

ENTGLEISUNG ZUG 66505

Bf Sankt Veit an der Glan

Untersuchungsbericht

Anlage D

Beilagen:

Seite D –

Gutachten [6]: Analyse der wahrscheinlichen Ursachen für die Beschädigung des Vollrades BTG,
erstellt vom Institut für Materialphysik AV ČR, v.v.i., im Oktober 2011 2 bis 20

Gutachten [6]: Analyse der wahrscheinlichen Ursachen für die Beschädigung des Vollrades BTG, erstellt vom Institut für Materialphysik AV ČR, v.v.i., im Oktober 2011

ipm

Institut für Materialphysik AV ČR, v.v.i.

**ANALYSE DER WAHRSCHEINLICHEN URSACHEN FÜR DIE
BESCHÄDIGUNG DES VOLLRADS BTG, DAS BEI ÖBB AM
FAHRZEUG VOM TYP UACNS BETRIEBEN WIRD**

Brünn, Oktober 2011

Forschungsbericht
Bestellung 11 73011/JR/

Seite 2/22

Institut für Materialphysik AV ČR, v.v.i.

Auftraggeber: **Bonatrans Group a. s.**
Bohumín
Revoluční 300
735 94 Bohumín

Auftragnehmer: **Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i.**
Žižkova 22
616 62 Brno

Verantwortlicher Mitarbeiter des Auftragnehmers:

Prof. RNDr. Ludvík Kunz, CSc.

Autoren des Berichts:

Prof. RNDr. Ludvík Kunz, CSc.
Doc. Ing. Pavel Hutař, PhD.

Ing. Pavel Čupera

Direktor des Auftragnehmers:

Doc. RNDr. Petr Lukáš, CSc

Brünn, Oktober 2011

1. Aufgabenstellung

Gegenstand der Aufgabenstellung ist die Analyse der wahrscheinlichen Ursachen für die Beschädigung des Vollrads BTG, das bei den ÖBB am Fahrzeugtyp Uacns betrieben wird. Namentlich handelt es sich um die:

- 1) fraktographische und metallographische Analyse der Beschädigung an der Bruchstelle des Umfangsrisses. Ziel ist die Bestimmung der Initiierungsstelle des Risses, die Beschreibung des Beschädigungs- und Bruchflächencharakters und die Stellungnahme zur mechanischen Beschädigung,
- 2) metallographische Analyse der Mikrostruktur der Scheibe, die im Rissbereich radial abgetrennt ist und die Beurteilung einer eventuellen thermischen Beschädigung des Radmaterials durch die Quelle (den Klotz),
- 3) Beurteilung des Einflusses der mechanischen und thermischen Belastung des Rads auf dessen Beschädigung
- 4) Herstellung von Probekörpern und die Durchführung der mechanischen Referenzprüfungen zwecks Vergleich mit den Werten der Abnahmeprüfung.

2. Beigestelltes Material für die Prüfungen

Auf Grundlage der Verhandlungen in der Firma BTG a.s. und der visuellen Beurteilung des Eisenbahnrads mit den detektierten Rissen wurde die Trennung des Rads in Segmente vereinbart. Das Trennen in Segmente und deren Bruch wurde vom Auftraggeber durchgeführt. Der Lieferant hat zwei aneinander anschließende Teile eines Bruchsegments erhalten, die auf Abb. 1 abgebildet sind.

Vom Auftraggeber wurden weiterhin zwei Vorprodukte zur Herstellung von Probekörpern für den Zugversuch geliefert. Beide Vorprodukte sind auf Abb. 2 dargestellt. Das Vorprodukt oben auf der Abbildung wurde dem Radkranz entnommen. Das Vorprodukt unten von der Scheibe.

Weiterhin wurden drei Stäbe geliefert, die dem Radkranz entnommen und mit 11, 21 und 31 gekennzeichnet wurden. Aus denselben wurden die Probekörper für den Kerbschlagbiegeversuch hergestellt.



Abb. 1. Gebrochenes Segment – vom Auftraggeber geliefert.



Abb. 2. Vorprodukte zur Herstellung des Probekörpers für den Zugversuch

3. Probekörper

Die Probekörper für den Zugversuch wurden gemäß Zeichnung auf Abb. 3 hergestellt. Im Fall des Körpers, der dem Kranz entnommen wurde, war die längere Achse des Körpers 15 mm unter der Fahrfläche angeordnet und in Tangentialrichtung ausgerichtet. Der Körper wurde mit V gekennzeichnet.

Der Körper vom Vorprodukt, der der Scheibe entnommen wurde, wurde so hergestellt, dass er in das Volumen des gelieferten Materials rein gepasst hat. Die Achse des Körpers war in Radialrichtung des Rads ausgerichtet. Der Körper wurde mit D gekennzeichnet.

Die Probekörper für den Kerbschlagbiegeversuch wurden gemäß Zeichnung auf Abb. 4 hergestellt. Die Ausrichtung der Kerbe gegenüber der Kennzeichnung am Vorprodukt ist ebenfalls auf Abb. 4 dargestellt. Für die Versuche wurden insgesamt 3 Probekörper mit Kennzeichnung 11, 21 und 31 hergestellt.

Vom Bruchsegment auf Abb. 1 wurde die Bruchfläche so abgetrennt, in dem kleinere Teile vorbereitet wurden, die zur Betrachtung im Elektronenrastermikroskop vorteilhaft waren. Abb. 5.

