



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST
Service suisse d'enquête de sécurité SESE
Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISI
Swiss Transportation Safety Investigation Board STSB

Schlussbericht

der Schweizerischen

Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST

über den Anprall einer Zugskomposition beim Anfahren an eine stehende Komposition

vom 31. Dezember 2020

in Belp (BE)

Reg.-Nr. 2020123101

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST
3003 Bern
Tel. +41 58 466 33 00, Fax +41 58 466 33 01
info@sust.admin.ch
www.sust.admin.ch

Allgemeine Hinweise zu diesem Bericht

Dieser Bericht wurde ausschliesslich zum Zweck der Verhütung von Unfällen und schweren Vorfällen beim Betrieb von Eisenbahnen, Seilbahnen und Schiffen erstellt. Gemäss Artikel 15 des Eisenbahngesetzes vom 20. Dezember 1957 (EBG), Stand am 1. Januar 2022 (SR 742.101), sind Schuld und Haftung nicht Gegenstand der Untersuchung.

Es ist daher auch nicht Zweck dieses Berichts, Schuld- und Haftungsfragen zu klären.

Alle Personenbezeichnungen in diesem Bericht sind in der männlichen Form gehalten und gelten für die die Funktion ausübende Person, ungeachtet ihres Geschlechts.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Überblick	5
Untersuchung	5
Kurzdarstellung	6
Ursache	6
Sicherheitsempfehlungen und Sicherheitshinweise	6
1 Sachverhalt	7
1.1 Ort des Ereignisses	7
1.2 Ablauf des Ereignisses	7
1.3 Schäden	8
1.3.1 Personen	8
1.3.2 Infrastruktur	8
1.3.3 Fahrzeuge	8
1.4 Beteiligte und betroffene Personen	8
1.4.1 Lokführer	8
1.5 Beteiligte und betroffene Unternehmen	9
1.5.1 Infrastrukturbetreiberin	9
1.5.2 Eisenbahnverkehrsunternehmen	9
1.5.3 Fahrzeughalter	9
1.5.4 Fahrzeughersteller	9
1.6 Infrastruktur	10
1.6.1 Bahnanlage	10
1.6.2 Stellwerk und Leittechnik	10
1.7 Fahrzeuge	11
1.7.1 Beschreibung	11
1.7.2 Sicherungssysteme Fahrzeuge	11
1.7.3 Vereinfachte Beschreibung Leittechnik	11
1.7.4 Vereinfachte Beschreibung Bremskonzept	11
1.7.5 Vereinfachte Beschreibung der Bremsbedienung	12
1.7.6 Spurkranzschmierung	13
1.7.7 Feststellung	13
1.8 Kommunikation	13
1.9 Auswertung der Datenaufzeichnung	13
1.9.1 Fahrdaten	13
1.9.2 Stellwerkdaten	14
1.9.3 Gesprächsaufzeichnung	14
1.9.4 Video	14
1.10 Besondere Untersuchungen	15

1.10.1	Wetter, Sichtverhältnisse, Schienenzustand	15
1.10.2	Unfallverursachender Triebzug	15
1.10.3	Typgleiche Triebzüge	17
1.10.4	Bremsbeläge	18
1.10.5	Fettrückstände auf den Laufflächen	19
1.10.6	Impulsgeber	19
1.10.7	Infrastruktur	19
1.10.8	Elektromagnetische Strahlung.....	19
1.10.9	Bremskraftmessung.....	20
1.10.10	Dynamische Bremsversuche.....	20
1.10.11	Softwareanpassungen während der Einsatzdauer.....	23
1.11	Ähnliche Ereignisse	24
1.12	Zwischenbericht zum Anprall in Belp	24
2	Analyse	26
2.1	Technische Aspekte	26
2.1.1	Bremsversuchsfahrten.....	26
2.1.2	Einflüsse auf den Schlupf zwischen Rad und Schiene.....	27
2.1.3	Bremsausrüstung	27
2.1.4	Bremsbeläge	27
2.1.5	Weitere Feststellungen bei den Bremsen.....	28
2.2	Organisatorische Aspekte.....	28
2.3	Betriebliche Aspekte	28
2.4	Menschliche Aspekte.....	29
2.5	Zusammentreffen von Zuständen	29
3	Schlussfolgerungen.....	30
3.1	Befunde	30
3.1.1	Technische Aspekte	30
3.1.2	Organisatorische Aspekte	30
3.1.3	Betriebliche oder prozessuale Aspekte	30
3.1.4	Menschliche Aspekte.....	31
3.1.5	Bereits umgesetzte Optimierungen	31
3.2	Ursachen	31
4	Sicherheitsempfehlungen, Sicherheitshinweise und seit dem Unfall getroffene Massnahmen	32
4.1	Sicherheitsempfehlungen	32
4.2	Sicherheitshinweise	33
4.2.1	Verglasung Bremsbeläge vermeiden	33
4.3	Seit dem Unfall getroffene Massnahmen.....	33

Zusammenfassung

Überblick

Verkehrsmittel Eisenbahn

Beteiligte Unternehmen

Eisenbahnverkehrsunternehmen BLS AG (BLS), Bern

Infrastrukturbetreiberin BLS Netz AG, Bern

Weitere Unternehmen Stadler AG (Stadler), Bussnang

Beteiligte Fahrzeuge Einfahrende Komposition RABe 515 011 (Mutz), BLS
Stehende Komposition RABe 515 016, BLS

Ort Belp (BE)

Datum und Zeit 31. Dezember 2020, 16:43 Uhr

Untersuchung

Am 31. Dezember 2020 um 17:37 Uhr traf die Meldung über den Anprall einer einfahrenden Zugskomposition beim Anfahren an eine stehende Komposition in Belp beim Untersuchungsdienst der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) ein. Es wurde eine Untersuchung eröffnet.

Für die Untersuchung standen zur Verfügung:

- Bestandsaufnahme auf der Unfallstelle;
- Fotos, Videoaufzeichnungen;
- Gutachten zu Fettspuren auf den Radlaufflächen und Verglasung der Bremsbeläge;
- Meteorologische Daten;
- Fahrdaten des Zuges;
- Kartenmaterial;
- Gleispläne;
- Ergebnisse von Versuchsfahrten;
- Berichte der BLS;
- Berichte des Zugherstellers;
- Befragungen der Beteiligten und Betroffenen.

Die SUST verlangte dynamische Bremsversuche mit Vergleich der Softwareversionen mit Stand bei der bremstechnischen Prüfung im Jahr 2012 und dem Stand Ende des Jahres 2020. Sowohl die BLS AG wie auch die Stadler AG führten Versuche und Untersuchungen durch. Unter Leitung der BLS wurde ein regelmässiger Austausch zwischen dem Betreiber des Zuges, dem Hersteller des Zuges, dem Hersteller des Gleitschutzes sowie der Aufsichts- und der Untersuchungsbehörde geführt.

Kurzdarstellung

Am 31. Dezember 2020 um 16:43 Uhr sollte im Bahnhof Belp eine Zugskomposition mit einer im Einfahrgleis wartenden, baugleichen Komposition zusammengekuppelt werden. Der einfahrende Zug brachte eine ungenügende Bremsleistung auf und prallte in die stehende Komposition. Es wurde niemand verletzt.

Ursache

Der Anprall beim Anfahren an eine stehende Komposition am 31. Dezember 2020 in Belp ist auf das Zusammentreffen mehrerer Umstände zurückzuführen, die das Bremsvermögen des Zuges derart ungünstig beeinflussten, dass der zur Verfügung stehende Bremsweg nicht ausreichte, um den Zug rechtzeitig anzuhalten.

Zum Unfall haben beigetragen:

- Das gleichzeitige Vorhandensein von schmieriger Schiene durch Salznässe und Schmierfett auf den Radlaufflächen führte zu einem erhöhten Schlupf zwischen Rad und Schiene.
- Die Regelung der Bremssysteme stellte unter den Bedingungen schlechter Adhäsionsverhältnisse nicht sicher, dass der Triebzug den vorgesehenen Bremsweg einhalten konnte.
- Die Bremsbeläge hatten nicht von Beginn weg den vollen Reibwert.

