zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Radform BA 390 ist vergleichbar mit dem Typ BA 004. Vier zusätzliche Radtypen (Db004-sa, Ri 025, R32, BA 304) wurden als vergleichbar identifiziert. Die Massnahmen zur Risikobegrenzung im Betrieb (minimaler Rad-durchmesser 880 mm), die bei den ersten "JNS Broken wheels" am 28. Juli 2017 publiziert wurden, gelten ebenfalls für diese Radtypen.
- Die JNS schlägt vor, dass die folgenden, verbesserten Massnahmen zur Risikobeherrschung in den Allgemeinen Vertrag für die Nutzung von Güterwagen (AVV) 2024 aufzunehmen sind:
 - Anzeichen einer thermischen Überbeanspruchung: Anwendung der Definition: grössere Farbabblätterung mit "50 mm oder mehr" zu definieren;
 - Massnahmen nach Erkennung einer thermischen Überbeanspruchung durch gleisseitige Detektionssysteme sind im AVV 2024 zu integrieren.

6 Sicherheitsempfehlungen

Gestützt auf Art. 26 der Richtlinie (EU) 2016/798 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über Eisenbahnsicherheit werden die Empfehlungen an die nationale Sicherheitsbehörde und, sofern es die Art der Empfehlung erfordert, an die Agentur und andere Stellen oder Behörden in dem betreffenden Mitgliedstaat oder an andere Mitgliedstaaten gerichtet.

Die schweizerische Gesetzgebung sieht in der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen vom 17. Dezember 2014 (VSZV), Stand am 1. Januar 2025 (SR 742.161), bezüglich Sicherheitsempfehlungen folgende Regelung vor:

Art. 48 Sicherheitsempfehlungen

¹ Die SUST richtet die Sicherheitsempfehlungen an die für die Aufsicht zuständige Stelle. Ist die Aufsichtsbehörde eine Bundesbehörde, informiert sie auch das zuständige Departement. Bei dringlichen Sicherheitsproblemen informiert sie umgehend das zuständige Departement.

^{1bis} Sie richtet Sicherheitsempfehlungen an ausländische Behörden, wenn dies nach internationalen Abkommen vorgesehen ist.

² Die Adressaten der Sicherheitsempfehlungen unterrichten die SUST periodisch über die Umsetzung der Empfehlungen oder über die Gründe, weshalb sie auf Massnahmen verzichten.

^{2bis} Ist der Adressat eine Bundesbehörde, unterrichtet diese auch das zuständige Departement.

^{2ter} Die SUST nimmt zu den Umsetzungsberichten der Bundesämter Stellung. Sie kann zu den Umsetzungsberichten der Bundesbehörde zuhanden des zuständigen Departements Stellung nehmen.

³ Das zuständige Departement kann Aufträge zur Umsetzung von Empfehlungen an das zuständige Bundesamt richten.

Gleichwohl sind jede Stelle, jeder Betrieb und jede Einzelperson eingeladen, im Sinne der ausgesprochenen Sicherheitsempfehlungen eine Verbesserung der Sicherheit im öffentlichen Verkehr anzustreben.

Die SUST veröffentlicht die Antworten unter www.sust.admin.ch und erlaubt so einen Überblick über den aktuellen Stand der Umsetzung der entsprechenden Sicherheitsempfehlung.

6.1 Radsätze mit LL-Bremssohlen, Mindestdurchmesser im Betrieb

6.1.1 Sicherheitsdefizit

Der Schlussbericht der Task Force "JNS Broken wheels" vom 28. Juli 2017 erwähnt, dass für Risse im Radkranz des Radtyps BA 004 in einigen Anwendungen die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung thermisch initiiert Defekte höher ist. Kurz- und langfristige Massnahmen zur Risikobegrenzung beim Betrieb und bei der Instandhaltung der Radsätze wurden definiert sowie Vorschläge für Änderungen in Normen und Verordnungen unterbreitet. Als Massnahmen zur Risikobegrenzung im Betrieb wurde unter anderem für die Radsatztypen BA 314 und BA 004 der Mindestdurchmesser auf 880 mm festgelegt.

Die JNS Task Force "Accident Gotthard base tunnel – broken wheels" kommt in ihrem Abschlussbericht vom 11. Juli 2024 unter anderem zu folgender Schlussfolgerung:

- Der Radsatztyp BA 390 ist vergleichbar mit dem Radsatztyp BA 004. Vier zusätzliche Radsatztypen (Db004-sa, Ri 025, R32, BA 304) wurden als vergleichbar identifiziert. Die Massnahmen zur Risikobegrenzung im Betrieb (minimaler Raddurchmesser 880 mm), die bei der ersten "JNS Broken wheels" am 28. Juli 2017 publizierte wurden, gelten ebenfalls für diese Radsatztypen.
- Die Analyse von 74 Fällen (Broken wheel - visual crack detection or cracks founded by NDT Testing) von verschiedenen Radsatztypen zeigt, dass zehn Fälle identifiziert wurden, die zu einem Radscheibenbruch geführt haben oder bei denen durch eine visuelle Kontrolle Räder mit Rissen entdeckt wurden. Bei allen zehn Fällen wiesen die Radsätze einen Raddurchmesser gleich oder kleiner als 880 mm auf.

Das gebrochene Rad, das Gegenstand dieses Berichtes ist, wies nach der letzten Reprofilierung einen Raddurchmesser von 862 mm auf.

6.1.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 205

Die SUST empfiehlt der Eisenbahnagentur der Europäischen Union (ERA), die ECM aufzufordern, die Massnahmen zur Risikobegrenzung im Betrieb, die durch die JNS Task Force vorgeschlagen wurden, auf alle Radsatztypen, die mit Verbundstoffbremssohlen gebremst werden, zu erweitern.

6.2 Ultraschallprüfung Radscheibe, VPI-Vorgaben

6.2.1 Sicherheitsdefizit

Heute definieren die VPI-Vorgaben folgende Kriterien für die Instandhaltung der Radsätze:

Nach Ablauf der maximalen Laufleistung der entsprechenden Radsatzgruppe (in diesem Fall 660 000 km), spätestens jedoch nach Überschreitung der maximalen Einbaudauer der entsprechenden Radsatzgruppe (8 Jahre) sind die Radsätze auszubauen und einer Radsatzinstandhaltung zuzuführen.

Seit der letzten IS2 hat der Radsatz mit der gebrochenen Radscheibe ca. 173 000 km zurückgelegt. Die gebrochene Radscheibe wies keine Anzeichen von Überhitzungen oder Farbabblätterungen auf. Trotzdem dürften, wie die Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung zeigen, die an der Lauffläche vorhandenen Zugspannungen die Rissentstehung deutlich begünstigt resp. erst ermöglicht haben. Durch zyklische Belastungen getrieben kommt es immer dann zu Rissfortschritten, wenn Zugspannungen im Bereich des Risses vorliegen. Die an der Lauffläche vorhandenen hohen Zugspannungen werden als massgeblicher Faktor für die Rissentstehung angesehen. Die vergleichbare Untersuchung der Eigenstressen mittels Ultraschall (dieses Verfahren liefert nur einen lokalen mittleren Wert der Eigenstressen im Radkranz) und Röntgenbeugung zeigte auf, dass die während der Instandhaltung durchgeführten Ultraschallmessungen nur bedingt eine Aussage zum Eigenstressenzustand direkt an der Lauffläche ermöglichen. Der für die Risseinleitung massgebliche Bereich an der Lauffläche kann somit nicht ausreichend erfasst werden.