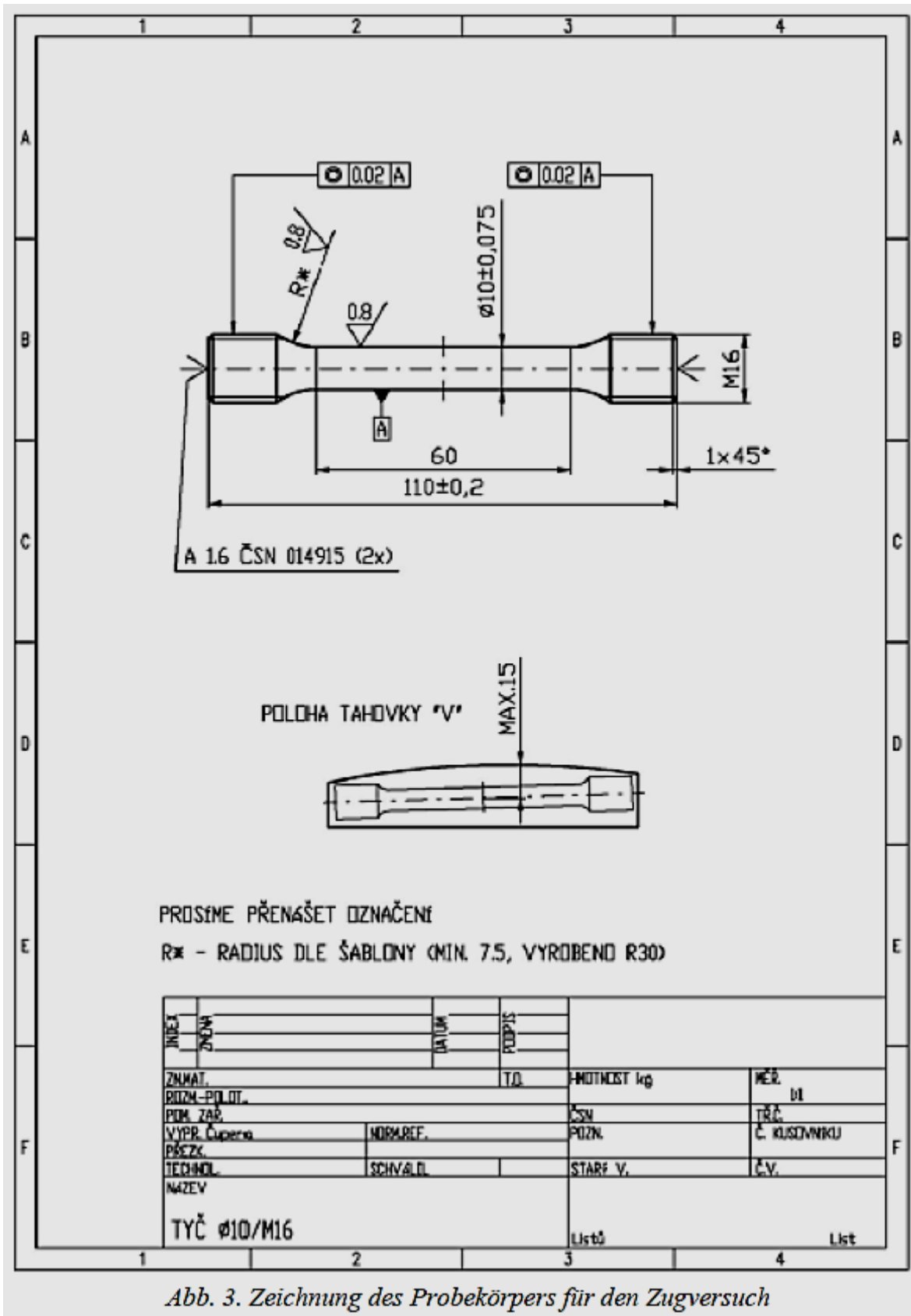


Abb. 3. Zeichnung des Probekörpers für den Zugversuch

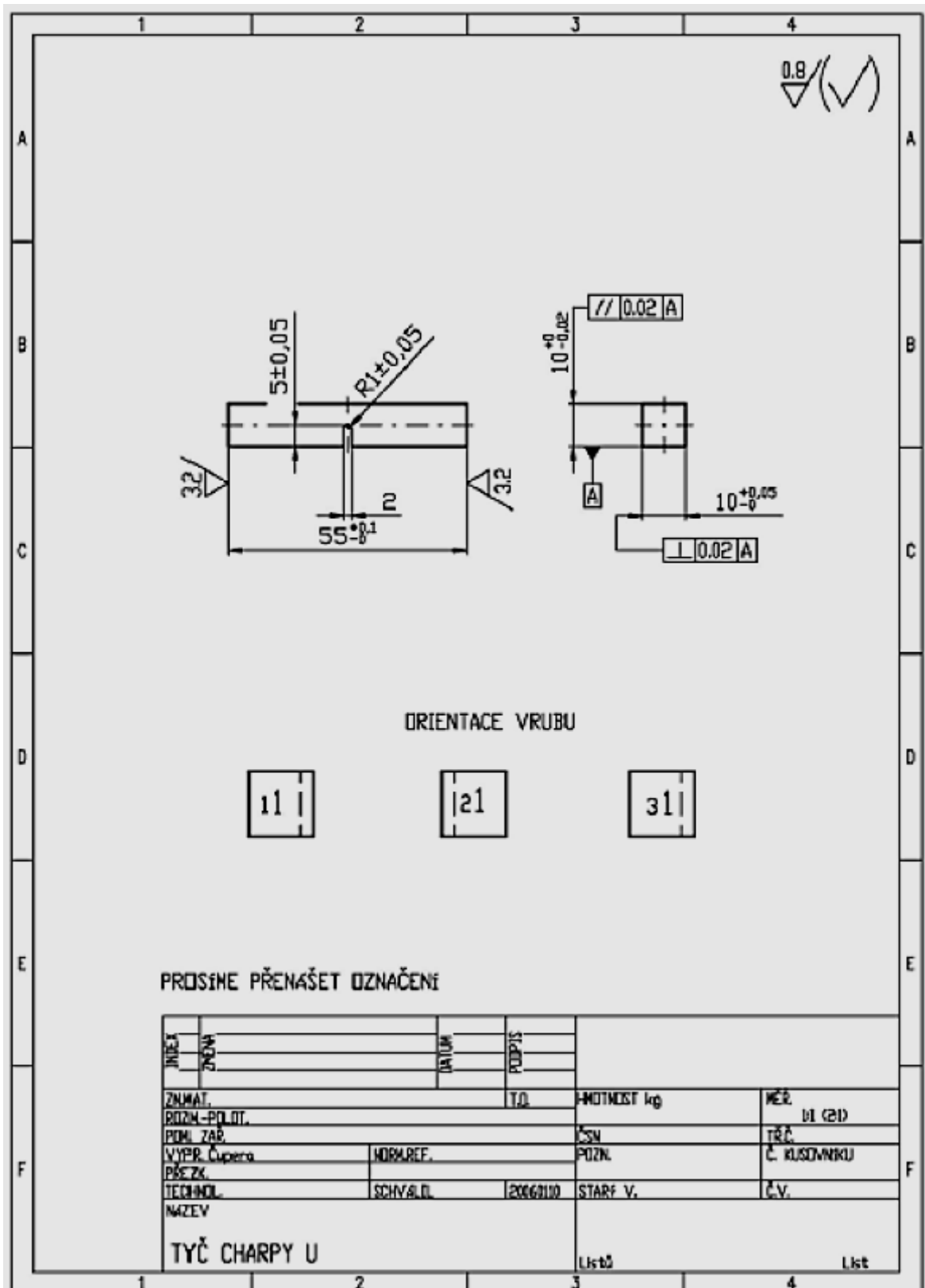


Abb. 4. Zeichnung des Probekörpers für den Kerbschlagbiegeversuch



Abb. 5. Teile der Bruchfläche, die für die farktographische Analyse im Elektronenrastermikroskop angewendet sind.