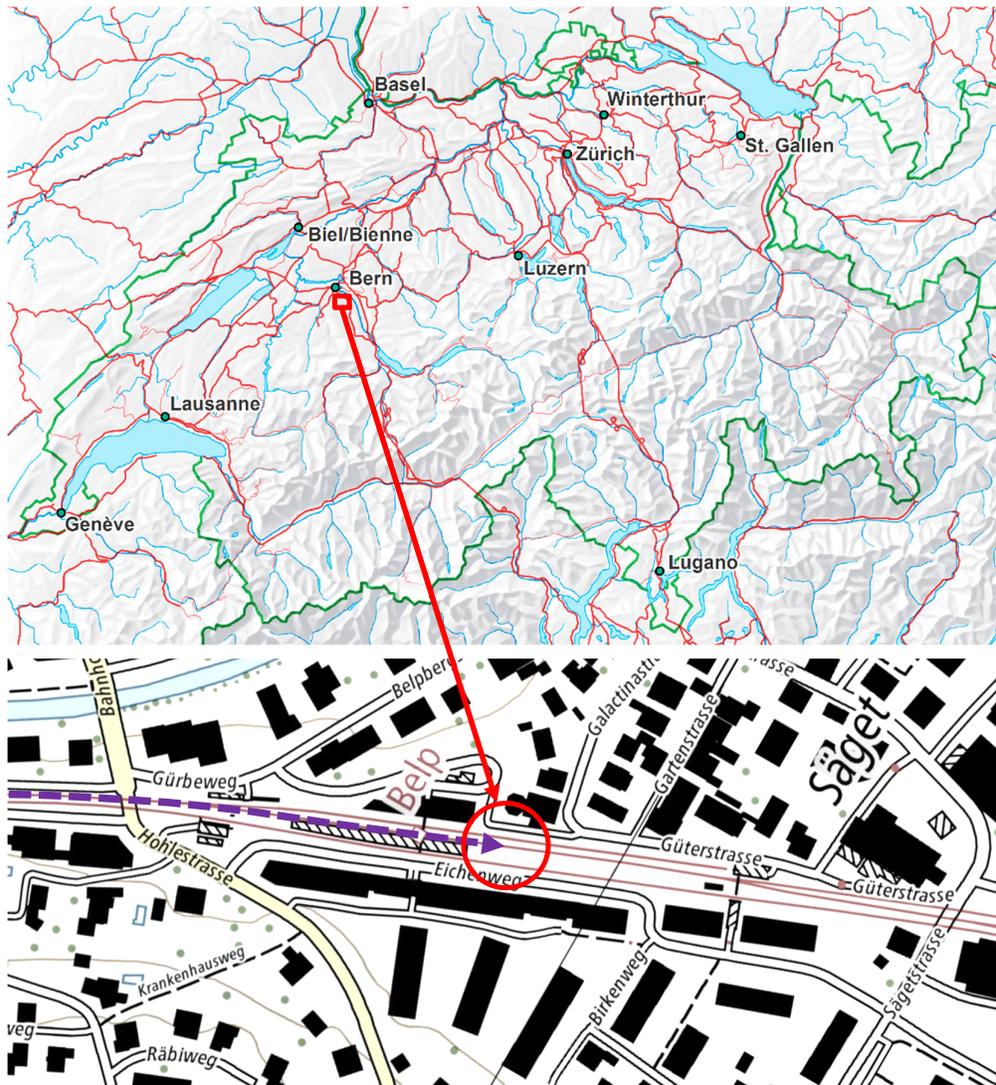
Sicherheitsempfehlungen und Sicherheitshinweise

Mit diesem Bericht wird keine Sicherheitsempfehlung ausgesprochen. Es wird auf eine mit dem [Zwischenbericht Reg.-Nr. 2020123101](#) ausgesprochene Sicherheitsempfehlung verwiesen. Diese Sicherheitsempfehlung ist bereits umgesetzt.

Ergänzend zu den bereits umgesetzten Massnahmen wird ein Sicherheitshinweis ausgesprochen.

1 Sachverhalt

1.1 Ort des Ereignisses



Abbildungen 1 und 2: Übersichtskarten zum Ort des Unfalls. Die von Belp Steinbach ein-fahrende Komposition (Violett) kollidiert in Belp im Gleis 2 nach dem Ende des Perron-dachs mit der stehenden Komposition (roter Kreis).

Quelle der Karten: Bundesamt für Landestopografie.

1.2 Ablauf des Ereignisses

Am Abend des 31. Dezember 2020, etwa um 16:40 Uhr, hielt ein Personenzug bei der Haltestelle Belp Steinbach. Nachdem im Bahnhof Belp eine andere Zugskomposition von Gleis 1 nach Gleis 2 umgestellt wurde, ging das Einfahrtsignal auf Fahrt mit der Signalisation einer besetzten Einfahrt. Der von Belp Steinbach ein-fahrende Zug sollte im Gleis 2 in Belp an die dort aufgestellte Zugskomposition anfahren.

Der Lokführer des Personenzuges beschleunigte ab Belp Steinbach auf 40 km/h. Rund 230 m vor der stehenden Komposition leitete er eine Bremsung mit der

elektrischen Bremse ein. Aufgrund ungenügender Bremswirkung leitete der Lokführer rund 121 m vor der stehenden Komposition eine Schnellbremsung ein und betätigte kurz darauf die Nothalt-Schlagtaster. Die Bremswirkung blieb jedoch weiterhin ungenügend und der Personenzug prallte mit 23 km/h auf die stehende Komposition.

Es wurden keine Personen verletzt. Die stehende Komposition entgleiste mit einer Achse. An beiden Kompositionen entstanden diverse Schäden.



Abbildung 3: Verkeilte Kompositionen nach dem Anprall.

1.3 Schäden

1.3.1 Personen

Keine

1.3.2 Infrastruktur

Keine

1.3.3 Fahrzeuge

Starke Frontbeschädigungen, eine Achse entgleist.

1.4 Beteiligte und betroffene Personen

1.4.1 Lokführer

Person	Jahrgang 1973, Anstellung bei BLS Dienstort Bern
--------	--

Berechtigung BAV¹-Ausweis der Kategorie B zum Ausführen aller Rangierbewegungen und zum Führen aller Züge vorhanden und gültig. Bescheinigung zum Befahren der BLS-Infrastruktur und zum Bedienen des Triebzugs vom Typ RABe 515 vorhanden.

Der Lokführer ist auch in der Lokführerausbildung tätig. An diesem Arbeitstag war es seine erste Fahrt. Ab Bern bis Belp Steinbach stellte er keine Auffälligkeiten fest. Während des Bremsvorgangs in Belp stellte er keine der bei einem Gleiten des Zuges feststellbaren Anzeichen wie Längsruckeln oder typische Geräusche der Aktivität des Gleitschutzes fest.

1.5 Beteiligte und betroffene Unternehmen

1.5.1 Infrastrukturbetreiberin

BLS Netz AG, Bern

1.5.2 Eisenbahnverkehrsunternehmen

BLS AG, Bern

1.5.3 Fahrzeughalter

BLS AG, Bern

1.5.4 Fahrzeughersteller

Stadler AG, Bussnang

¹ BAV: Bundesamt für Verkehr

1.6 Infrastruktur

1.6.1 Bahnanlage

1.6.1.1 Beschreibung

Die Distanz zwischen der Haltestelle Belp Steinbach und dem Bahnhof Belp beträgt rund 800 m. Am Perronende von Belp Steinbach stehen die Einfahrsignale von Belp. Unmittelbar danach folgt ein erster Bahnübergang. Ein zweiter Bahnübergang befindet sich rund 70 m vor dem Perronanfang von Belp.

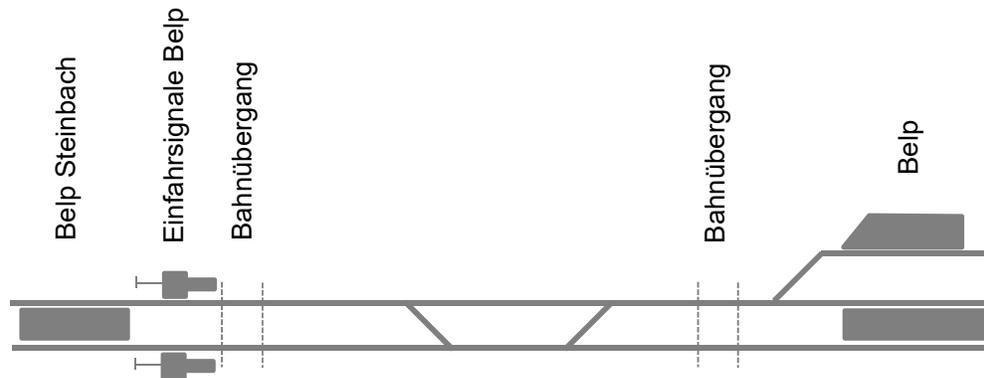


Abbildung 4: Skizze Bahnanlage Belp Steinbach und Belp.

Zwischen der Haltestelle Belp Steinbach und Belp liegt ein Höhenunterschied von rund 2 m. Das führt zu einem leichten, durchschnittlichen Gefälle von rund 2.5 ‰ gegen Belp.

1.6.1.2 Feststellung

Die Gestaltung der Infrastruktur hatte keinen Einfluss auf den Ereignisablauf.

1.6.2 Stellwerk und Leittechnik

Die Art und Ausführung des Stellwerks und der Leittechnik hatten keinen Einfluss auf den Ereignisablauf. Dem Lokführer wurde am Einfahrsignal von Belp die Belegung des Gleises mit anderen Fahrzeugen angezeigt.

1.7 Fahrzeuge

1.7.1 Beschreibung

Bei den involvierten Zugkompositionen handelte es sich um Triebzüge des Typs RABe 515 (Abbildung 5).

Ein solcher Triebzug besteht aus beidseitig je einem Endwagen (EW) und zwei Mittelwagen (MW). Er ist 103 m lang und 217 t schwer.



Abbildung 5: Triebzug vom Typ RABe 515.

1.7.2 Sicherungssysteme Fahrzeuge

Die Sicherungssysteme der beteiligten Triebzüge hatten keinen Einfluss auf den Ereignisablauf.

1.7.3 Vereinfachte Beschreibung Leittechnik

Die Leittechnik des Triebzugs basiert auf dem modularen Selectron Steuerungssystem. Die Fahrzeugleitgeräte kommunizieren über Ethernet- und CAN-BUS mit den im Fahrzeug dezentral verteilten anderen Geräten, wie Antriebsleitgeräte (Stromrichter) oder Wagenleitgeräten.

Zwischen den Tests für die bremstechnische Prüfung (Bericht vom 18.09.2012) bzw. den Tests für die Typenzulassung (BAV, 17.12.2013) und dem Datum des Unfalls (31.12.2020) wurde die Software im Bereich der Bremsregelung mehrmals angepasst.

1.7.4 Vereinfachte Beschreibung Bremskonzept

Der Triebzug verfügt für den Fahrbetrieb über drei Bremssysteme: Eine elektrische Bremse, eine elektropneumatische Bremse (EP) und eine indirekte Bremse. Zusätzlich sind Magnetschienenbremsen verbaut. Diese werden erst ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h aktiviert. Da die Geschwindigkeit beim Ereignis nicht mehr als 40 km/h betrug und sie daher nicht wirksam sein konnten, wird nicht näher auf die Magnetschienenbremsen eingegangen.