Die VPI-04 schreibt vor, dass im Rahmen der Instandsetzung von Radsätzen (IS1 und IS2) immer eine Ultraschallprüfung der Radkränze bzw. Messung von Eigenstressen mit Ultraschall durchzuführen ist. Instandsetzung IS1 und IS2 sind nur

im ausgebauten Zustand möglich. Diese jahrelang entwickelte und etablierte Praxis wurde eingeführt, als die Güterwagen noch mit Graugussbremssohlen gebremst wurden. Heute sehen die betrieblichen Bedingungen von Güterwagen anders aus. Die Geschwindigkeit der Güterzüge wurde erhöht. Die Graugussbremssohlen wurden durch die Bremsklotzsohlen aus Verbundstoffen ersetzt. Der Einsatz von LL-Bremssohlen führt jedoch zu einer erhöhten thermischen Belastung des Rades. Dieser Umstand führte nicht zu einer Anpassung der Instandhaltungsvorgaben. Die Prüfungen der Radsätze nach den heutigen Vorgaben für die Instandhaltung sind nicht in der Lage, die oben erwähnten sicherheitsrelevanten Symptome- die kritische Rissentstehung durch zu hohe Eigenspannungen an der Oberfläche einer Radscheibe - in einem früheren Stadium zu erkennen.

6.2.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 206

Die SUST empfiehlt der Eisenbahnagentur der Europäischen Union (ERA), die ECM aufzufordern, die Kriterien der Instandhaltungsvorgaben für Radsätze, die mit Verbundstoffbremssohlen gebremst werden, betreffend Intervall und Methodik anzupassen.

6.3 Einfluss von Verbundstoffbremssohlen auf die thermischen Beanspruchungen der Räder

6.3.1 Sicherheitsdefizit

Thermische Überbeanspruchungen an der Radoberfläche entstehen während der Fahrt, wenn die Bremssohlen am Rad anliegen, dies als Folge einer Festbremse oder wenn sich die Bremsen nicht ganz gelöst haben.

Der am 28. Juli 2017 publizierte Schlussbericht der JNS Task Force "Broken wheels" erwähnt, dass für Risse am Radkranz des Radsatzes BA 004 in einigen Anwendungen die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung thermisch initiiertter Defekte höher ist.

Wie die im Jahr 2021 publizierte Studie aus Schweden darlegt, führen Verbundstoffbremssohlen zu einer erhöhten thermischen Belastung des Rades. Die Temperaturverteilung auf der Lauffläche ist ungleichmässig, mit auffälligen und Hot Spots um den Radumfang herum.

Die unabhängige Sicherheits-, Normungs- und Forschungseinrichtung für den britischen Eisenbahnsektor (RSSB) hat in seinem Projekt T963 «Verbesserung der Lebensdauer von Radsätzen durch besseres Verständnis der Ursachen von Radschäden» aufgezeigt, dass anhaltende Wärmeeinwirkung durch starkes Bremsen zu einer Umkehrung der Druckeigenspannung zu Zugeigenspannung führen kann, was zu einem plötzlichen katastrophalen Versagen des Rades durch Rissbildung führen kann.

Die Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung zeigen, dass eine thermische Überlastung der Lauffläche zur Entstehung der Risse führte. Senkrechte Risse, die sich von der Lauffläche als Ermüdungsrisse weiterentwickeln, sind schwerwiegende Fehler, die mit der Zeit zu Radscheibenbrüchen führen können, wenn sie nicht in einem früheren Stadium entdeckt und behandelt werden. Bei der gebrochenen Radscheibe wurden weder am Anstrich im Bereich des Stegs noch unterhalb des Radkranzes Anzeichen von Überhitzung gefunden. Trotzdem hat die thermische Überbeanspruchung das Entstehen von Zugeigenspannungen gefördert.

Wie die Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung zeigen, dürften die an der Lauffläche vorhandenen Zugeigenspannungen die Rissentstehung deutlich begünstigt resp. erst ermöglicht haben.

Die Eigenschaften von Radsätzen, Rädern und Bremsklötzen sind Bestandteil der technischen Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem „Fahrzeuge-Güterwagen“²⁰.

6.3.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 207

Die SUST empfiehlt der Eisenbahnagentur der Europäischen Union (ERA), eine Studie über den Einfluss von Verbundstoffbremssohlen auf die thermischen Beanspruchungen der Räder in Auftrag zu geben.

6.4 Hydrostarweichen

6.4.1 Sicherheitsdefizit

Die Hydrostarweichen verfügen über einen hydraulischen Antrieb, der auf hydraulischer Basis die Umstellkräfte zu allen Spitzen- sowie den Mittenverschlüssen weiterleitet. Im Aufbaukonzept dieses Weichentyps befinden sich die Verschlüsse sowie die Zungenverbindungsstange, die als Rückfallebene für die Spitzenverschlüsse dienen, über der Schwellenoberkante.

Wenn ein herabhängendes Teil eines Wagens oder einer entgleisten Achse unter der Schienenoberkante hängt, besteht das Risiko, dass dieses Teil mit dem Spitzenverschluss oder der Zungenverbindungsstange in Kontakt kommen und diese Komponenten beschädigen oder gar abreißen kann.

In der Folge können sich die nicht mehr verriegelten Weichenzungen bewegen, wenn sie durch vorbeifahrende Züge erschüttert werden. Unverschlossene Weichen können zu Entgleisungen führen.

6.4.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 208

Die SUST empfiehlt dem Bundesamt für Verkehr (BAV), die Infrastrukturbetreiberinnen, die auf ihrem Netz Weichen mit oberhalb der Schwellenoberkante liegenden Verschlussvorrichtungen in Betrieb haben oder planen, solche einzusetzen, das Risiko einer mechanischen Beschädigung der oberhalb der Schwellenoberkante liegenden Vorrichtungen zu bewerten und gegebenenfalls zu reduzieren.

²⁰ Amtsblatt der Europäischen Union, Verordnung (EU) Nr. 321/2013

7 Sicherheitshinweis

Als Reaktion auf während der Untersuchung festgestellte Sicherheitsdefizite kann die SUST Sicherheitshinweise veröffentlichen. Sicherheitshinweise werden formuliert, wenn eine Sicherheitsempfehlung im Sinne der Richtlinie (EU) 2016/798 nicht angezeigt erscheint, formell nicht möglich ist oder wenn durch die freiere Form eines Sicherheitshinweises eine grössere Wirkung absehbar ist. Sicherheitshinweise der SUST haben ihre Rechtsgrundlage in Artikel 56 der VSZV:

Art. 56 Informationen zur Verhütung von Zwischenfällen

Die SUST kann allgemeine sachdienliche Informationen zur Verhütung von Zwischenfällen zusammenstellen und veröffentlichen.

7.1 Safety Management System SBB Cargo AG, Teil-Zugvorbereitung

7.1.1 Sicherheitsdefizit

Das Handbuch für den technischen Wagendienst regelt die Aufgaben der TKC, die technische Untersuchung der Wagen und die Massnahmen, die bei Unregelmässigkeit am Wagen getroffen werden müssen, und beschreibt ebenfalls den einheitlichen Qualitätsstandard. Dieses Handbuch gibt vor, dass bei Unregelmässigkeit am Wagen der TKC die Schäden mit dem elektronischen Tablet dokumentieren muss.

Die Ergebnisse der Kontrolle bei der Zugvorbereitung in Chiasso wurden auf verschiedenen Dokumenten protokolliert und dann in den oberen Teil der Zugliste 45016 übertragen. Ein manuell zusammengefasstes Datenreporting auf einem Nachweisdokument, das zur Einhaltung des Prozesses gilt, ist suboptimal, da dadurch Fehler bei der Übertragung entstehen können.

7.1.2 Sicherheitshinweis Nr. 54

Zielgruppe: SBB Cargo AG

Um einen einheitlichen Qualitätsstandard zu gewährleisten, sollte SBB Cargo AG die Ergebnisse der technischen Kontrolle sowie der Zugvorbereitung ohne Medienbruch protokollieren.

Dieser Abschlussbericht wurde von der Kommission der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) genehmigt (Art. 10 Bst. h der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen vom 17. Dezember 2014).