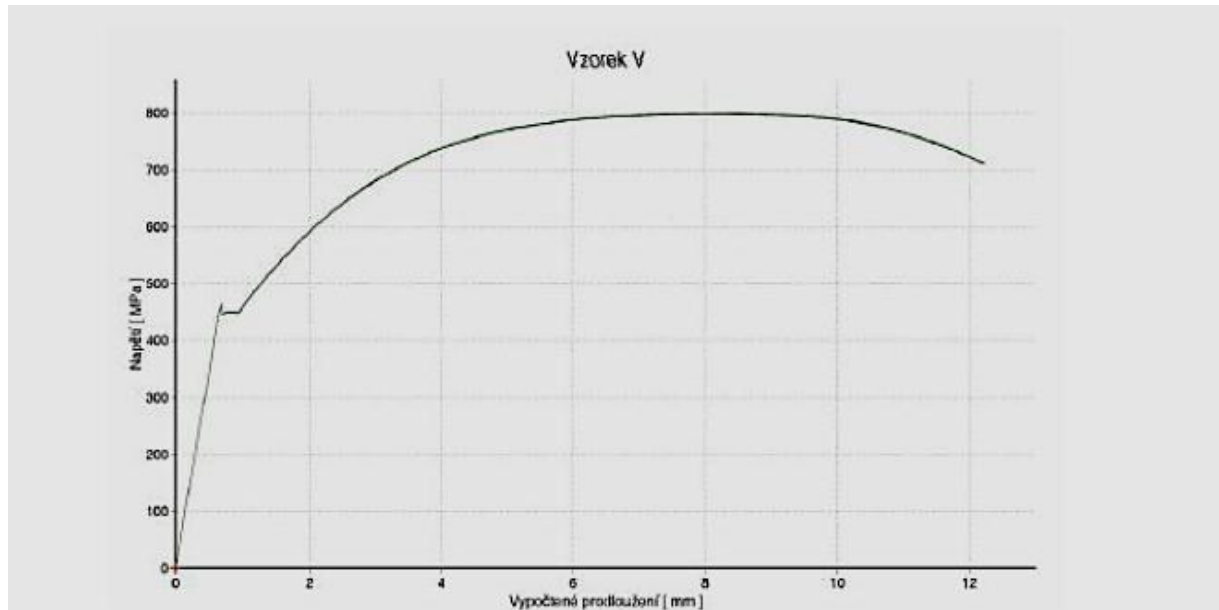
4. Zugversuch und Kerbschlagbiegeversuch

Die Zugversuche wurden an der elektromechanischen Prüfmaschine Zwick 1382 mit einem Kraftbereich bis zu ± 200 kN bei Zimmertemperatur und bei der üblichen Feuchtigkeit des Labors durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit der Traverse betrug 2 mm/min.

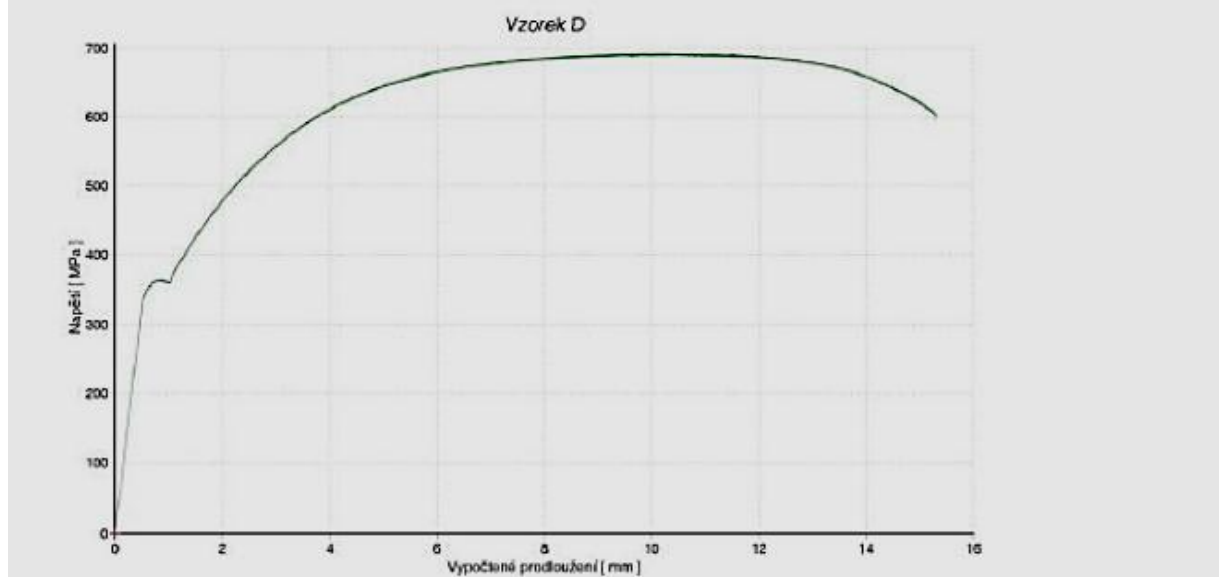
Das Ergebnis des Zugversuchs des aus Kranzmaterial hergestellten Probekörpers ist auf Abb. 6 und des aus Scheibenmaterial hergestellten auf Abb. 7 dargestellt.