Die elektrische Bremse wirkt auf die vier Motordrehgestelle (EW 100 und EW 600). Reicht die elektrische Bremskraft nicht aus, wird die elektropneumatische Bremse der Motor- und der Laufdrehgestelle (MW 200 und MW 400) durch die Fahrzeug- respektive Wagenleitgeräte und einen elektropneumatischen Regler (EP-Regler) angesteuert. So wird eine fehlende elektrische Bremskraft mit pneumatischer Bremskraft ergänzt. Kurz vor Stillstand des Triebzuges werden die pneumatischen Bremsen der End- und Mittelwagen immer aktiviert.

Die indirekte Bremse wird durch den Lokführer über eine Druckabsenkung der Hauptluftleitung angesteuert.

Alle Bremssysteme verfügen über eine Gleitschutzfunktion. Im Fall der elektrischen Bremse ist diese in die Fahrzeug- und Stromrichtersteuerung integriert. Für die pneumatische Bremse verfügt jeder Wagen über ein unabhängiges Gleitschutzsystem, das bei ungünstiger Adhäsion (Gleiten einer Achse) den Druck auf den Bremszylinder reguliert, bis die Achsgeschwindigkeit wieder stabilisiert wird.

- • E-Bremskraft
- • Pneumatische Bremskraft

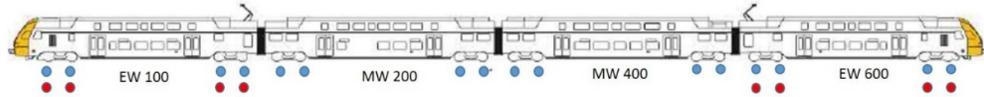


Abbildung 6: Verteilung der elektrischen Bremse (rot) und der elektropneumatischen bzw. der indirekten Bremse (blau) (Quelle: Betriebshandbuch Stadler AG).

Bei der erreichten Geschwindigkeit von 40 km/h würde ein Bremsverhältnis von 135 % erwartet.

1.7.5 Vereinfachte Beschreibung der Bremsbedienung

Eine Bremsung wird mit dem Fahr-/Bremschalter durchgeführt. Sie dient der Geschwindigkeitsreduktion auf die vorgegebene Geschwindigkeit oder bis zum Stillstand. Dabei wird primär die elektrische Bremse aufgeschaltet. Reicht deren Bremskraft nicht aus, wird zusätzlich die elektropneumatische Bremse aufgeschaltet. Durch Kippen des Fahr-/Bremschalters in die Endstellung wird die Schnellbremsung aktiviert. Dabei wirkt die elektrische Bremskraft weiterhin.

Mit dem Bremshebel wird der ganze Triebzug rein pneumatisch gebremst (indirekte Bremse). Durch Kippen des Bremshebels in die Endstellung wird eine Schnellbremsung ausgelöst.

Bei der Betätigung der Nothalt-Schlagtaster wird der Hauptschalter ausgelöst. Während bei Betätigung des rechten Nothalt-Schlagtasters die Hauptluftleitung über ein elektropneumatisches Ventil entleert wird, erfolgt über die Betätigung des linken Nothalt-Schlagtasters die Entleerung der Hauptluftleitung rein mechanisch. Dabei wird die elektrische Bremse automatisch ausgeschaltet. Der Triebzug bremst dann rein pneumatisch.

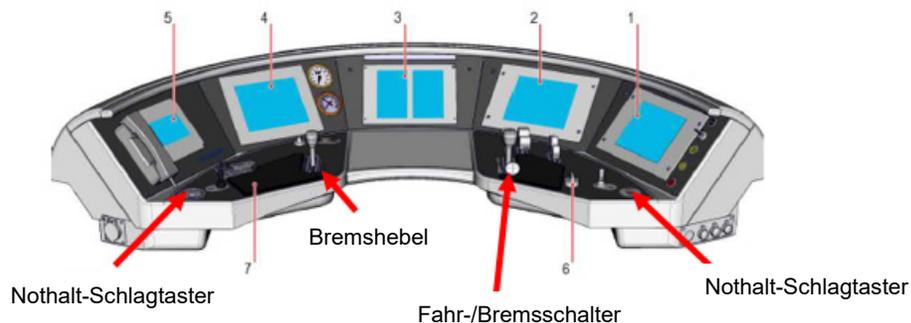


Abbildung 7: Bedienelemente auf dem Führertisch. (Quelle: Betriebshandbuch Stadler AG)

1.7.6 Spurkranzschmierung

Die Spurkranzschmierung ist bei den Motordrehgestellen 1 der Endwagen eingebaut und wird vom Fahrzeugleitgerät in Abhängigkeit der Geschwindigkeit nach zurückgelegter Wegstrecke oder über Kurvensensor gesteuert. In Abhängigkeit der Fahrrichtung wirkt die Spurkranzschmierung der Achse 1 oder 2 der Endwagen. Die Steuerung über den Kurvensensor schmiert bei kurvenreichen Strecken häufiger als die reine Steuerung in Abhängigkeit der Wegstrecke.

1.7.7 Feststellung

Am Ereignisort zeigten die Bremsanzeigeeinrichtungen des unfallverursachenden Triebzugs bei jedem Drehgestell auf beiden Fahrzeugseiten eine angelegte pneumatische Bremse (Fenster Rot mit schwarzem Punkt). Der Druck in der Hauptluftleitung betrug 0 bar. Die Nothalt-Schlagtaaster wurden betätigt, der Fahr-/Bremschalter war in Stellung «0», der Bremshebel in Stellung «gelöst».

Weitere Untersuchungen des unfallverursachenden Triebzugs wurden einige Tage nach dem Ereignistag in der Werkstätte Bönigen durchgeführt. Die Feststellungen dazu sind in Ziffer 1.10.2 aufgeführt.

1.8 Kommunikation

Es fanden keine Gespräche in unmittelbarem Zusammenhang mit der Entstehung des Ereignisses statt.

Über ein Zusatzsignal am Einfahrsignal wurde dem Lokführer mitgeteilt, dass sein Einfahrgeleis in Belp mit anderen Fahrzeugen besetzt ist.

1.9 Auswertung der Datenaufzeichnung

1.9.1 Fahrdaten

1.9.1.1 Fahrdaten unfallverursachender Triebzug

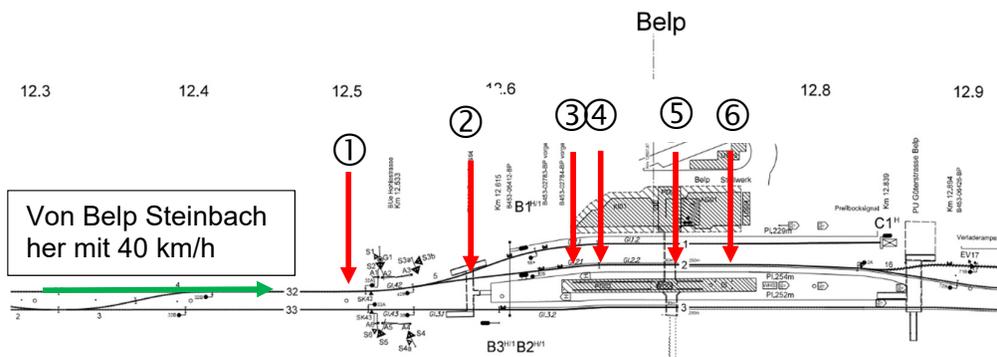


Abbildung 8: Fahrdatenaufzeichnung (Quelle Stellwerkplan: BLS, bearbeitet SUST).

Legende:

Der Stellwerkplan ist nicht massstabgetreu, weshalb die Abstände nicht die korrekten Proportionen aufweisen.

- ① 230m vor dem Stillstand wird bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h mit dem Fahr-/Bremschalter die elektrische Bremse aufgeschaltet.
- ② 161 m vor dem Stillstand betätigt der Lokführer mittels Fahr-/Bremschalter die elektropneumatische-Bremse. Die Geschwindigkeit beträgt zu diesem Zeitpunkt 31 km/h.

- ③ 121 m vor dem Stillstand leitet der Lokführer mittels Fahr-/Bremsschalter kurzzeitig eine Schnellbremsung ein. Die Hauptleitung wird augenblicklich abgesenkt. Die Geschwindigkeit beträgt zu diesem Zeitpunkt 31.6 km/h.
- ④ 103 m vor dem Stillstand leitet der Lokführer mittels des Fahr-/Bremsschalters nochmals eine Schnellbremsung ein und belässt ihn nun in dieser Stellung. Die aufgezeichnete Geschwindigkeit beträgt zu diesem Zeitpunkt 19.6 km/h. Die effektive Geschwindigkeit dürfte höher gewesen sein, da die aufgezeichnete Geschwindigkeit anschliessend wieder ansteigt.
- ⑤ 51 m vor dem Stillstand betätigt der Lokführer den rechten Nothalt-Schlagtaster. Die aufgezeichnete Geschwindigkeit beträgt zu diesem Zeitpunkt 29.4 km/h. Der Hauptschalter löst aus. Die elektrische Bremse fällt ab, es entsteht ein kurzer Zugkraftpeak.
- ⑥ Aufgrund der Distanz von 7.6 m, um die das stehende Fahrzeug zurückgeschoben wurde, ist davon auszugehen, dass der Anprall mindestens um diese Distanz vor dem Stillstand erfolgte. Evtl. erfolgte dieser etwas früher, da sich zuerst die Kupplungen berührt haben, bevor die Wagenkästen aufeinander prallten. Die Aufprallgeschwindigkeit betrug 23.6 km/h.

Die berechnete Bremsverzögerung betrug -0.2 m/s^2 .

Die Gleitschutzsysteme regulierten die Bremssysteme häufig und in hohem Masse.