Bern, 27. Mai 2025

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle

Anlage 1

Zugbildung mit Wagennummern

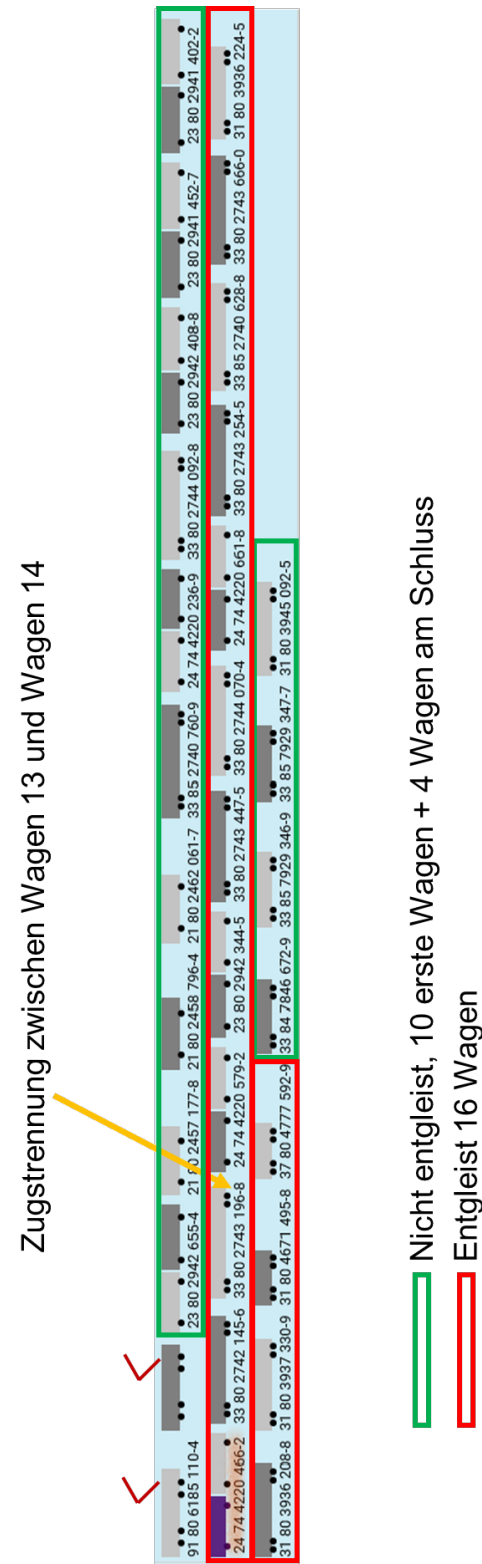


Abbildung 92: Zugbildung Zug 45016 (Quelle: SBB-ZKE, Ergänzungen SUST).

Anlage 2

Radverhältnis ZKE-RLC in Claro – Wagen 11 (Wagen 466-2), Achse 1

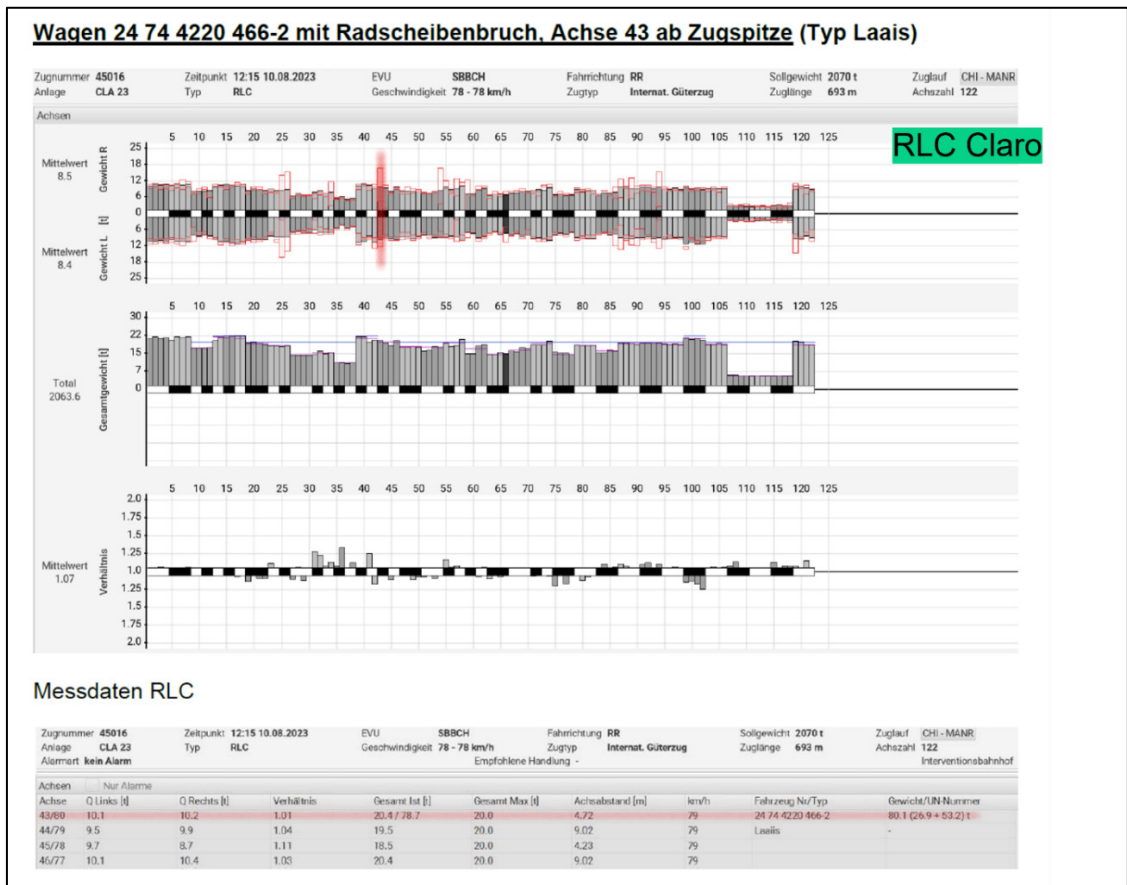


Abbildung 93: Aufzeichnung Radverhältnis ZKE-RLC in Claro, Zug 45016, am 10.08.2023.

Radaufstandskraft ZKE-RLC in Claro – Wagen 11 (Wagen 466-2), Achse 1



Abbildung 94: ZKE-Aufzeichnung der Radaufstandskräfte: RLC in Claro, Zug 45016, am 10.08.2023.

Alarmwerte:

Um einen Alarm auszulösen, muss ein Radverhältnis $\geq 1.7:1$ oder die dynamische Radkraft ≥ 40 t sein.