Tabelle 1. Ergebnisse des Zugversuchs

Probe- körper	Lo /mm	Do /mm	ReH /MPa	ReL /MPa	Rm /MPa	A /%	Z /%
V	50	9,93	463	448	800	22,5	13,0
D	50	9,93	---	---	691	24,5	13,0



- Probe V
 - *senkrechte Achse* : Spannung
 - *waagerechte Achse*: berechnete Verlängerung
- Abb. 6. Zugdiagramm des vom Kranz entnommenen Probekörpers*



- Probe D
 - *senkrechte Achse* : Spannung
 - *waagerechte Achse*: berechnete Verlängerung
- Abb. 7. Zugdiagramm des von der Scheibe entnommenen Probekörpers*

Die Kerbschlagbiegeversuche wurden am instrumentierten Schlaghammer Amsler RKP (300 J) mit Aufzeichnung der Kraft und des Winkels durchgeführt. Die Hammergeschwindigkeit betrug 5,23 ms⁻¹ und die Prüftemperatur 23°C. Die Prüfergebnisse sind in Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 2. Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche

Probekörper	KU /J/	Dicke in mm	Höhe in mm	Breite in mm
11	30,8	10,05	10,07	55,05
21	29,5	10,05	10,07	55,10
31	30,0	10,07	10,06	55,10

5. Makroskopische und optische Untersuchung der Bruch des Scheibe

Aus der makroskopischen Betrachtung geht hervor, dass die Bruchfläche von zwei klar unterscheidbaren Bereichen gebildet wird, Abb. 8. Der größere Teil stellt den auf der Presse durchgeführten statischen Bruch dar. An der Innenseite des Segments sind eindeutig Ermüdungsrisse ersichtlich, die max. in 1/4 der Wanddicke der Radscheibe reichen und welche vor dem Brechen derselben waren. Die Ermüdungsrisse haben makroskopisch annähernd eine halbeliptische Form. Aus der makroskopischen Form der Ermüdungsbruchflächen und aus deren gegenseitiger Lage geht eindeutig eine mehrfache Initiierung hervor. Sie trat am Radumfang in einer sehr schmalen Zone (Streifen) ein. Die Initiierungsstellen sind auf Abb. 8 durch Pfeile gekennzeichnet. An den Enden der Bruchflächen, im Übergangsbereich zum Bruch sind Anzeichen von Fortschrittslinien – bench markings – ersichtlich. Sie zeugen vom allmählichen Wachstum der Risse und von Veränderungen der Belastungsbedingungen, Abb.9.

Zwecks detaillierter Betrachtung der Bruchfläche und Materialstruktur in deren Nähe wurde ein auf Abb. 10 dargestellter Teil abgetrennt. Die Pfeile zeigen auf die Stellen, wo die Fortschrittslinien des Risses gut ersichtlich sind. Die Darstellung dieses Bereich mittels Stereomikroskop Nikon AZ 100 ist auf Abb. 11 abgebildet. Die applizierte Darstellung zeigt die Färbung der Ermüdungsbruchfläche, die indiziert, dass die Bruchoberflächen einer erhöhten Temperatur ausgesetzt sein mussten. Abb. 10 indiziert eine Färbung von Eisenoxiden, die es ermöglichen zu beweisen, dass bei der thermischen Belastung Temperaturen von 250 – 300°C erreicht wurden.

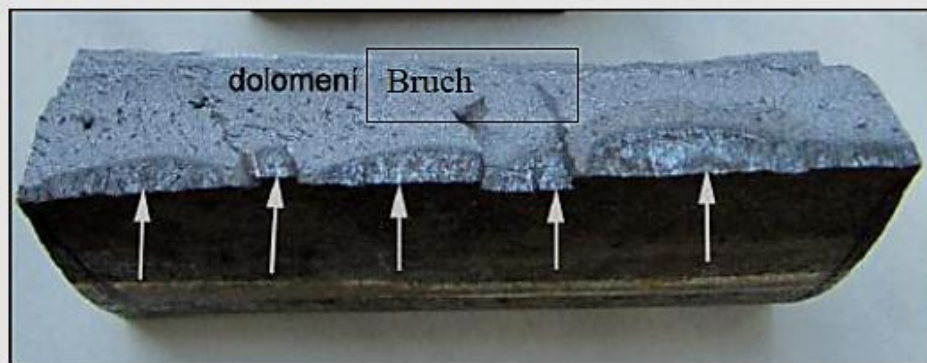


Abb. 8. Bruchfläche mit Ermüdungsrissen, die an der Innenseite der Radscheibe initiiert sind.



Abb. 9. Fortschrittslinien in der Nähe der Stirn der Ermüdungsrisse

6. Fraktographische Untersuchung mit einem Elektronenrastermikroskop

Die Bruchflächen wurden auf zwei Elektronenmikroskops untersucht, namentlich auf dem Elektronenrastermikroskop JEOL 6460 und dem Elektronenrastermikroskop LYRA 3 XMU FEG/SEM-FIB Tescam.

Die Bruchfläche mit einer kleinen Vergrößerung ist auf Abb. 12 dargestellt. An der Stirn des Risses, auf dem Foto oben, sind die Fortschrittslinien ersichtlich, die die Lage der Stirn bei Veränderungen der Belastungsbedingungen charakterisieren.

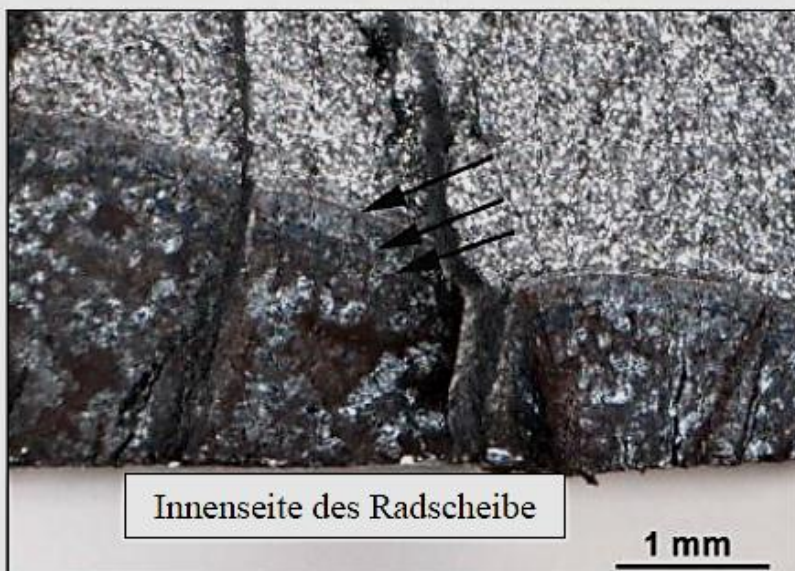


Abb. 10. Segment der Bruchfläche in deren Nähe die metallographische Analyse durchgeführt wurde. Die Pfeile zeigen die Fortschrittslinien des Risses an.