Die Aufzeichnungen der Bremszylinderdrücke in den Mittelwagen sowie der Zug- und Bremskräfte konnten nicht ausgewertet werden. Anlässlich der Versuchsfahrten zeigte sich, dass die Werte nicht korrekt aufgezeichnet wurden.

1.9.1.2 Fahrdaten stehender Triebzug

Die Fahrdaten des Umstellmanövers von Gleis 1 nach Gleis 2 geben keine Hinweise auf kritische Adhäsionsverhältnisse. Zug- und Bremskräfte können bis zu 50 % auf die Schienen übertragen werden.

Das Fahrzeug wird beim Aufprall augenblicklich auf 9.4 km/h beschleunigt und über eine Distanz von 7.6 m zurückgeschoben.

1.9.2 Stellwerkdaten

Aus den Aufzeichnungen geht hervor, dass das Einfahrsignal von Belp eine besetzte Einfahrt für den unfallverursachenden Triebzug anzeigte.

1.9.3 Gesprächsaufzeichnung

Während der Fahrt des unfallverursachenden Triebzugs von Belp Steinbach nach Belp erfolgten keine Gespräche.

1.9.4 Video

Die Videoaufzeichnungen der Perronkameras von Belp zeigen das Umstellmanöver vom später aufgestellten und stehenden Triebzug und die Einfahrt sowie den Anprall vom unfallverursachenden Triebzug. Es ist zu erkennen, dass kurz vor Einfahrt des unfallverursachenden Triebzugs leichter Schneefall einsetzte.

1.10 Besondere Untersuchungen

1.10.1 Wetter, Sichtverhältnisse, Schienenzustand

Es war bewölkt mit Temperaturen um den Gefrierpunkt. Kurz vor dem Anprall setzte leichter Schneefall ein. Zuvor waren die Schienen trocken. Kurz vor der einsetzenden Dämmerung war es noch hell, die Sicht war nicht eingeschränkt.

1.10.2 Unfallverursachender Triebzug

Der unfallverursachende Triebzug wurde nach einer Stillstandszeit von 3 Wochen in der Werkstätte Bönigen in havariertem Zustand im Januar 2021 untersucht. Das Aufstellen des Triebzuges für die Untersuchung erfolgte mittels geschleppter Rangierfahrt und mit Benutzung der indirekten Bremse. Der Triebzug wurde nach der Reparatur im Mai 2021 erneut untersucht.

Feststellung während der Untersuchung im Januar 2021:

Die Brems scheiben am EW 600 (zugführendes Fahrzeug beim Ereignis) waren nicht gleichmässig über die gesamte Breite durch die Bremsbeläge beaufschlagt.

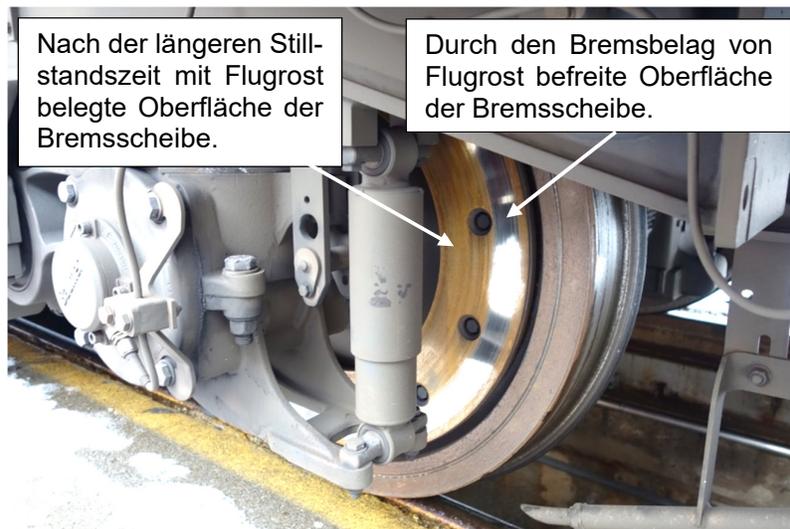


Abbildung 9: Ungleichmässige Beaufschlagung der Brems scheibe durch die Bremsbeläge auf dem zugführenden EW 600.

Bei zwei Achsen an einem Motordrehgestell waren einzelne Bremsbeläge nicht formschlüssig zur Bremsscheibe platziert.



Abbildung 10: Bremsbelag nicht formschlüssig zur Bremsscheibe (Markierung).

Die von einem Mittelwagen entnommenen Bremsbeläge zeigten Verglasungen auf.



Abbildung 11: Verglasung auf einem Bremsbelag (glänzende Stellen, rote Markierung).

Die Radlaufflächen nahezu aller Achsen wiesen einen deutlichen Fettfilm auf.

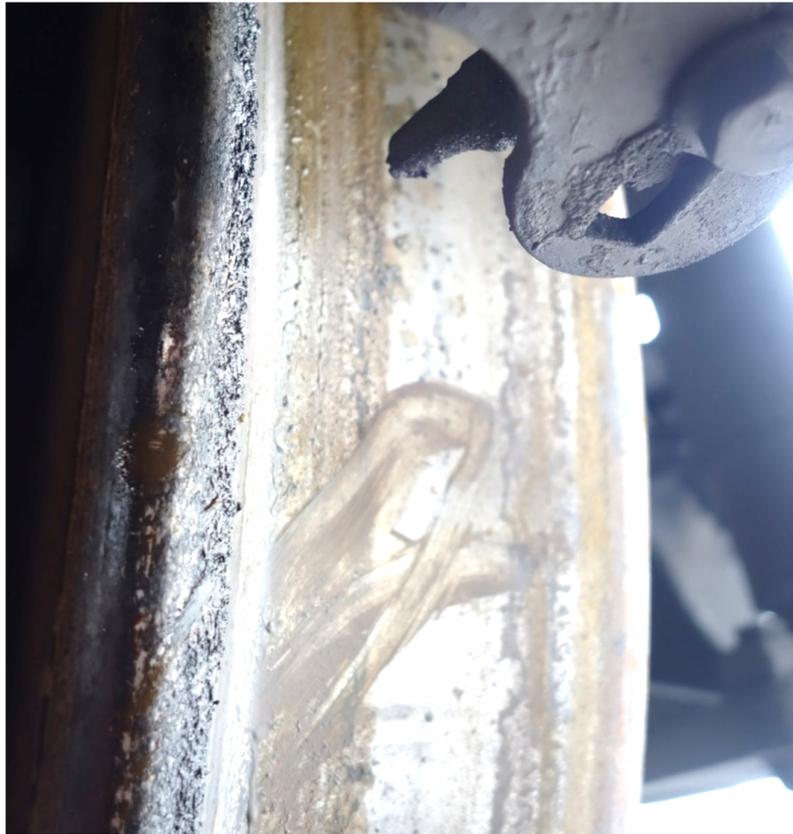


Abbildung 12: Deutlicher Fettfilm auf einer der Radlaufflächen.

1.10.3 Typgleiche Triebzüge

Im Januar 2021 wurden in der Werkstätte von Givisiez mehrere typgleiche Triebzüge untersucht.

Feststellungen:

Bei einem Triebzug wurden die Bremsbeläge untersucht. Die Bremsbeläge wiesen Verglasungen auf. Es waren noch dieselben Bremsbeläge, wie bei der Erstausslieferung des Triebzuges. Dieser hatte bisher rund 180 000 km zurückgelegt und die Abnutzung der Bremsbeläge lag bei 1.2 mm. Acht Bremsbeläge wurden für weitere Untersuchungen ausgebaut.

Bei einem anderen Triebzug wiesen die Radlaufflächen einen deutlichen Fettfilm auf. Bei der Nachmessung der Einstellung der Spritzdüsen der Spurkranzschmierung wurde bei einigen Düsen eine nicht optimale Einstellung erkannt.

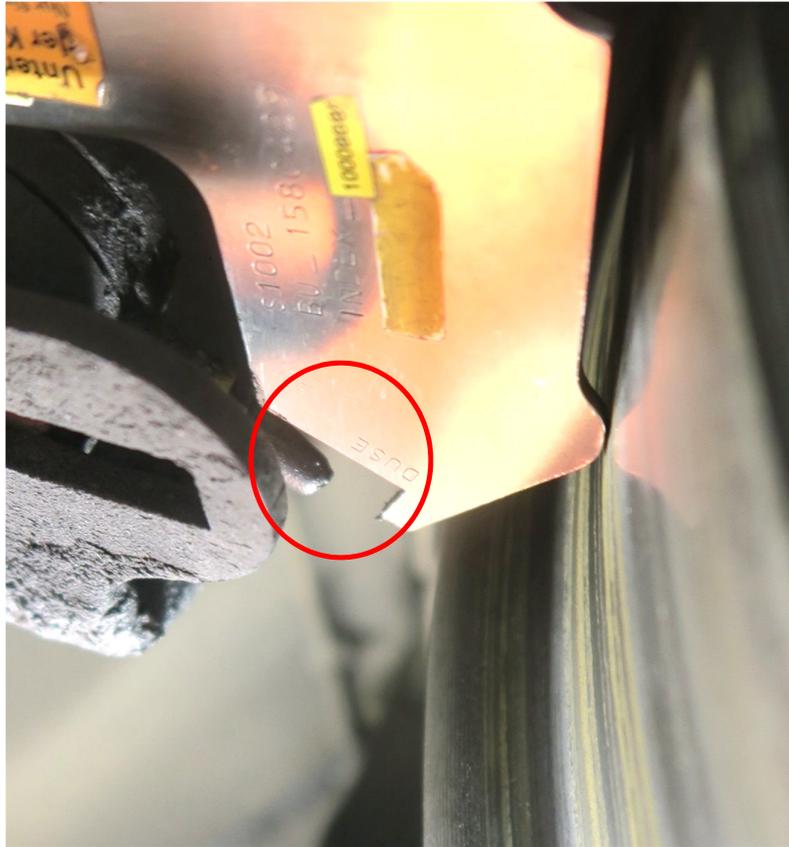


Abbildung 13: Nachkontrolle der Einstellung der Düsen für die Spurkranzschmierung mittels Formlehre. Die Düse sollte möglichst nahe an der Nase der Formlehre sein (rote Markierung).