Anlage 3

ZKE-Aufzeichnung in Claro

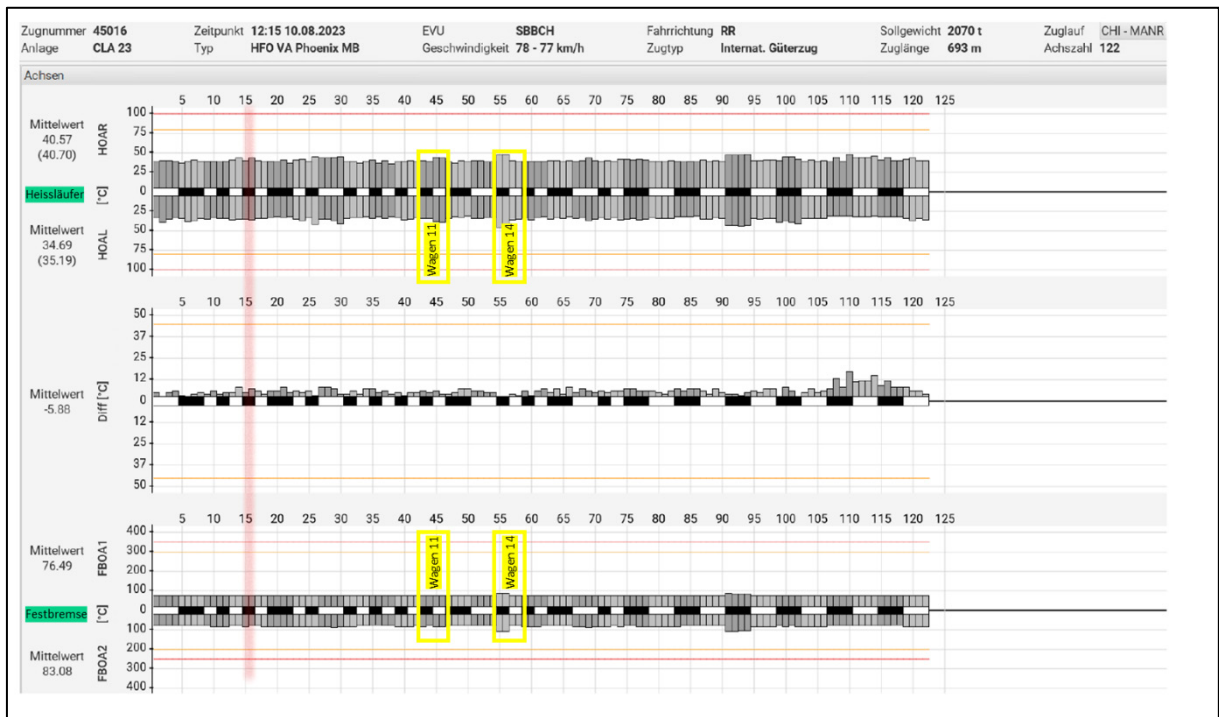


Abbildung 95: Aufzeichnung ZKE-HFO in Claro, Zug 45016, am 10.08.2023.

Rote und orange Linien: Alarmeingriffswerte gem. Anlage 4, HFO

Anlage 4

Beschreibung der Zugkontrolleinrichtungen (ZKE)

Auf dem Normalspurnetz der Schweizer Bahnen sind mehrere, unterschiedliche Systeme von Zugkontrolleinrichtungen (ZKE) installiert. Sie führen Messungen an vorbeifahrenden Zügen durch, reagieren bei Abweichungen durch Alarmmeldungen und leisten dadurch einen wichtigen Beitrag für die Sicherheit des Eisenbahnverkehrs.

Im Folgenden werden nur die Überwachungssysteme beschrieben, die mit dem vorliegenden Ereignis im Zusammenhang stehen.

- Heissläufer- und Festbrems-Ortungsanlagen (HFO)
- Radlastcheckpoint (RLC)

Das Interventionszentrum in Erstfeld hat die Aufgabe, empfangene Meldungen zu analysieren und bei Alarmen Massnahmen zu treffen. Bestimmte Alarme werden automatisch ausgelöst und gleichzeitig dem zuständigen Fahrdienstleiter übermittelt.

Die gesammelten elektronischen Daten werden gespeichert und können nach einem Zwischenfall bei Bedarf im Detail analysiert werden

Heissläufer- und Festbrems-Ortungsanlagen (HFO)

Beschreibung

Die HFO erkennen Heissläufer und Festbremsungen bei vorbeifahrenden Zügen. Die Anlagen sind mit Infrarotsensoren zur Temperaturmessung ausgestattet.

Alarm-Eingriffswerte

Die Alarm-Eingriffswerte sind wie folgt festgelegt:

Heissläufer Differenzalarm	≥ 45 °C
Heissläufer heiss	≥ 100 °C
Heissläufer warm	≥ 80 °C < 100 °C
Festbremser heiss	≥ 250 °C
Festbremser Scheibenbremse	≥ 350 °C
Festbremser Trendalarm Klotzbremse	≥ 200 °C < 250 °C

Radlastcheckpoint (RLC)

Beschreibung

Dieses System wurde ursprünglich als «Radlastwaage» entwickelt. Es misst statisch und dynamisch die Radlasten vorbeifahrender Züge.

Der Radlast-Checkpoint überprüft gleichzeitig die Radaufstandskraft und das Radlastverhältnis links-rechts, um die Verteilung der Last auf die Räder zu kontrollieren. Die Radaufstandskraft ist ein Indikator für den Zustand eines Fahrzeuggrades. Damit lassen sich Unrundheiten oder Schäden an der Lauffläche des Rades sowie Flachstellen erkennen, die zu Schäden an der Infrastruktur oder Folgeschäden an den Fahrzeugen führen können. Sobald eine markante Flachstelle auf einer Lauffläche eines Rades vorhanden ist, steigt der dynamische Beiwert.

Auszug aus dem Handbuch Zugkontrolleinrichtungen²¹:

Mit den RLC werden folgende Messungen und Nutzen erzielt:

- Rad- und Achslasten
Verhinderung von Überbelastungen der Infrastruktur (z.B. alte Stahlbrücken), aber auch Verhinderung von Achsbrüchen aufgrund der Überbelastungen mit möglicher Entgleisung in der Folge.
- Radlastverhältnis links zu rechts
Verhinderung von Entgleisungen und allenfalls auch Profilverletzungen aufgrund von La-
deverschiebungen oder Falschverladung.
- Radunrundheiten und Drehgestellschäden
Verhinderung von Überbelastungen der Infrastruktur bzw. von Entgleisungen durch Rad-
bzw. Drehgestellschäden (gebrochene oder verrutschte Federn, fehlende Bolzen, sicher-
heitskritische Flachstellen). Zudem stellen Flachstellen eine empfindliche Komfortein-
busse für Reisende sowie u.U. eine starke Lärmbelästigung für Anwohner dar. Auch Er-
schütterungen in nahe am Gleis liegenden Unternehmungen können sich sehr störend
auswirken.
- Zuggesamtgewicht, Abgleich mit den entsprechenden Daten in ZIS-Infra
Verhinderung von Signalfällen bzw. Zusammenstößen infolge falscher Bremsrechnun-
gen.
- Alarm-Eingriffswerte, bzw. Warn-Werte
Folgende Alarm-Eingriffswerte und Warn-Werte wurden festgelegt:

- **Alarm-Eingriffswerte**

Radlastverhältnis $\geq 1.7:1$ und Achslast ≥ 10 t

Achslast ≥ 25 t

Radfehler **dyn. Radkraft ≥ 40 t**

Zuggewicht Abweichungen ≥ 20 % (Messung – ZIS-Daten)

Im Alarmfall fährt der Lf mit einer Geschwindigkeit von maximal 60 km/h bis zum nächs-
ten Interventionsbahnhof und hält den Zug an.

- **Warn-Werte**

Radlastverhältnis $\geq 1.6:1$ und Achslast ≥ 10 t

Achslast ≥ 24 t

Radfehler **dyn. Radkraft ≥ 30 t**

Warnmeldungen werden automatisch als Mail generiert und an die EVU übermittelt, die
diese behandeln und i. d. R im Endbahnhof geeignete Massnahmen treffen.

Alle Wagen werden vom System gemessen und erfasst. Bei leeren Wagen bzw. Wagen, die
eine Achslast kleiner als 10 t aufweisen, wird jedoch auch bei Überschreiten des Radlastver-
hältnisses 1:1.7 keine automatische Überwachungsmeldung ausgelöst.

²¹ Quelle: Regelwerk SBB, I-50099, D IB 50/22, Handbuch Zugkontrolleinrichtungen, Version 14-0, gül-
tig ab 11.12.2022.

Anlage 5

Eigenspannungen: Vereinfachte Erklärung

Definition:

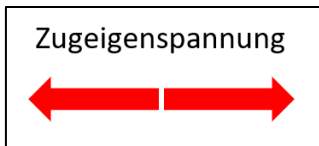
Eigenspannungen sind mechanische Spannungen, die in einem Bauteil herrschen, an dem keine äusseren Kräfte angreifen. Sie können durch plastische Verformungen, inhomogenes Gefüge oder thermische Einflüsse verursacht werden.

Die Eigenspannungen tragen massgeblich zum Spannungszustand bei und überlagern die Betriebsspannungen.

Der Unterschied zwischen Druck- und Zugeigenspannung lässt sich vereinfacht folgendermassen erklären:



Druckeigenspannungen (negative Werte) an der Oberfläche verbessern die Ermüdungsbeständigkeit. Diese müssen zuerst «überwunden» werden, bevor Ermüdungsrisse entstehen können.