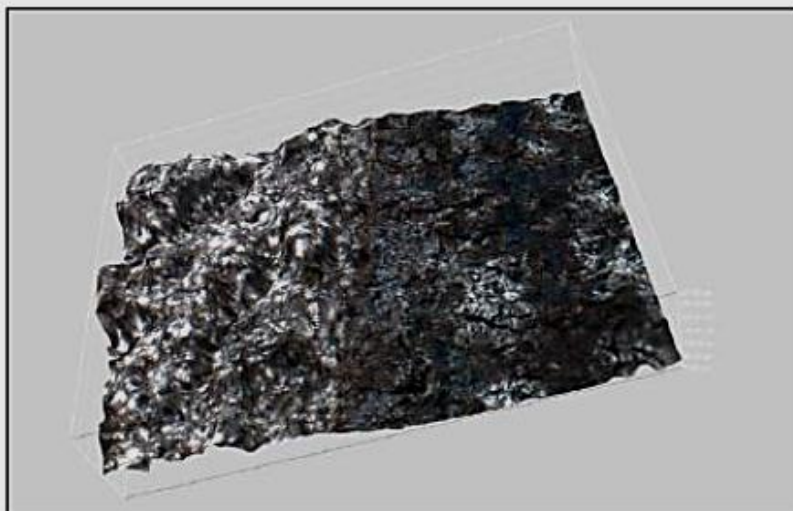


Abb. 11. Segment der Bruchfläche – abgebildet mit einem Stereomikroskop.

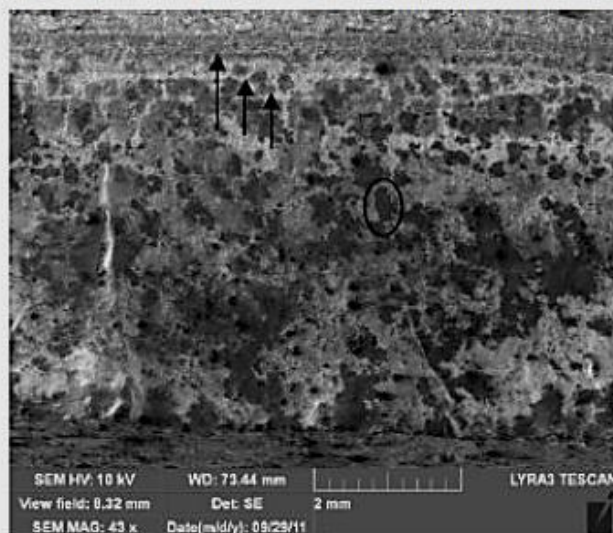


Abb. 12. Ermüdungsbruchfläche, Fortschrittslinien

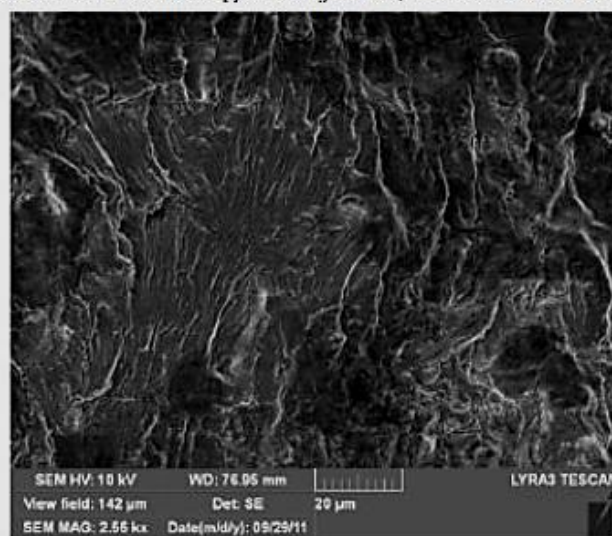


Abb. 13. Bereich auf der Ermüdungsbruchfläche ohne bedeutende Schicht aus Korrosionsprodukten.

Die Fortschrittlinien, die auf der Abbildung mit Pfeilen gekennzeichnet sind, sind nur im Übergangsbereich der Ermüdungsbruchfläche und des plastischen Bruchs ersichtlich. Die Ermüdungsbruchfläche ist mit einer Schicht von Korrosionsprodukten bedeckt, die an einigen Stellen stark ist; diese Stellen erscheinen auf Abb. 12 als dunkle Stellen. Einer dieser Bereiche ist mit einer Ellipse gekennzeichnet.

Auf Abb. 13 ist umgekehrt eine Stelle gezeigt, wo die Schicht der Korrosionsprodukt fehlt. Die Bruchfläche weist klassische fraktographische Züge des Ermüdungsbruchs des perlitisch-ferritischen Stahls auf. Die makroskopische Richtung der Rissverbreitung ist auf der Abbildung von unten nach oben.

Abb. 14 zeigt umgekehrt den Bereich mit einer starken Schicht auf der Bruchfläche. Auf der linken Seite des Fotos wird die Oberfläche beim Schließen der Risse evident gequetscht. Der Bereich hat keine bedeutenden morphologischen Merkmale. Beim Bereich auf der rechten Seite kann umgekehrt vorausgesetzt werden, dass es bei der zyklischen Beanspruchung nicht zum Kontakt der Bruchflächen kam und der Riss lokal geöffnet blieb. Die Oberfläche hat das charakteristische Aussehen einer Ermüdungsbruchfläche eines Risses, der sich im Stahl bei erhöhten Temperaturen verbreitet.

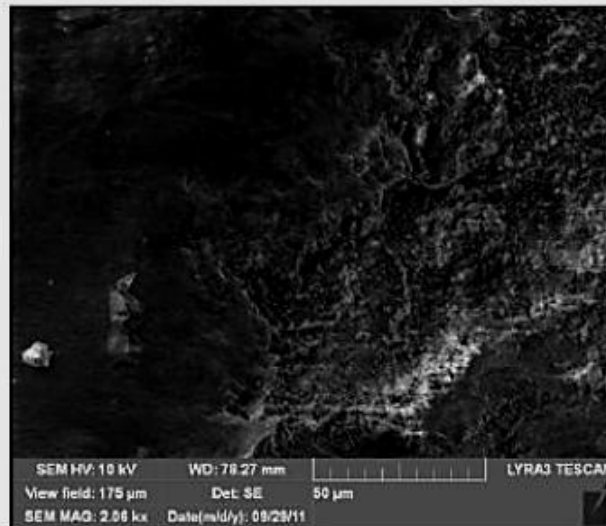


Abb. 14 Ermüdungsbruchfläche mit Schicht der Korrosionsprodukte.