Die Funktion der Bremsrücksteller wurde geprüft. Es zeigten sich keine Abweichungen.

1.10.4 Bremsbeläge

Die Fahrzeuge sind mit Bremsbelägen des Typs Jurid 878 ausgerüstet. Die in Givisiez an einem typgleichen Triebzug ausgebauten Bremsbeläge wurden einer Analyse der Materialeigenschaften und einer Reibwertuntersuchung am Vollbelagprüfstand unterzogen.

Ergebnisse:

- Die Materialeigenschaften entsprachen der Spezifikation.
- Die visuelle Prüfung der Beläge zeigt eine stark «spiegelnde» Oberfläche, eine sehr ebene Reibfläche mit nur geringer Kantenbildung innen und aussen sowie ein sonst unauffälliges Äusseres.
- Die Prüfstandversuche sind nach Norm durchgeführt worden. Es zeigte sich lediglich bei der ersten Bremsung ein leicht unter den Erwartungen liegender Reibwert. Alle nachfolgenden Versuche zeigten zur Sollvorgabe gleichwertige oder bessere Reibwerte.

Im Normalbetrieb genügt in den meisten Fällen die elektrische Bremskraft, um den Triebzug bis zum Stillstand abzubremsen. Die pneumatische Bremse wird erst kurz vor dem Stillstand mit geringer Bremskraft aufgeschaltet. Dadurch wird der

stehende Triebzug am Wegrollen gehindert. Die nur kurzzeitige Nutzung mit geringem Bremszylinderdruck und bei kleiner Geschwindigkeit führt zu Verglasungen auf den Bremsbelägen.

1.10.5 Fettrückstände auf den Laufflächen

Die Fettanalyse der auf den Radlaufflächen gefundenen Fettrückstände zeigte, dass es sich mit grösster Wahrscheinlichkeit um das bei diesem Triebzug eingesetzte Spurkranzschmierfett handelte.

1.10.6 Impulsgeber

Die Impulsgeber jeder Achse (Messung Achsgeschwindigkeit) wurden von Stadler ausgebaut und einer Überprüfung unterzogen. Unter Berücksichtigung der Einsatzdauer befanden sich die Impulsgeber in einem guten Zustand. Die Mechanik (inklusive der Gabelkupplung) und die Elektromechanik wiesen keine besonderen Auffälligkeiten auf. Die Endprüfung auf den Fertigungsprüfmitteln haben alle Impulsgeber bestanden. Die Frequenzanalysen wiesen keine Besonderheiten auf.

1.10.7 Infrastruktur

Im März 2021 wurde die Infrastruktur an den betreffend Auffälligkeit des Bremsverhaltens neuralgischen Stellen mittels folgender Methoden näher untersucht:

- Visuelle Inspektion / Fotodokumentation
- Bewertung Schmierfilm an Schienenflanke und der Schienenoberfläche
- Querprofilmessung
- Härteprüfung mit Rückprallgerät

Der Schmierzustand unterhalb der Fahrkante variierte sehr stark und reichte von keinerlei Schmierfett bis zu Ansammlungen von Überschussmaterial. Trotz der Variation unterhalb der Fahrkante war auf der Schienenoberfläche eine gleichmässig dünne Schicht zu finden. Die leichte Verschmutzung liess sich in der Regel bereits mit dem ersten Klebestreifen komplett entfernen.

Die Härte der Schienenoberfläche lag typischerweise über der Mindesthärte. Eine Aufhärtung durch Kaltverformung war lokal zu erwarten, es waren aber keine Exzesse aus massivem Schlupf oder Traktionsleistung/Verzögerung in den Daten und auf den Fotos erkennbar.

Die Querprofilqualität zeigte ein erwartetes, übliches Bild.

Die BLS hat in der Vergangenheit festgestellt, dass die Salznässe, infolge des Winterdienstes auf Strassen, die Adhäsionsverhältnisse auf den Schienen spürbar negativ beeinflussen kann.

1.10.8 Elektromagnetische Strahlung

Beim Bauinspektorat der Gemeinde Belp wurde abgeklärt, ob in der Umgebung des Bahnhofs Belp Anpassungen an bestehenden Bauten oder Neubauten durchgeführt wurden, von denen möglicherweise elektromagnetische Strahlungen ausgehen können. Es wurden seit längerer Zeit keine Anlagen bewilligt, die diesbezüglich einen Einfluss haben könnten. Ebenso ist der BLS nicht bekannt, in der Zeit vor dem Ereignis entsprechende Installationen vorgenommen zu haben.

1.10.9 Bremskraftmessung

Im März 2021 wurde in der Werkstätte von Givisiez bei einem typgleichen Triebzug eine Bremskraftmessung an den Bremseinheiten durchgeführt, um mögliche weitere Erkenntnisse über das Bremsverhalten zu erlangen. Ziel der Messungen war, einen Vergleich der spezifizierten Bremskräfte zu den tatsächlichen Bremskräften zu bekommen. Alle Bremsscheiben wurden niedrigen bis maximalen Bremszylinderdrücken ausgesetzt und die dabei resultierenden Bremskräfte gemessen. Die Abweichungen der gemessenen Bremskräfte von den spezifizierten lagen zwischen -0.8 kN und 1.5 kN und hielten somit die zulässige Toleranz ein.

1.10.10 Dynamische Bremsversuche

1.10.10.1 Rahmen der Bremsversuche

Im Beisein der SUST wurden im Februar und März 2021 dynamische Bremsversuche mit einem typgleichen Triebzug sowie – nach dessen Reparatur – im Mai 2021 mit dem unfallverursachenden Triebzug durchgeführt. Die BLS führte dazu weitere Bremsversuche durch.

Zur Herstellung ungünstiger Schienenverhältnisse wurde jeweils Seifenwasser vor der ersten Achse auf die Schienen gespritzt. Für die Versuche, bei denen die Einfahrt in Belp simuliert wurde, streute die Strassenmeisterei auch üblicherweise benutztes Taumittel auf den Bahnübergang. Zudem wurden Fahrten mit der Softwareversion, die bei der bremstechnischen Prüfung im Jahr 2012 verwendet wurde, durchgeführt.

1.10.10.2 Wirkungsweise der Softwareversionen

Unter sonst gleichen Bedingungen wurden Bremsversuche mit der bei der bremstechnischen Prüfung installierten Softwareversion (Konfiguration 3) sowie mit der aktuellsten Softwareversion (Konfiguration 19A) durchgeführt.

Beim Einsatz der Konfiguration 3 konnten weniger Gleitschutzeingriffe und jeweils über eine kürzere Zeit festgestellt werden, als bei der beim Ereignis vorhandenen Konfiguration 19A. Die maximal mögliche Bremsverzögerung von -1.7 m/s² wurde in rund 2 s erreicht und konstant gehalten (Abbildung 14).

Demgegenüber regelte die Konfiguration 19A häufiger mit länger andauernden Schwankungen der Bremsverzögerung. Alle Motoren reduzierten während des Bremsvorgangs die elektrische Bremskraft wiederholt kurzzeitig bis auf Null. Ein Motor trug dabei bis zu 4 s, zwei andere Motoren zeitversetzt während rund 2 s keine Bremskraft bei. Insgesamt wurde gegenüber der Konfiguration 3 rund fünfmal so viel Zeit benötigt, bis eine konstante Bremsverzögerung von -1.7 m/s² eintrat (Abbildung 15).

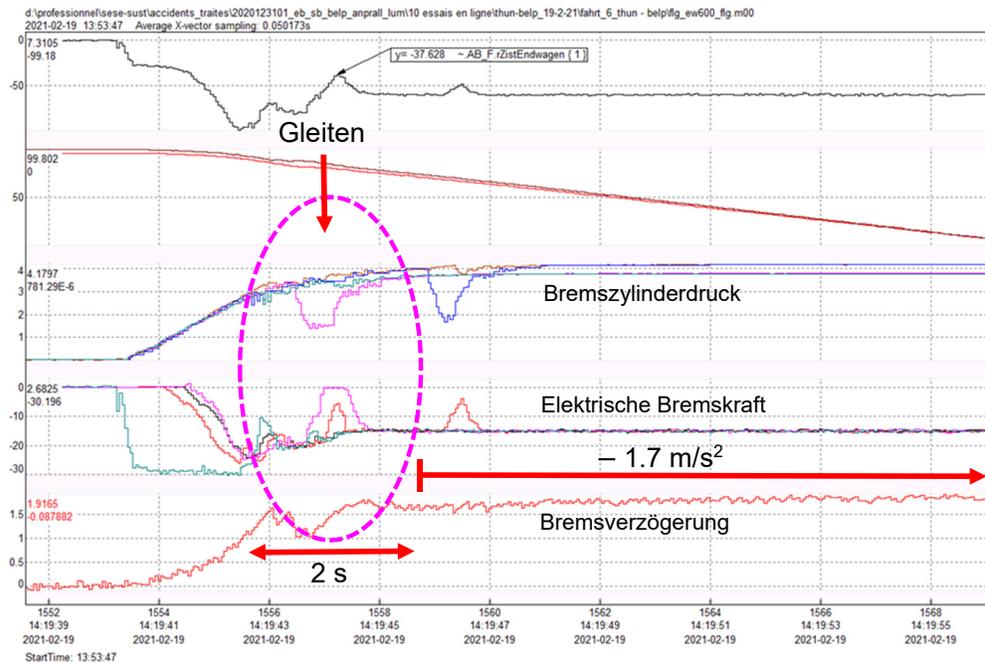


Abbildung 14: Verhalten eines Triebzugs vom Typ RABe 515 bei einer Schnellbremsung mit der Software mit der bei der bremstechnischen Prüfung im Jahr 2012 installierten Konfiguration 3.