Zugeigenspannungen (positive Werte) verschlechtern die Ermüdungsbeständigkeit: Diese wirken wie eine zusätzliche Vorlast auf die Bauteile.

Ermüdung: Vereinfachte Erklärung

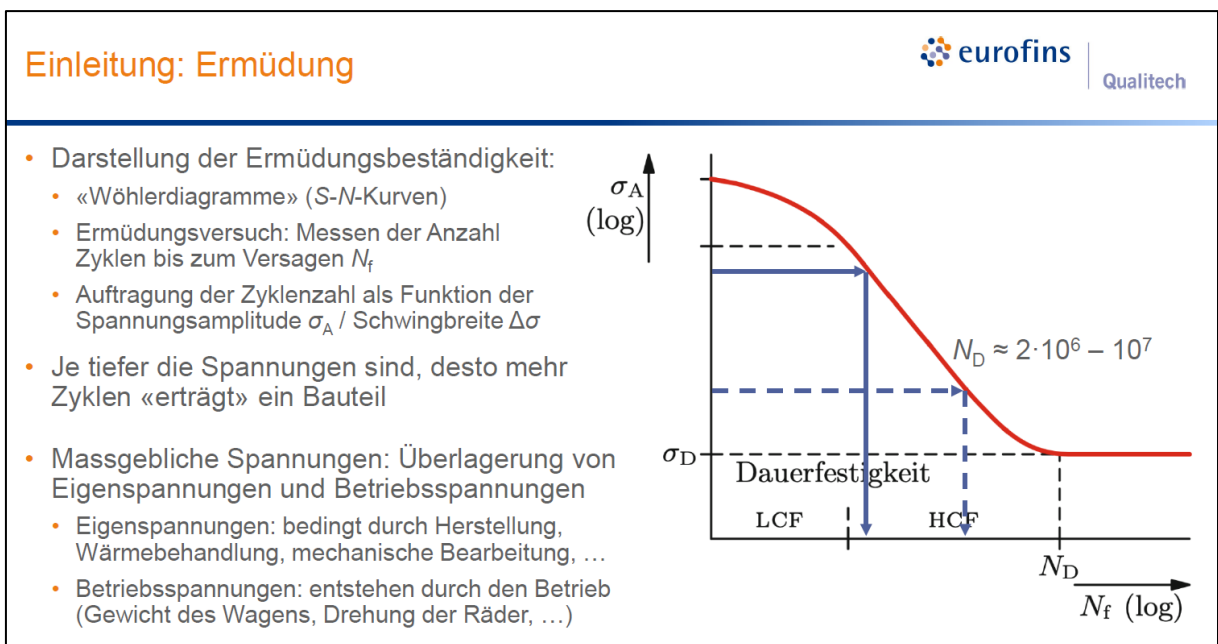


Abbildung 96: Erklärung von Dauerfestigkeit und Eigenspannung.

Anlage 6

Mikroskopische Aufnahmen der intakten und der gebrochenen Radscheibe

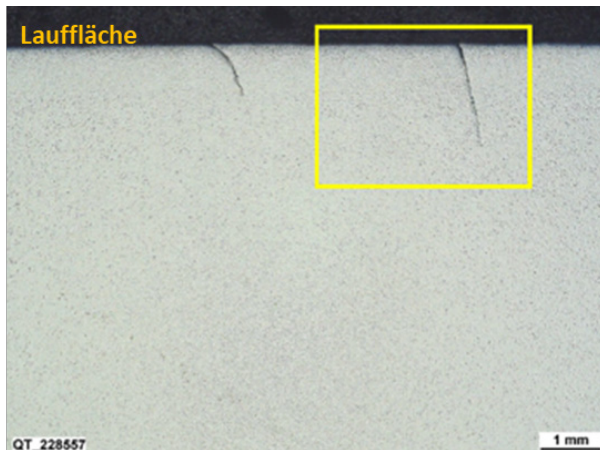


Abbildung 97: Lichtmikroskopische Aufnahme der intakten Lauffläche von Radsatz 3, Radscheibe links.

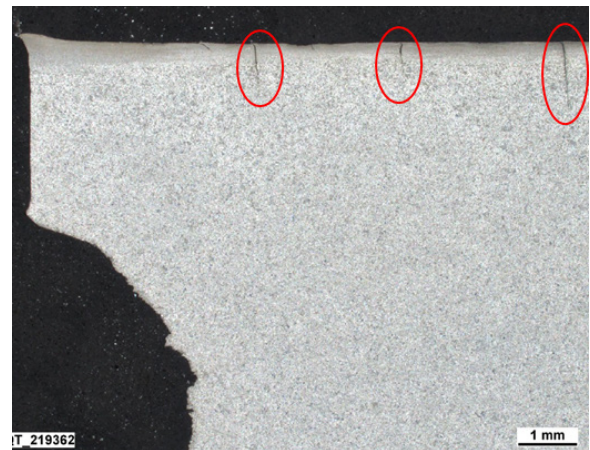


Abbildung 98: Lichtmikroskopische Aufnahme von der gebrochenen Radscheibe von Radsatz 1.

Vergleich zwischen metallographischen Untersuchungen der Risse

Ermüdung durch Überrollbeanspruchung vs. Riss senkrecht zur Lauffläche.



Abbildung 99: Lichtmikroskopische Aufnahme der intakten Lauffläche von Radsatz 3; Riss ausgehend von der Lauffläche, ungefähr senkrecht zur Oberfläche, ohne Ermüdung durch Überrollbeanspruchung.

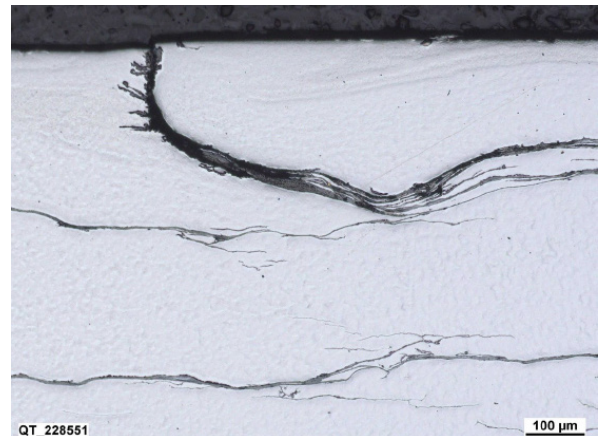


Abbildung 100: Lichtmikroskopische Aufnahme mit Ermüdung durch Überrollbeanspruchung.

Die Ermüdungsrisse (Abbildung 100) parallel zur Oberfläche sind bekannte Phänomene an Rädern. Diese Schädigung ist typisch auf eine Überrollbeanspruchung zurückzuführen.

Anlage 7

Norm EN 13262, Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Produktanforderungen, Version 2020