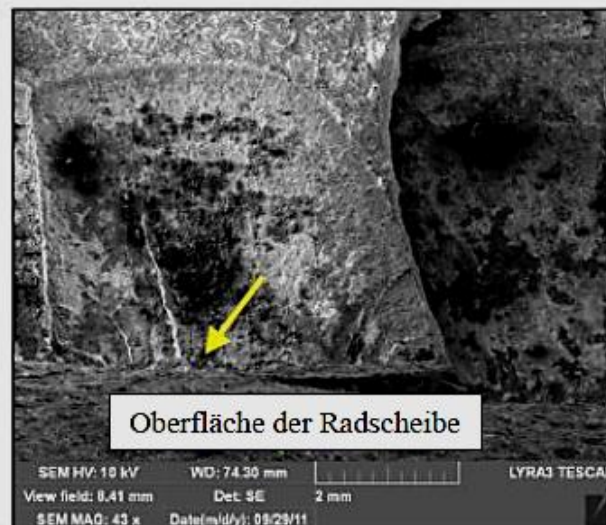


Abb. 15. Ermüdungsbruchfläche von zwei benachbarten Ermüdungsrissen.

Auf Abb. 15 ist ein Beispiel von zwei Rissen, die nahe beieinander initiiert wurden. Auf der Oberfläche der Radscheibe ist sehr gut zu sehen, dass sich der von der rechten Seite verbreitende Riss "unter" dem Riss verbreitete, der von links kommt. Der Begriff "unter" heisst, dass die Bruchfläche des Risses recht näher an der Radmitte war als der Riss links. Das wesentliche Öffnen, das an der Oberfläche der Radscheibe zu beobachten ist, ist die Folge des Kraftbruchs an der Presse. Der Pfeil indiziert die Initiierungsstelle des Risses links. An der Oberfläche der Scheibe ist an der Initiierungsstelle kein sichtbarer Defekt bzw. Spannungskonzentrator ersichtlich. Es kann also die klassische Initiierung eines Ermüdungsrisses infolge der Lokalisierung der zyklischen Plastizität vorausgesetzt werden.

Der Querschnitt der Scheibe senkrecht zur makroskopischen Bruchfläche ist auf Abb. 16 dargestellt. Auf der rechten Seite ist unter einem großen Winkel die mit PD gekennzeichnete Scheibenoberfläche zu sehen. Der mit PR gekennzeichnete Querschnitt wurde mit Nital geätzt. Auf dem Bild ist die zwei stufenförmig angeordneten Bruchflächen gut zu sehen. Die obere Bruchfläche setzt mit einem Riss fort und dringt ins Material ein. Der Pfeil kennzeichnet die Stirn des Ermüdungsrisses und den Übergang zum plastischen Bruch.

Der Querschnitt ist in einer größeren Vergrößerung auf Abb. 17 dargestellt. Oben ist die Bruchfläche zu sehen und unter ihr die perlitsch-ferritische Mikrostruktur. Noch besser ist diese Situation auf Abb. 18 und 19 zu sehen. Die Bruchfläche ist stellenweise mit einer dicken Schicht zerbrochener Korrosionsprodukte bedeckt.

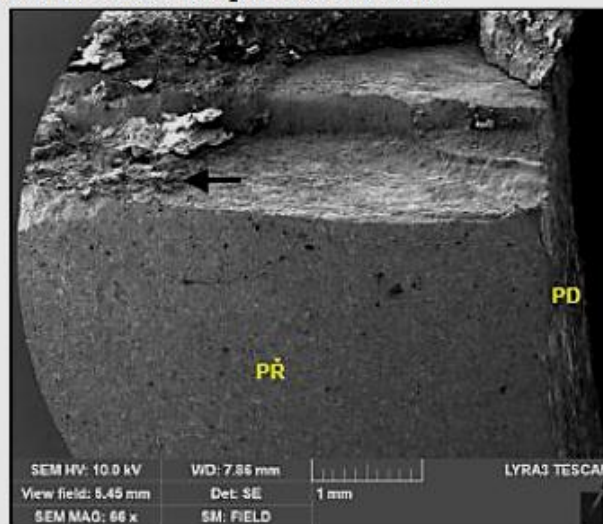


Abb. 16. Querschnitt durch die Scheibe senkrecht auf die makroskopische Bruchfläche