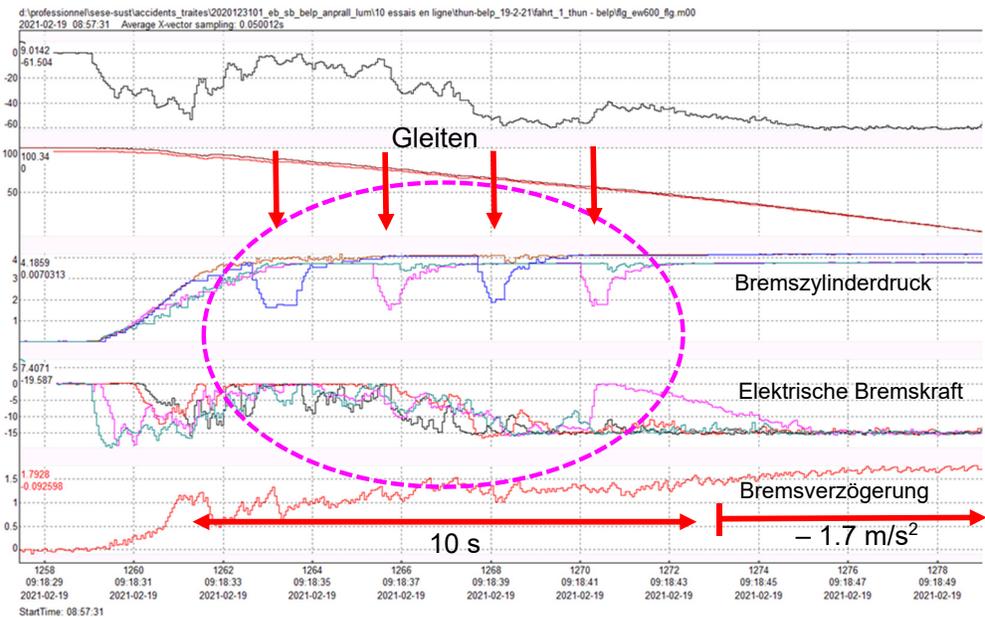


Abbildung 15: Verhalten eines Triebzugs vom Typ RABe 515 bei einer Schnellbremsung mit der Software mit der zum Zeitpunkt des Ereignisses installierten Konfiguration 19A.

1.10.10.3 Erkenntnisse aus den Bremsversuchen

Die Bremsversuche zeigten, dass beim Anprall in Belp jede einzelne Bedienhandlung des Lokführers für sich allein den unfallverursachenden Triebzug vor dem Kollisionspunkt zum Stillstand gebracht hätte. Bei keiner der Bremsversuchsfahrten konnte ein Bremsverhalten mit auffallend schlechten Verzögerungswerten provoziert werden.

Dennoch zeigten die Bremsversuche Erkenntnisse, die für die Ermittlung der Umstände des vorliegenden Unfalls relevant sind:

Die Regelung der elektrischen Bremse sowie das Zusammenspiel zwischen der elektrischen und der elektropneumatischen Bremskraft funktionieren im Normalfall entsprechend den Erwartungen, bei ungünstigen Adhäsionsverhältnissen jedoch nicht immer. Aufgrund der Ergebnisse der Versuchsfahrten wurden vier Themengebiete identifiziert, die Optimierungspotential aufweisen:

- Teillastbetrieb
- Schlupfregelung
- Adhäsionsschnüffler EP-Bremse
- Bremskraftkompensation

Der Teillastbetrieb dient der Energieoptimierung. Im Teillastbetrieb wird die elektrische Bremskraft nicht mit allen Motoren aufgebracht. Zuerst bringt nur ein Motor die Bremskraft auf, die übrigen werden später zugeschaltet. Somit muss dieser eine Motor eine höhere Bremskraft aufbringen, als wenn alle Motoren von Beginn weg eingesetzt werden. Bei schlechter Adhäsion kann dies zu einem rascheren Gleiten der zuerst gebremsten Achse führen. Allenfalls mit einer zeitlichen Verzögerung werden weitere Motoren aktiviert. Insgesamt führt dies zu einer nicht vollständig optimalen Ausnutzung der möglichen Bremsleistung.

Die Regelung des Gleitschutzes der elektrischen Bremse ist so eingestellt, dass erst bei relativ grossem Schlupf zwischen Rad und Schiene eine Reaktion erfolgt. Ist der Schlupf geringer, gleitet die Achse leicht, ohne dass eine Reaktion des Gleitschutzes erfolgt. Dadurch wird weniger Bremskraft erzielt. Zudem kann es dazu führen, dass der Gleitschutz der pneumatischen Bremse aktiv wird. Dies verzögert den Aufbau der pneumatischen Bremskraft.

Der Adhäsionsschnüffler dient als Vorsteuerung zur Verbesserung des Fahrkomforts. Das bedeutet, dass beim Detektieren von Gleitvorgängen präventiv die maximalen Bremskräfte wagenselektiv reduziert werden. Diese Begrenzung kann in Situationen mit sehr grossem Schlupf zwischen Rad und Schiene und in Kombination mit den vorher beschriebenen Effekten zu einer Abschwächung der möglichen Bremsleistung führen.

Reduziert sich die elektrische Bremskraft wegen Gleitschutzvorgängen, wird die elektropneumatische Bremse der Mittelwagen aktiviert (Bremskraftkompensation). Bei nicht ausreichender, elektrischer Bremskraft in den Endwagen durch Gleiten wird in den Mittelwagen allerdings mit niedrigeren Bremszylinderdrücken kompensiert, als sie möglich wären. Das bedeutet, dass dadurch nicht immer die mögliche Bremsleistung ausgenützt wird.

Im Weiteren wurde erkannt, dass bei den Bremsversuchsfahrten mit dem unfallverursachenden, reparierten Triebzug die ersten Bremsungen einen längeren Bremsweg hatten als die folgenden. Mit zunehmender Anzahl der Bremsungen verkürzten sich die Bremswege. Im Vergleich zur ersten Bremsung ergaben sich schliesslich rund 15 % kürzere Bremswege.

1.10.11 Softwareanpassungen während der Einsatzdauer

Der Prozess für Implementierung, Nachweis und Zulassung von Softwareänderungen wurde jeweils von der Firma Stadler geführt. Die BLS hatte dabei die Rolle als Kunde oder Auftraggeber; dies war abhängig von der Art der Änderung.

Der Ablauf ist wie folgt:

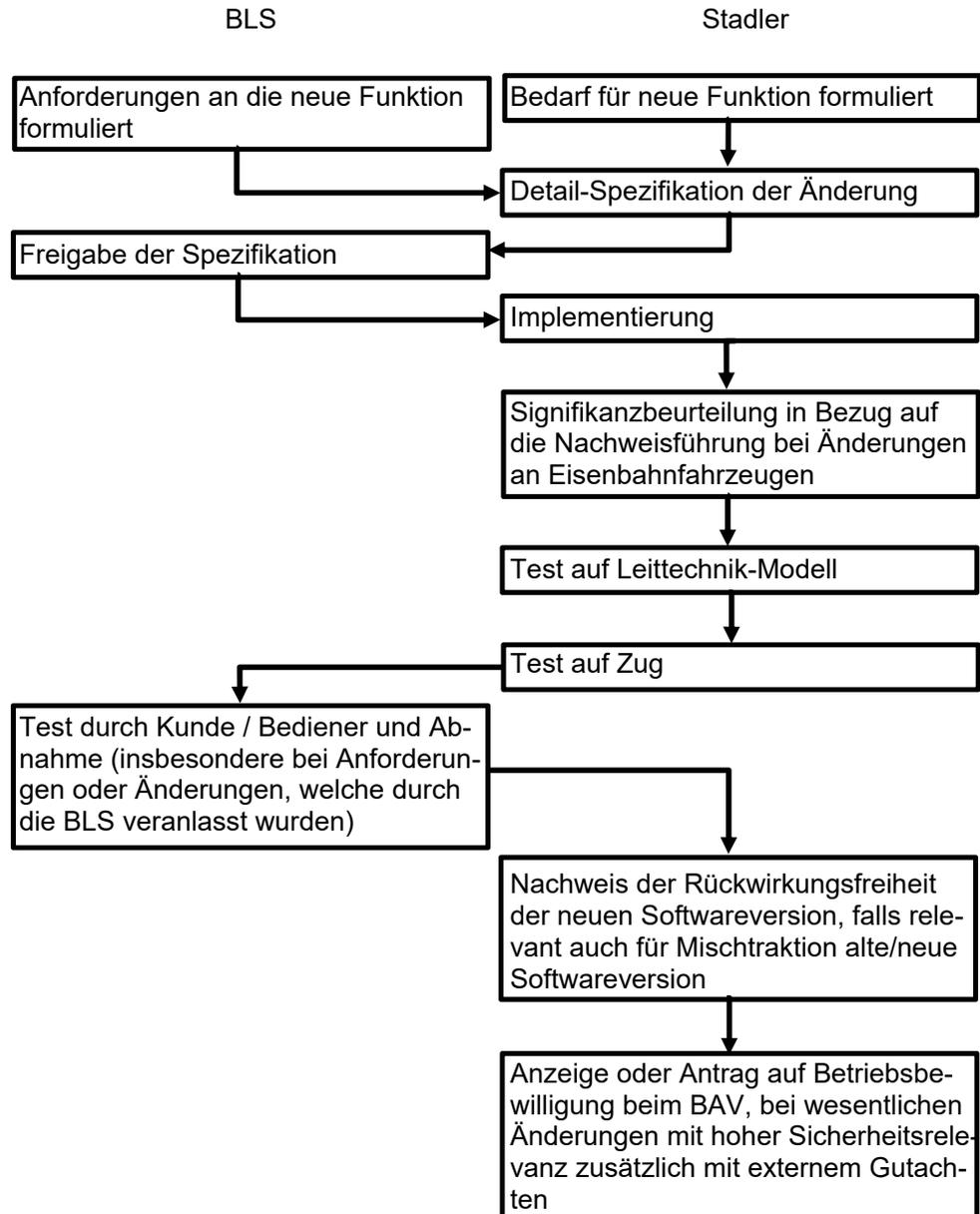


Abbildung 16: Zuständigkeiten im Prozess für Implementierung, Nachweis und Zulassung von Softwareänderungen.