Auszug

Druckeigenspannung in Umfangsrichtung nahe der Lauffläche

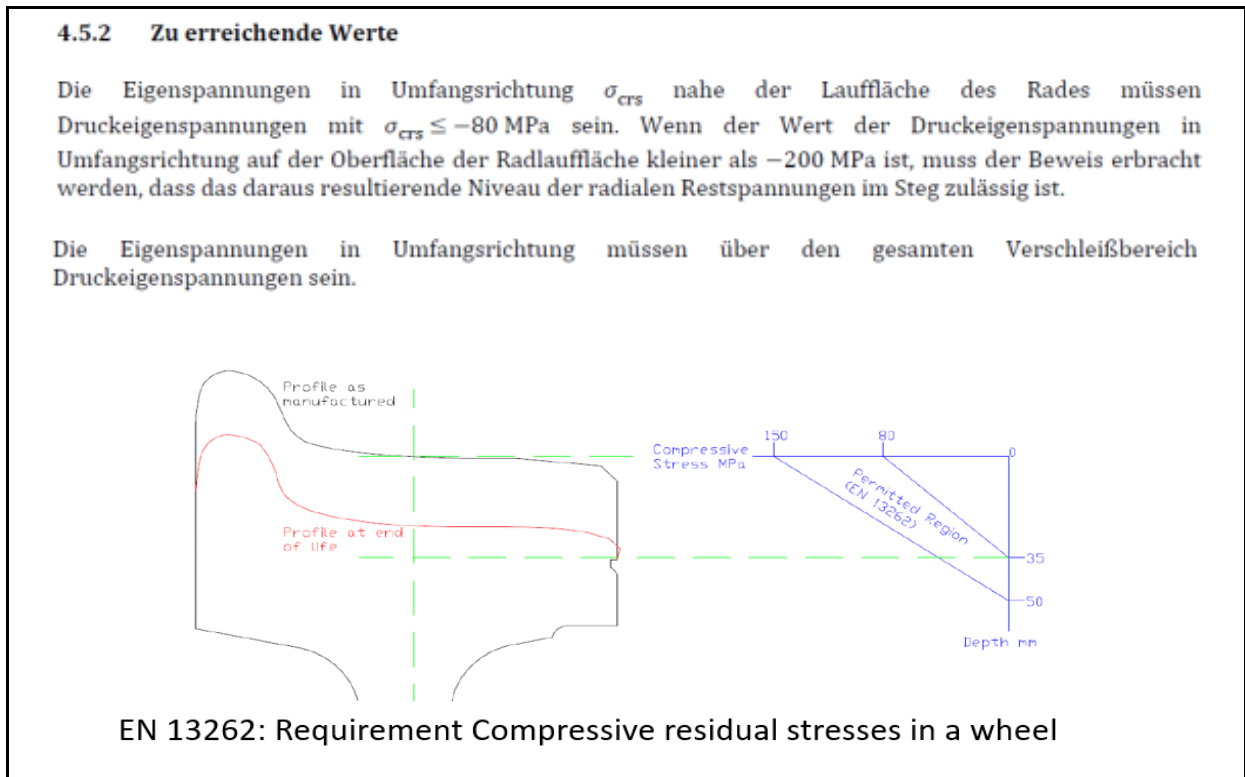


Abbildung 101: Druckeigenspannung in einer Radscheibe.
(*Compressive residual stress* (EN) – Druckeigenspannung (DE))

Anlage 8

Ergebnisse der metallurgischen Untersuchungen – komplette Beschreibung

5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die visuellen und rasterelektronischen Untersuchungen der Bruchflächen am gebrochenen Rad haben gezeigt, dass bei allen Bruchstücken und dem an der Radscheibe verbliebenen Bereich Schwingungsrisse vorhanden sind. Diese haben sich an der Lauffläche gebildet und breiteten sich senkrecht dazu in das Material hinein aus. Dies entspricht einer radialen Rissausbreitung bezogen auf die Radscheibe. Erst im Steg mit zunehmendem Abstand zur Lauffläche haben sich die Risse teilweise verästelt und ihre Ausbreitungsrichtung hin zu einem tangentialen Verlauf geändert. Weder die rasterelektronischen noch die metallografischen Untersuchungen der Bruchausgangsbereiche haben im Material Defekte zutage gefördert, welche die Rissentstehung begünstigt hätten.

Die Untersuchungen an der zweiten Radscheibe derselben Achse haben gezeigt, dass auch dieses Rad Risse aufweist, die sich teilweise über einen grossen Bereich des Stegs ausgebreitet haben. Die fraktografische Untersuchung bestätigte, dass es sich ebenfalls um Schwingungsrisse handelt, die von der Lauffläche ausgehen. Das Schädigungsbild ist somit identisch zu dem der gebrochenen Radscheibe. Es ist daher davon auszugehen, dass auch dieses Rad bei einem Weiterbetrieb in Zukunft versagt hätte.

Die visuellen und metallografischen Untersuchungen haben gezeigt, dass neben den untersuchten Bruchflächen zahlreiche weitere Risse vorhanden sind, die sich an der Lauffläche gebildet haben und ebenfalls ungefähr senkrecht in das Material hinein ausgebreitet haben. Es dürfte sich dabei um weitere Schwingungsrisse handeln, die jedoch noch weniger weit gewachsen sind.

Schwingungsrisse bilden sich aufgrund von zyklischen mechanischen und thermischen Belastungen während des Betriebs (Ermüdungsbelastung). Aufgrund der Rotation der Räder während der Fahrt des Wagens wird im Bereich der Lauffläche eine zyklische mechanische Last aufgebracht. Ein Zyklus entspricht dabei einer Umdrehung des Rads. Weiter wird während des Bremsens aufgrund der Reibung zwischen Bremsschuh und Lauffläche Wärme erzeugt. Die damit einhergehende Temperaturerhöhung führt zu einer Ausdehnung des Rads lokal im Bereich der Lauffläche. Anschliessend kühlt diese Zone wieder ab, insbesondere durch die Wärmeabfuhr über den Radkranz und den Steg. Jeder Bremsvorgang führt somit zu einer Ausdehnung und nachfolgenden Kontraktion des Bereichs der Lauffläche. Diese Vorgänge stellen eine zyklische thermomechanische Belastung dar und beeinflussen das Material.

Jedes metallische Material besitzt eine endliche Belastbarkeit unter zyklischen thermischen und / oder mechanischen Belastungen und es ist wichtig, hervorzuheben, dass die unter zyklischer Beanspruchung ertragbaren Lasten deutlich geringer sind als im statischen Fall. Dabei ist die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel umso höher, je geringer die Belastungen sind. Einige Metalle, wie der für die Räder eingesetzte Stahl, besitzen phänomenologisch einen Grenzwert für die aufgetragten Spannungen, die sogenannte Dauerfestigkeit, unterhalb derer während einer technischen Nutzungsdauer nicht mit dem Auftreten von Ermüdungsrisse gerechnet werden muss. Die Auslegung eines Radsatzes erfolgt daher so, dass die während des Betriebs zu erwartenden zyklischen Lasten unterhalb der Dauerfestigkeit liegen. Der Zusammenhang zwischen zyklischer Spannung und Anzahl ertragbarer Zyklen wird in Wöhler- oder Dauerfestigkeitsdiagrammen zusammengefasst.

Umgekehrt kann somit geschlossen werden, dass das Vorhandensein von Schwingungs- oder Ermüdungsrisse auf den Bruchflächen bedeutet, dass die zyklische Festigkeit des Materials überschritten worden sein muss. Da die fraktografischen Untersuchungen eindeutig gezeigt haben, dass die Risse an den Laufflächen initiiert worden sind, muss der Materialzustand in

diesem Bereich genauer diskutiert werden. Es müssen somit Bedingungen vorgelegen haben, welche die Rissbildung begünstigt, respektive ermöglicht haben. Das Vorhandensein von mehreren gleichartigen Bruchflächen und zahlreichen weiteren von der Lauffläche ausgehenden Rissen legt nahe, dass es sich um ein systematisches Phänomen handelt und es nicht auf einzelne Materialdefekte zurückgeführt werden kann.

Die Bildung von Schwingungsrissen in metallischen Werkstoffen geschieht dadurch, dass auch unterhalb der Streckgrenze bereits Versetzungsbewegung auftritt. Versetzungen sind in Metallen die Träger der plastischen Verformung und während eines Belastungszyklus kann es zu einer geringfügigen Versetzungsbewegung kommen. Die Voraussetzung dafür ist, dass an der Materialoberfläche Zugspannungen vorliegen, die eine Versetzungsbewegung ermöglichen. Zwar ist die mit der Versetzungsbewegung einhergehende plastische Verformung in einem einzelnen Zyklus sehr gering, doch können sich diese Verformungen über eine grosse Zahl von Zyklen so akkumulieren, dass ein Anriss entstehen kann. Es bilden sich somit an der Oberfläche kleine Kerben, von denen ausgehend sich Anrisse in das Material ausbreiten können. Oftmals dauert die Anrissbildung bei glatten Proben relativ lange, insbesondere wenn die Oberfläche glatt ist und die Belastung deutlich unterhalb der Dehngrenze liegt. In diesem Fall wird ein Grossteil der Lebensdauer für die Anrissbildung verbraucht.