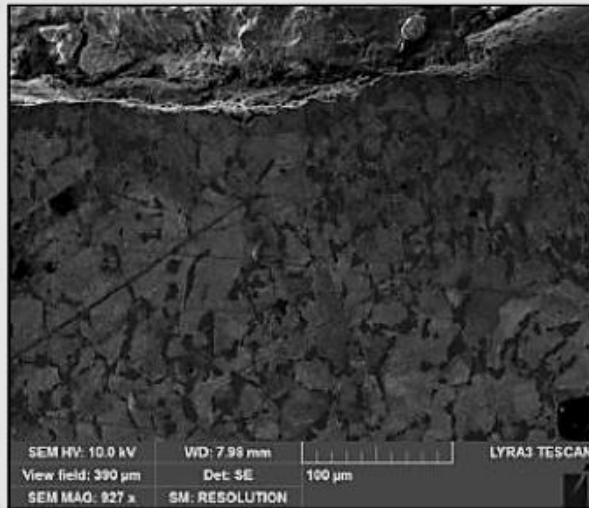


Abb. 17. Materialstruktur in der Nähe der Bruchfläche

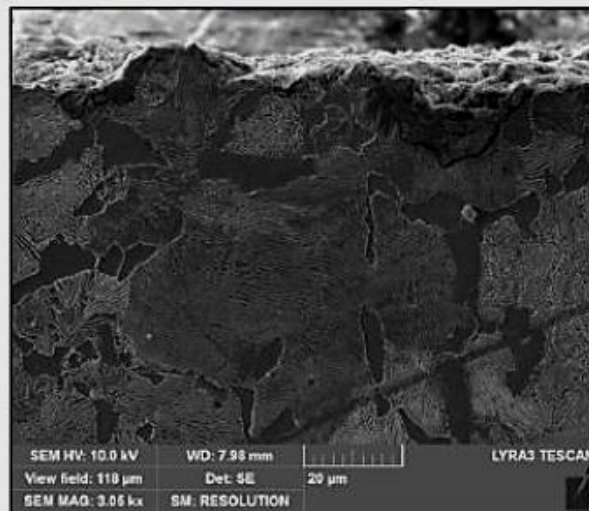


Abb. 18. Perlitisch-ferritische Struktur in der Nähe der Bruchfläche

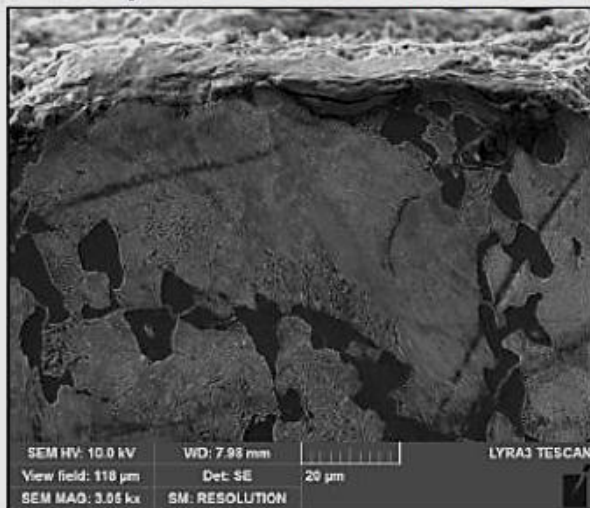


Abb. 19. Perlitisch-ferritische Struktur in der Nähe der Bruchfläche

Die Mikrostruktur des Materials ist in dem dicht am Riss anliegenden Bereich ist nicht sichtbar beeinflusst. Auf Grundlage mehrerer Aufnahmen kann geschlussfolgert werden, dass sich der Ermüdungsriss vor allem an der Grenze zwischen Ferrit und den perlitischen Kolonien verbreitet hat. Auf Abb. 20 ist die Mikrostruktur dargestellt, die der Stelle entspricht, die ca. 20 mm vom Riss entfernt liegt. Beim Vergleich der Abb. 18,19 und 20 ist ersichtlich, dass die Mikrostruktur im Bereich des Ermüdungsrisses die gleiche ist wie die in einem größeren Abstand von demselben. Es kann also daraus geschlossen werden, dass die Erhöhung der Temperatur nicht derartig war, dass sie die Degradierung der Struktur hervorgerufen hat.

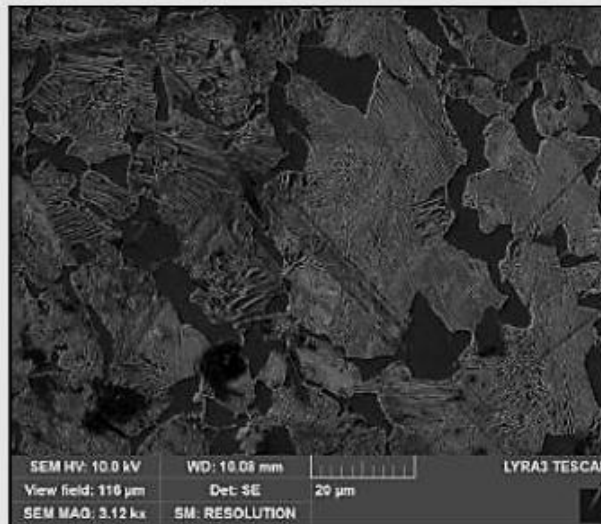


Abb. 20. Perlitisch-ferritische Struktur 10 mm vom Riss entfernt.

7. Metallographische Untersuchung der Struktur

Die Struktur des Stahls der Scheibe wurde im Bereich untersucht, der am Ermüdungsriss anliegt und der in einer großen Entfernung von ihm liegt. Auf Abb. 21 ist die Struktur nach dem Ätzen und die Betrachtung am Lichtmikroskop gezeigt. Die Ermüdungsbruchfläche ist mit einem Pfeil indiziert. Auf der Abbildung ist zu sehen, dass die Struktur in der Nähe der Bruchfläche nicht merklich beeinflusst ist. Auf den Abbildungen 22. und 23 ist die perlitisch-ferritische Struktur mit einer größeren Vergrößerung dargestellt.

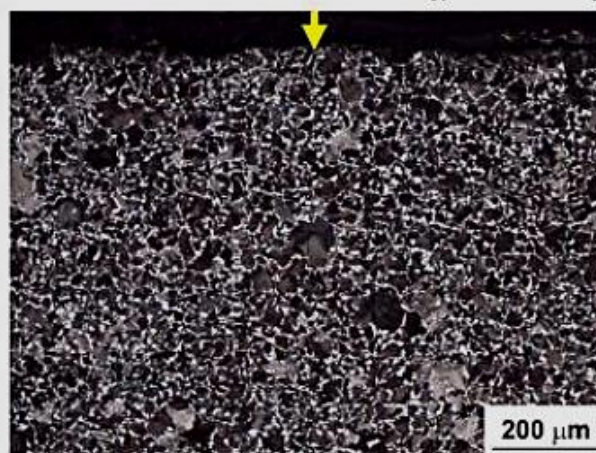


Abb. 21. Perlitisch-ferritische Struktur in der Nähe der Bruchfläche. Lichtmikroskopie.

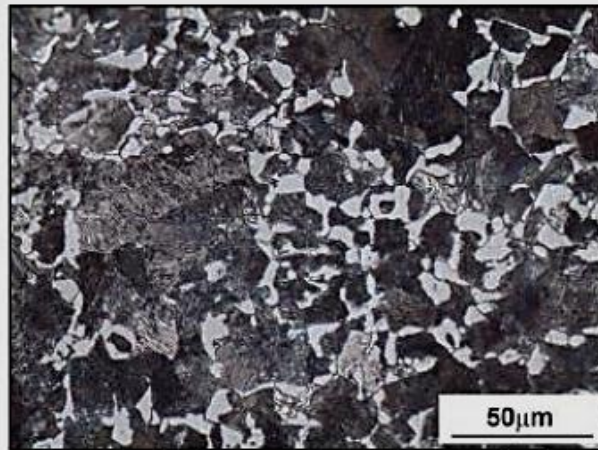


Abb. 22. Perlitisch-ferritische Struktur des Stahls der Scheibe. Lichtmikroskopie.