Die Typenzulassung erfolgte auf Basis der Softwarekonfiguration 10. Bis September 2020 folgten zehn weitere Softwareanpassungen. Diese betrafen verschiedene Bereiche für Traktion, Komfort, Bedienung, Diagnose, Türen, Bremsen usw. Softwareanpassungen benötigen in den Fällen eine Betriebsbewilligung, bei de-

nen es sich um wesentliche Änderungen bzw. um Änderungen mit hoher Sicherheitsrelevanz handelt. Bei Änderungen der Fahrzeug- oder der Stromrichtersteuerung handelt es sich stets um wesentliche Änderungen.

Seit der Typenzulassung sind folgende Betriebsbewilligungen beantragt und genehmigt worden, die Anpassungen der Fahrzeug- oder Stromrichtersteuerung zum Gegenstand hatten:

- Antrag mit Datum vom 02.10.2015 für Konfiguration 13, Betriebsbewilligung mit Datum vom 28.10.2015.
- Antrag mit Datum vom 17.11.2015 für Konfiguration 14, Betriebsbewilligung für Probetrieb mit Datum vom 23.08.2017, Betriebsbewilligung für kommerziellen Betrieb mit Datum vom 31.01.2018.
- Am 09.10.2019 wurde ein Gesuch auf eine Betriebsbewilligung für die Konfiguration 16 für die nachfolgende Serie 4-teiliger Triebzüge RABe 515 032 – 039 gestellt. Daraufhin wurde vom BAV am 25.11.2019 die Bewilligung ausgestellt. Für die bestehende Serie Triebzüge RABe 515 001 – 031 galt die Konfiguration 16 nicht als signifikante Änderung.
- Für Probe- und Überführungsfahrten wurde mit Datum vom 16.12.2019 eine befristete Bewilligung für die Konfiguration 16 für die Triebzüge RABe 515 032 – 039 erteilt.
- Am 04.05.2020 wurde ein Gesuch auf eine Betriebsbewilligung mit der Konfiguration 16 für die nun zu 6-teilern erweiterten Triebzüge RABe 515 032 – 039 gestellt. Daraufhin wurde vom BAV am 25.08.2020 die Bewilligung ausgestellt.

Die weiteren Softwareanpassungen wurden als nicht signifikante Änderungen eingestuft und daher kein Antrag auf Genehmigung beim BAV gestellt.

1.11 Ähnliche Ereignisse

Aufgrund des Verhaltens des Triebzugs beim Ereignis in Belp analysierte die BLS weitere vorangegangene Vorkommnisse nochmals. Mindestens vier weitere Ereignisse zeigten auch ein auffälliges Verhalten eines Triebzugs vom Typ RABe 515 während des Bremsens. Allen Ereignissen war gemeinsam:

- Die Witterung war nasskalt mit Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt.
- Die Schnellbremsung wurde bei gefahrenen Geschwindigkeiten von höchstens 40 km/h eingeleitet.
- Während des Bremsvorganges wurde jeweils ein Bahnübergang befahren.
- Die Verzögerung erreichte Werte von maximal -0.8 m/s^2 .

Bei zwei dieser Ereignisse im Jahr 2013 (vor der Typenzulassung) war die Softwareversion 9 vorhanden.

1.12 Zwischenbericht zum Anprall in Belp

Die vorläufigen Ergebnisse der Untersuchungen, die zum Zwischenbericht führten, liessen den Schluss zu, dass die Triebzüge vom Typ RABe 515 nicht in jedem Fall die Bremsleistung erreichten, die bei der bremstechnischen Prüfung bzw. Typenzulassung bestimmt wurde. Damit war nicht sichergestellt, dass beispielsweise bei

einer durch das Zugsicherungssystem ausgelösten Zwangsbremmung der Zug in jedem Fall vor dem Gefahrenpunkt zum Stehen kam.

Im [Zwischenbericht Reg.-Nr. 2020123101](#) vom 24. Februar 2021 zum Anprall beim Anfahren an eine stehende Komposition am 31. Dezember 2020 in Belp wurde zum Sicherheitsdefizit der Bremsleistung der Triebzüge vom Typ RABe 515 die Sicherheitsempfehlung Nr. 158 ausgesprochen:

Die SUST empfiehlt dem BAV, die Betreiber der Triebzüge vom Typ RABe 515 aufzufordern, die Bremsleistung zu überprüfen und so zu korrigieren, dass die Triebzüge in allen Betriebssituationen die Bremsleistungswerte der Zulassung erreichen können, oder andere Massnahmen zu treffen, die einen rechtzeitigen Stillstand gewährleisten können.

Das BAV hat die BLS sowie den Hersteller der Fahrzeuge, die Firma Stadler, angeschrieben und liess sich die Beurteilung bezüglich Risiken und die eingeführten sowie die noch geplanten Massnahmen für einen sicheren Betrieb aller in der Schweiz potentiell betroffenen Fahrzeuge darlegen.

Aus Sicht BAV sind die bis und mit Donnerstag, 11. März 2021 mit der BLS und dem Hersteller beschlossenen Sofortmassnahmen geeignet, den sicheren Bahnbetrieb zu gewährleisten.

Zudem hat das BAV die Sicherheitsbehörden in Deutschland und Österreich informiert, weil in diesen Staaten potentiell betroffene Fahrzeuge in Betrieb sind.

2 Analyse

2.1 Technische Aspekte

2.1.1 Bremsversuchsfahrten

Bei der Analyse weiterer, mit dem vorliegenden Unfall vergleichbarer Ereignisse (Ziffer 1.11) ergaben sich maximale mittlere Bremsverzögerungen von ca. -0.8 m/s^2 .

Die aus den Fahrdaten der Unfallfahrt berechnete Bremsverzögerung (Ziffer 1.9.1.1) betrug -0.2 m/s^2 .

Aus den Ergebnissen der dynamischen Bremsversuche (Ziffer 1.10.10) konnte eine mittlere Bremsverzögerung von -1.7 m/s^2 berechnet werden.

Die bei den analysierten Ereignissen und dem Unfallereignis vorherrschenden Umstände waren vergleichbar. Zwischen den Bremsversuchsfahrten und der Unfallfahrt bestanden folgende Unterschiede:

- Die Wetterbedingungen wie Schneefall und Temperaturen um den Gefrierpunkt waren nicht identisch.
- Die ungünstige Einstellung der Spurkranzschmierung bzw. ein Fettfilm auf den Radlaufflächen war nicht vorhanden.
- Infolge der zahlreichen Bremsungen gab es keine Verglasung der Bremsbeläge.

Die Wetterbedingungen und die Einstellung der Spurkranzschmierung hatten beim Ereignis einen negativen Einfluss auf den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene. Um für die Bremsversuchsfahrten ähnliche Verhältnisse zu schaffen, wurde Seifenwasser vor der ersten Achse auf die Schienen gespritzt. Die Verglasung der Bremsbeläge konnte nicht simuliert werden.

Die Anordnung für die Bremsversuche führte dennoch zu verwertbaren Aufzeichnungen über die Eingriffe des Gleitschutzes. Aus den Ergebnissen der Bremsversuchsfahrten können folgende Feststellungen abgeleitet werden:

- Die Weiterentwicklungen der Software wirkten sich bei ungünstigen Adhäsionsverhältnissen negativ auf den Aufbau der Bremsverzögerung aus.
- Im Rahmen der Bremsversuche konnte eine vergleichbar kleine Bremswirkung von -0.2 m/s^2 , wie sie für das Ereignis berechnet wurde, nicht reproduziert werden.
- Trotz der Schwächen bei der Gleitschutzregelung ergaben sich keine übermässig längeren Bremswege.

Aufgrund der Ergebnisse aus den Bremsversuchsfahrten kann jedoch nicht eindeutig gesagt werden, inwiefern die erkannten Schwächen der Gleitschutzregelung während eines Bremsvorgangs von ihren Voraussetzungen her einen Einfluss auf die beim Ereignis von Belp aufgetretene, schwache Bremswirkung haben konnten.