Sobald sich an der Bauteiloberfläche erste Anrisse gebildet haben, kommt es an deren Spitzen aufgrund der Kerbwirkung zu einer Spannungsüberhöhung. Diese führt zu lokal an der Risspitze zu vergleichsweise hohen Spannungen und es bildet sich eine plastische Zone, die unter Zugbeanspruchung zu einem geringfügigen Rissfortschritt führt. Bei der Entlastung des Materials wird der Riss wieder geschlossen und die elastische Dehnung an der Risspitze abgebaut. Da der Rissfortschritt durch zyklische Belastungen getrieben wird, kommt es in der Folge jeweils zu einem kleinen Rissfortschritt, wenn Zugspannungen im Bereich des Risses vorliegen. Das bedeutet, dass sich mit jedem Zyklus der Riss ein kleines Stück weiter ausbreitet. Die Rissausbreitung erfolgt dabei senkrecht zur höchsten im Material vorliegenden Normalspannung.

Zusätzlich zu den Betriebsspannungen liegen im Material Eigenspannungen vor. Als Eigenspannungen werden diejenigen Spannungen bezeichnet, die im Innern eines Werkstücks ohne Angreifen von äusseren Kräften vorhanden sind. Diese entstehen während der Herstellung und Umformung eines Bauteils, aufgrund von Wärmebehandlungen und auch während des Betriebs können die auftretenden Belastungen eine Veränderung des Eigenspannungszustands hervorrufen. Eigenspannungen überlagern die während des Betriebs auftretenden Belastungen und für die Bewertung der Rissentstehung müssen sie ebenfalls berücksichtigt werden. Gemäss den Anforderungen in der EN 13262 muss die Wärmebehandlung eines Rads Druckeigenspannungen ($\sigma_{CTS} \leq -80 \text{ MPa}$) in Umfangsrichtung des Radkranzes erzeugen. Die Eigenspannungen sind an der Lauffläche am grössten und nehmen zum Steg hin ab, denn über das gesamte Volumen eines Bauteils gleichen sich alle Eigenspannungen aus und ergeben in Summe Null.

In einer unter zyklischen Beanspruchungen eingesetzten Komponente verbessern Druckeigenspannungen die Ermüdungsbeständigkeit, da diese Druckeigenspannungen zuerst überwunden werden müssen, bevor Zugeigenspannungen entstehen, welche für die Rissentstehung notwendig sind. Die im Radkranz erzeugten Eigenspannungen zielen somit darauf ab, der Entstehung von Schwingungsrissen vorzubeugen. Umgekehrt wirken Zugeigenspannungen wie eine Vorlast auf das Material zusätzlich zu den Betriebsbeanspruchungen.

Die Eigenspannungsmessungen mit Röntgenbeugung und Barkhausenrauschen ergaben, dass die Lauffläche lokal stark unterschiedliche Eigenspannungszustände aufweist. Neben Druckeigenspannungen sind an der Oberfläche auch hohe Zugeigenspannungen nachgewiesen worden. Die metallografischen Untersuchungen zeigten weiter, dass in unmittelbarer Nähe der Messposition der Zugeigenspannungen Risse vorhanden sind. Diese führen grundsätzlich dazu, dass das Material relaxieren kann und Eigenspannungen abgebaut werden. Somit und

unter Berücksichtigung, dass auch das Versagen des Rads die Eigenspannungen beeinflusst hat, sind die effektiv vorliegenden Eigenspannungen an der Lauffläche wahrscheinlich noch höher gewesen.

Die an der Lauffläche vorhandenen Zugeigenspannungen dürften die Rissentstehung deutlich begünstigt, resp. erst ermöglicht haben. Zwar nehmen die Eigenspannungen mit zunehmender Tiefe ab, doch für die Bildung der ersten Anrisse ist der Bereich direkt an der Oberfläche massgebend. Sobald sich Anrisse gebildet haben, begünstigen die Spannungsüberhöhungen (hohe lokale Spannungsintensitäten) an den Rissspitzen die weitere Rissausbreitung sehr stark. Folglich werden die an der Lauffläche vorhandenen hohen Eigenspannungen als massgeblichen Faktor für die Rissentstehung angesehen.

Für Stähle liegt die Dauerfestigkeit üblicherweise zwischen $0.35 \dots 0.65 \times R_m$ (der Zugfestigkeit), sofern die Festigkeit unterhalb von 1'400 MPa liegt. Die Zugfestigkeit im Radkranz liegt beim gebrochenen Rad bei durchschnittlich ungefähr 850 MPa. Somit kann eine Dauerfestigkeit zwischen 300 und 550 MPa erwartet werden. Die gemessenen Eigenspannungen an der Lauffläche liegen mit 370 MPa innerhalb dieses Bereichs. In EN 13262 ist für den Steg festgelegt, dass dieser eine Schwingbreite $\Delta\sigma$ von 360, resp. 450 MPa mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 99.7 % ohne Rissentstehung ertragen können muss (für eine maximale Oberflächenrauheit R_a von $6.3 \mu\text{m}$). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Angaben für den Steg gelten und nicht für die Lauffläche. Dennoch liefern die Zahlen einen Hinweis auf die Dauerfestigkeit, welche für die Auslegung verwendet werden kann. Die Schwingbreite bezeichnet die Differenz zwischen maximaler und minimaler Spannung einer zyklischen Belastung. In Abhängigkeit der Belastung (ausgedrückt durch den R-Wert) werden dabei unterschiedliche Zugspannungsanteile auf das Bauteil aufgebracht. Für einen R-Wert von -1 liegt eine sogenannt rein schwellende Belastung vor, bei der die Zug- und Druckspannungen gleich gross sind und lediglich ein umgekehrtes Vorzeichen aufweisen ($\sigma_u = -\sigma_o$). Das bedeutet schliesslich, dass in diesem Fall die effektiv anliegenden Zugspannungen die Hälfte der in der Norm aufgeführten Werte betragen (180, resp. 225 MPa). Ausgehend von den Angaben in der Norm und für den betrachteten Belastungsfall liegen die an der Lauffläche vorhandenen Zugeigenspannungen somit oberhalb der für die Auslegung herangezogenen Dauerfestigkeit. Diese Ausführungen sollen verdeutlichen, dass die Zugeigenspannungen sehr wahrscheinlich dazu geführt haben, dass in Summe mit den Betriebsbeanspruchungen die Dauerfestigkeit überschritten worden ist und die Rissentstehung dadurch erklärt werden kann.

Die ursprünglich im Radkranz vorhandenen Druckeigenspannungen werden durch die während des Betriebs auftretende Überrollbeanspruchung im oberflächennahen Bereich reduziert. Zudem erfolgt ein geringfügiger Materialabtrag durch Verschleiss, was in Summe dazu führt, dass die Druckeigenspannungen während des Betriebs kontinuierlich abnehmen. Allerdings genügen diese Prozesse allein nicht, um die Rissentstehung im vorliegenden Fall zu erklären, denn ansonsten wäre zu erwarten, dass sehr viel mehr Räder ähnliche Schädigungen aufweisen würden.

Als weiteren Einflussfaktor, welcher den Eigenspannungszustand der Lauffläche beeinflusst, ist der Bremsvorgang zu betrachten: Während des Bremsens wird eine signifikante Wärmemenge erzeugt, die über den Rad-Schiene-Kontakt und den Radkranz abgeführt wird. Das Material wird somit erwärmt und rasch wieder abgeschreckt. Insbesondere starke Bremsungen oder über einen Zug ungleichmässig ansprechende Bremsanlagen (die in einzelnen Wagen zu einer stärkeren Bremsung führen) resultieren in einer Relaxation der ursprünglich vorhandenen Druckeigenspannungen. Es ist in der Literatur bekannt, dass zyklische Aufheizschocks, also kurzzeitige starke Erwärmungen des oberflächennahen Bereichs, zum Abbau von Druck- und zur Entwicklung von Zugeigenspannungen führen. In seltenen Fällen, resp. bei ausreichend hoher Anzahl an thermischen Zyklen können auch Thermoschockrisse entstehen. Zwar wurden am Anstrich im Bereich des Stegs und unterhalb des Radkranzes keine Anzeichen für verbrannte Farbe als Indiz einer schwerwiegenden Überhitzung gefunden, dennoch werden

die Vorgänge beim Bremsen als massgeblich für die Entstehung der lokalen Zugeigenspannungen an der Lauffläche betrachtet.