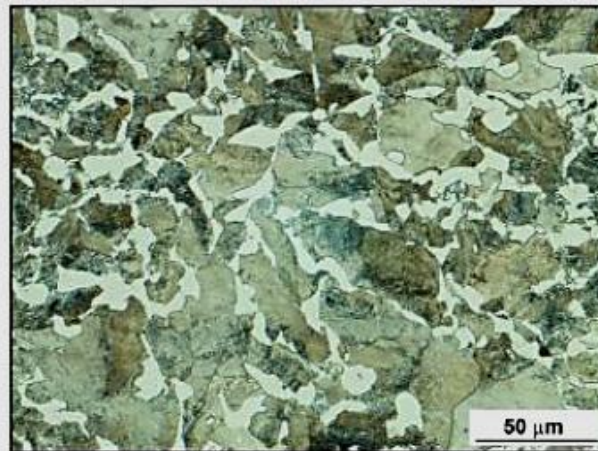


Abb. 23. Perlitisch-ferritische Struktur des Stahls der Scheibe. Lichtmikroskopie.

8. Schlussbetrachtung

Die durchgeführte Untersuchung des Bruchs führt zu dem Schluss, dass es sich um eine Beschädigung durch Initiierung und Verbreitung von Ermüdungsrissen handelt. Zur Initiierung kam es an vielen Stellen an einem beträchtlichen Teil des Innenumfangs des Rads. Die Ermüdungsbruchflächen sind mit einer Schicht von Korrosionsprodukten bedeckt, die die Rissverbreitung bei erhöhten Temperaturen indizieren. Die Risse haben sich in der perlitisch-ferritischen Struktur verbreitet, die keine ersichtlichen Veränderungen (Degradierungen) infolge der Wirkung einer erhöhten Temperatur aufweisen. An der Initiierungsstelle der Risse wurden weder Defekte der Struktur noch Spannungskonzentratoren gefunden.

Die Stelle der Rissinitiierung ist nicht die Stelle der maximalen Spannungen, die in der Scheibe infolge der mechanischen Belastung des Rads wirken. Der Grund für das Entstehen der Umfangsrisse war zweifellos die erhöhte Temperatur infolge der Bremsung (indiziert durch das Auftreten und die Verfärbung der Eisenoxide auf der Bruchfläche der Ermüdungsrisse) und das Entstehen markanter Temperaturgradienten. Berechtigt kann vorausgesetzt werden, dass die zyklische Temperaturerhöhung des Radkranzes zyklische Spannungen hervorruft, die sich auf Spannungen von der mechanischen Radbelastung superponieren. Das Spannungsmaximum im Fall des Auftretens eines Temperaturgradienten wird anders sein als im Fall der gleichmäßigen Umverteilung der Temperatur. Weiterhin kann vorausgesetzt werden, dass an einem reprofilierten Rad mit kleinerem Kranzumfang höhere

Temperaturen und Temperaturgefälle in der Radscheibe erreicht werden können als bei einem nicht profilierten Rad.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die erzielten Spannungswerte, die aufgrund von mechanischer und thermischer Belastung hervorgerufen wurden, den Spannungsamplituden entsprechen werden, die die Initiierung und Verbreiterung der Ermüdungsrisse in der gegebenen peritisch-ferritischen Struktur zur Folge haben.

Am gelieferten Material wurden folgende mechanische Haupteigenschaften bestimmt:
Scheibenmaterial: $R_m = 691 \text{ MPa}$, Kranz: $R_m = 800 \text{ MPa}$, $KU = 30 \text{ J}$.

Die erzielten Festigkeitswerte im Kranz sind im Vergleich mit den Abnahmewerten (siehe Anhang) niedriger. Diese Tatsache ist aufgrund der Verringerung der Dicke des Radkranzes verursacht. Bei Einhaltung der Entnahmebedingungen laut Norm UIC 812-3, d. h. 15 mm von der Fahrfläche, ist die Probeentnahme näher an der Abnutzungsnut als bei einem neuen Rad.

Anhang

SOUPISKA K PŘEJIMCE ě.
LISTE ZUR GÜTEPRÜFUNG Nr.:

119/01-42

BONATRANS a.s.
BOHUMÍN

Přej: *CS*

Bezručova 300
735 93 Bohumín
Tel.: +420 (69 608) 3272
Fax.: +420 (69 608) 2804

Odběratel Käufer <i>Infrastruktur GmbH, Aktionär</i>				Výrobek Erzeugnis Monoblock <i>+ 720</i>				Jakost Stahlsort R 7 T			
Zakázka č. Auftrag.Nr.: <i>45.5001/11</i>				Výkres č. Zeichnung Nr. <i>L12.LP</i>							
Objednávka č. Bestellung. Nr.				Technické podmínky Technische Lieferbeding. UIC 812-3 TP TLB 12-98							
Předpis Vorschrift	Re N/mm ²	Rm N/mm ²	A %	Ku(v) J	HB	Rozměry zkušebních tělísek Prüfkörpermasse		Rm	Ku(v)		
	Inform.	v. 820-940 d. max. 760	14 16	Inform. 15	-	ø 10 mm	U 5				
Chem. analýza Chem. Analyse	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	
<i>32149</i>	<i>0,51</i>	<i>0,14</i>	<i>0,70</i>	<i>0,016</i>	<i>0,008</i>	<i>0,06</i>	<i>0,03</i>	<i>0,06</i>	<i>0,05</i>	<i>0,009</i>	
Tavba Schmelztae	Počet ks v tavbě Stückzahl in der Schmelztae	Pod číslo výrobku Lfd.Nr.	Počet zkoušek Anzahl der Prüfungen pro Schmelztae		Tahová zk. Zugversuch	Ku(v)	HB	Makro	Mikro	Vzorek ch. a. Stückanalyse	
<i>32149</i>	<i>363</i>	<i>39</i>	<i>2</i>	<i>3+3 (-20)</i>	<i>1</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>1</i>		
<i>+</i>		<i>396</i>	<i>2</i>	<i>3+3 (-20)</i>	<i>1</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>		
Doplňující údaje Ergänzungsangaben: Směr vnitřního pnutí 100/1 mm. Průměrná hodnota tvrdosti všech tří bodů B ve vzdálenosti 35 mm od jmen.průměru oprac. kola musí být 230-275 HB. Zkouška ultrazvukem 100% dle PN 22-17-92. (UIC)											
BONATRANS a.s. TECHNICKÁ KONTROLA <i>Vedz</i>				ČD 54 ČESKÉ DRÁHY Závod pro Technický servis <i>Bohumín: 14. 8. 2011</i> <i>CS</i>							
Úřední razítko Dienstempel	TK a ŘJ závodů TK u QS Radčofábetreib			Úřední Razítko Dienstempel			Zástupce odběratele Güteprüfer				

60-023