Die vergleichende Untersuchung der Eigenspannungen mittels Ultraschall und Röntgenbeugung zeigte auf, dass die während der Instandhaltung durchgeführten Ultraschallmessungen nur beschränkt eine Aussage zum Eigenspannungszustand direkt an der Lauffläche ermöglichen. Der für die Risseinleitung massgebliche Bereich an der Lauffläche kann somit nicht ausreichend erfasst werden.

Die Untersuchung der Bruchflächen ergab, dass die überwiegende Mehrheit der während des Betriebs entstandenen Risse eine oxidierte Oberfläche aufweisen. Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung zeigte, dass die Oberflächen teilweise sehr stark verrieben worden sind. Dies deutet darauf hin, dass die beiden Rissflanken während der Rissausbreitung wiederholt in aufeinandergepresst worden und Kontakt miteinander gestanden sind. Es könnte sich also um mechanisch erzeugte Oxide handeln, die als Folge von Reiboxidation (Fretting) entstanden sind. Weiter ist zu berücksichtigen, dass unter dem Einfluss der Umgebung (Luftsauerstoff und Feuchtigkeit) die Rissflächen korrodieren können und als Folge davon sich ebenfalls Oxide bilden. In beiden Fällen ist anzunehmen, dass die Oxidbildung über einen längeren Zeitraum geschah, was wiederum bedeutet, dass die Rissausbreitung sich über mindestens mehrere Monate erstreckte, bevor es zum katastrophalen Versagen gekommen ist. Die genaue Dauer der Rissausbreitung lässt sich allerdings aufgrund der starken sekundären Beschädigung der Bruchflächen nicht mehr ermitteln.

Die Lebensdauer eines Bauteils, welches einer Überrollbeanspruchung ausgesetzt ist, wie neben den Rädern eines Zuges beispielsweise Wälzlager oder Zahnräder, ist ebenfalls durch Ermüdung begrenzt.

Der Verlauf der durch die Hertzsche Pressung zwischen zwei gekrümmten Oberflächen erzeugten orthogonalen Schubspannung besitzt ein Maximum, das unterhalb der Kontaktfläche liegt. Diese Schubspannung tritt zyklisch auf und ist für die Bildung von Ermüdungsrissen unter Oberfläche verantwortlich. Mit zunehmendem Wachstum breiten sich die Risse zunächst parallel zur Oberfläche aus. Schliesslich ändern sie ihre Richtung und wachsen zur Oberfläche hin. Dies führt makroskopisch zu Abblätterungen an den Laufflächen. Dieses Schädigungsbild besitzt deutliche Unterschiede zu demjenigen, welches für das Versagen der Radscheiben verantwortlich ist: Im vorliegenden Fall weisen sowohl das gebrochene Rad als auch die zweite Radscheibe von der Lauffläche ausgehende Schwingungsrisse auf, die sich senkrecht dazu in das Material hinein ausbreiten.

Die eingesetzte Legierung ER7 ist ein unlegierter Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von max. 0.52 Gew. %. Die chemische Zusammensetzung des gebrochenen Rads entspricht den Vorgaben in der EN 13262. Entsprechend der Zusammensetzung besitzt das Material im normierten Zustand ein perlitisches-ferritisches Gefüge, welches überwiegend aus Perlit besteht. Die untersuchten Positionen im unteren Bereich der Radkränze (entfernt von der Lauffläche) der beiden Radscheiben des Radsatzes 81987 (Nr. 1) entsprechen somit den Erwartungen an den verwendeten Stahl.

Das Gefüge unterhalb der Lauffläche weist eine durch den Einsatz veränderte Mikrostruktur auf. Im Randbereich sind sogenannte braun und weiss angeätzte Bereiche erkennbar. Die Bezeichnungen rühren vom Erscheinungsbild im Lichtmikroskop nach der Ätzung her. Durch die wiederholte Überrollbeanspruchung wird das Material plastisch deformiert und die ursprünglich vorhandene ferritisch-perlitische Struktur wird aufgebrochen. Die Perlitlamellen werden zunehmend zu globularen Karbiden umgewandelt, was mit einer Zunahme der Härte einhergeht. In einem fortgeschrittenen Stadium entsteht ein im Lichtmikroskop beinahe strukturloser Gefügebestandteil mit sehr hoher Härte, der erfahrungsgemäss sehr spröde und rissanfällig ist. Die Härtezunahme im Bereich der Lauffläche wurde anhand der Härtemessungen nahe der Bruchausgänge am grossen Bruchstück und der zweiten Radscheibe nachgewiesen. Das

Erscheinungsbild der untersuchten Proben hinsichtlich ihrer Mikrostruktur entspricht den Erwartungen an ein Rad aus dem Einsatz.

Die im Zug- und Kerbschlagbiegeversuch ermittelten mechanischen Eigenschaften ergaben, dass die Anforderungen gemäss EN 13262 teilweise nicht erfüllt worden sind. Allerdings sind die Abweichungen nicht sehr gross und für die Rissentstehung sowie -ausbreitung dürften die Abweichungen nicht signifikant gewesen sein. Die am Radialschnitt durch den Radkranz ermittelten Härtewerte erfüllen die Vorgaben in der EN 13262.

Anlage 9

Zugkontrolle in Chiasso

[illegible]

Abbildung 102: Protokoll der Kontrolle von Zug 45016, Wagen 1 bis 27 (Quelle: SBBC, bearbeitet durch SUST[Unkenntlichmachung der Namen]. Die roten Kreise Wagen 11 und Wagen 14 wurden nach dem Ereignis angebracht.)

Anlage 10

Beispiel einer Weiche mit Klinkenverschluss

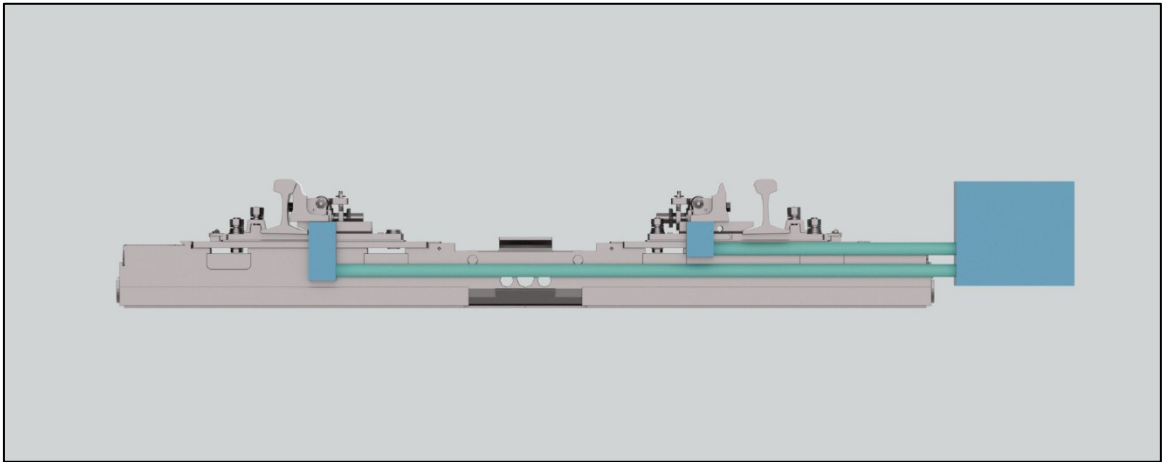


Abbildung 103: Beispiel einer Weiche mit Klinkenverschluss.