2.1.2 Einflüsse auf den Schlupf zwischen Rad und Schiene

Aus den vorliegenden Ergebnissen der besonderen Untersuchungen sowie anderer relevanter Feststellungen zum Schienenzustand lässt sich Folgendes zu möglichen Einflüssen auf den Schlupf zwischen Rad und Schiene ableiten:

- Bei der Untersuchung des Schienenzustands (Ziffer 1.10.7) wurde ein leichter Schmierfilm auf dem Schienenkopf festgestellt. Das entsprach einer vielerorts anzutreffenden Situation. Die weiteren Untersuchungen ergaben ebenfalls keine Abweichungen vom Normalzustand. Aus dem vorhandenen Schienenzustand lässt sich kein signifikanter Beitrag zur Unfallursache ableiten.
- Kurz vor der Einfahrt des unfallverursachenden Triebzugs setzte leichter Schneefall ein. Tage zuvor wurde bei den herrschenden winterlichen Verhältnissen mit dem Winterdienst und durch die fahrenden Motorfahrzeuge Salzlösung auf die Schienen im Bereich des Bahnübergangs, der kurz vor dem Perron ist, aufgetragen. Es ist denkbar, dass der leichte Schneefall die Reste der zwischenzeitlich eingetrockneten Salzlösung wieder verflüssigte.
- Die Radlauflächen, insbesondere der Mittelwagen, wiesen einen deutlichen Schmierfilm auf. Dieser wurde hervorgerufen durch eine nicht optimal eingestellte Spurkranzschmierung. Zudem wird durch die vermehrte Schmierung bei Auslösung durch den Kurvensensor deutlich mehr Schmiermittel aufgebracht, als mit einer rein wegabhängigen Auslösung. Die geschmierte Radlaufläche dürfte zusammen mit der Salzlösung den Schlupf zwischen Rad und Schiene erhöht haben.

2.1.3 Bremsausrüstung

Verschiedene Komponenten der Bremsausrüstung des unfallverursachenden Triebzuges und typgleicher Triebzüge wurden näher betrachtet. Die Komponenten funktionierten erwartungsgemäss.

- Die Bremskraftmessung zeigte Werte innerhalb der zulässigen Toleranz.
- Die Prüfung der Materialeigenschaft und des Reibwerts der Bremsbeläge auf dem Prüfstand ergaben konforme Resultate.
- Die Funktion der Bremsrücksteller folgte den Erwartungen.
- Die Mechanik (inklusive der Gabelkupplung) und die Elektromechanik der Impulsgeber wiesen keine besonderen Auffälligkeiten auf.

Es war keine Fehlfunktion der Mechanik der Bremsausrüstung festzustellen.

2.1.4 Bremsbeläge

Das Bremskonzept des Triebzugs sieht vor, weitgehend die elektrische Bremse zu nutzen und die pneumatische Bremse ergänzend wirken zu lassen, wenn eine erhöhte Bremskraft erforderlich wird. Bei normalen Betriebsbremsungen genügt die elektrische Bremskraft, um den Zug bis kurz vor Stillstand abzubremsen. Dann wird die pneumatische Bremse mit geringer Bremskraft aufgeschaltet, um den Zug letztlich im Stillstand festzuhalten. Der Verschleiss der Bremsbeläge fällt dadurch sehr gering aus. Es führt jedoch auch dazu, dass die Bremsbeläge dazu neigen, zu verglasen. Verglasungen führen zu einem geringeren Reibwert bzw. bei einer ersten pneumatischen Bremsung müssen die Verglasungen erst abgeschliffen werden, bis die Bremsbeläge die tatsächlichen Reibwerte aufbringen können.

Dieser Effekt zeigte sich in geringem Mass bei der Prüfung auf dem Vollbelagprüfstand (Ziffer 1.10.4). Die erste Bremsung zeigte einen unter den Erwartungen liegenden Reibwert, während die Folgebremnungen einen genügenden Reibwert auswiesen.

Der gleiche Effekt konnte anlässlich der Bremsversuchsfahrten mit dem reparierten, unfallverursachenden Triebzug festgestellt werden. Die erste Bremsung zeigte einen längeren Bremsweg als die nachfolgenden Bremsungen.

Verglasungen kann entgegengewirkt werden, indem die pneumatische Bremse regelmässig bei erhöhter Geschwindigkeit und mit erhöhtem Bremszylinderdruck über eine längere Zeit wirkt.

2.1.5 Weitere Feststellungen bei den Bremsen

Zu den bei der ersten Untersuchung in der Werkstätte Bönigen beim unfallverursachenden Triebzug gemachten Feststellungen bezüglich Bremsen kann festgehalten werden:

- Eine ungleichmässige Beaufschlagung der Bremsscheibe auf dem zugführenden EW 600:
Bis zur Untersuchung in der Werkstätte Bönigen stand der verunfallte Triebzug mehrere Tage still. Die Bremsscheiben setzten Flugrost an. Da die Bremsbeläge bei loser Bremse durchaus teilweise die Bremsscheibe berühren, dürfte das Bild einer ungleichmässigen Beaufschlagung daher rühren, dass beim Aufstellen für die Untersuchung des havarierten Zuges auf der Grube der Flugrost an der Bremsscheibe ungleichmässig abgetragen wurde. Bei den Bremsversuchsfahrten mit dem unfallverursachenden, reparierten Triebzug zeigten sich die Bremsscheiben über die gesamte Breite blank. Die Beaufschlagung durch die Bremsbeläge erfolgte somit vollständig.
- Zwei Bremsbeläge waren nicht formschlüssig zur Bremsscheibe positioniert:
Ein nicht formschlüssig zur Bremsscheibe wirkender Bremsbelag kann die optimale Bremswirkung beeinflussen. Die Zahl der nicht formschlüssig festgestellten Bremsbeläge ist jedoch zu gering, so dass dies einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Bremswirkung hatte. Zudem waren diese Bremsbeläge bei den Motordrehgestellen vorhanden. Auf den Motordrehgestellen wirkte primär die elektrische Bremse.

2.2 Organisatorische Aspekte

Die Softwareanpassungen folgten einem vorgegebenen Prozess. Dass die Anpassungen gegenüber der Softwareversion, die beim Typentest aktiv war, zu Schwächen in der Regelung bei ungünstigen Adhäsionsverhältnissen führten, wurde angesichts der bei Bremsversuchen nach wie vor genügend erreichten Bremsleistung nicht erkannt.

2.3 Betriebliche Aspekte

Bei den vor dem Unfall eingetretenen und erneut untersuchten Ereignissen sowie beim Unfall selbst traten ungenügende Bremswirkungen auf, wenn die Witterung nasskalt mit Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt war und die Schnellbremsung bei einer Geschwindigkeit von höchstens 40 km/h eingeleitet wurde.

Dem Lokführer wurde über die Signalisation angezeigt, dass in seinem Fahrweg Fahrzeuge stehen und er nicht bis zum nächsten Hauptsignal ein freies Gleis erwarten durfte. Die Einfahrt in ein besetztes Gleis ist geregelt, die Verhaltensweise ist bekannt, geschult, geprüft und wird in der Praxis regelmässig angewendet. Der Lokführer leitete der Situation angemessen rechtzeitig eine erste Bremsung ein.

Es war zulässig, die Fahrt von Belp Steinbach nach Belp in ein besetztes Gleis zu leiten.

Die zur Verfügung stehende Bremswirkung führte zu einem erheblich längeren Bremsweg, so dass der Triebzug nicht vor der im Einfahrgleis aufgestellten Komposition anhalten konnte.

2.4 Menschliche Aspekte

Die Bremsversuche zeigten, dass beim Anprall in Belp jede einzelne Bedienhandlung des Lokführers für sich allein den unfallverursachenden Triebzug vor dem Kollisionspunkt zum Stillstand hätte bringen müssen.

Der Lokführer rechnete nicht mit einer derart schlechten Bremswirkung, da alle vorherigen Bremsungen problemlos die erwartete Bremswirkung brachten.

Aufgrund der Erfahrungen bei allen Bremsungen vorher sowie wegen der fehlenden typischen Anzeichen, die üblicherweise beim Gleiten eines Zuges auftraten, ging der Lokführer von einem tatsächlichen Versagen der Bremsen aus. Es gab kein Hinweis darauf, dass die schlechte Bremswirkung auf eine ungenügende Adhäsion zurückzuführen war, weshalb er den Einsatz des Sandstreuers als sinnlos erachtete.

Der Lokführer führte seine Handlungen rechtzeitig und in geeigneter Reihenfolge durch. Nicht durch ihn beeinflussbare Umstände hinderten ihn daran, die Kollision vermeiden zu können.

2.5 Zusammentreffen von Umständen

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die möglichen Einflüsse, die zu einer verminderten Bremswirkung führen können. Es gab keine Feststellung, die für sich allein als entscheidende Ursache identifiziert werden konnte. Es ist somit davon auszugehen, dass mehrere ungünstige Umstände zusammentrafen:

- Einsetzender Schneefall aktivierte die Salznässe, die bekannterweise einen negativen Einfluss auf die Adhäsion hat. Die Salznässe war im Bereich des Bahnübergangs vor dem Perronanfang und im Bereich der ersten Anbremsung durch den Lokführer vorhanden.
- Der Schmierfilm auf den Radlaufflächen hatte zweifelsfrei einen Einfluss auf den Reibwert zwischen Rad und Schiene. Allerdings führte der Schmierfilm bei keiner Bremsung zuvor zu Schwierigkeiten, weshalb auch dieser Zustand nicht allein massgebend sein kann. Denkbar bleibt allerdings, dass der negative Effekt auf die Adhäsion durch die vorhandene Salznässe kurz vor dem Perron in Belp verstärkt wurde.
- Die Verglasungen der Bremsbeläge führten zu einer verminderten Bremswirkung bei einer ersten, starken Bremsanforderung.
- Die Bremsregelung des unfallverursachenden Triebzugs war nicht in der Lage, die bestmögliche Bremsverzögerung zu erzielen.

3 Schlussfolgerungen

3.1 Befunde

3.1.1 Technische Aspekte

- Bei den Bremsversuchen zeigten sich Unterschiede zwischen der Softwareversion bei der bremstechnischen Prüfung gegenüber der aktuellen Version. Die Anpassungen führten zu Schwächen in der Bremsregelung bei auftretendem Schlupf zwischen Rad und Schiene.
- Während den Bremsversuchsfahrten konnte bei keiner Bremsung eine ähnlich ungenügende Bremswirkung wie beim Ereignis von Belp festgestellt werden.
- Die Kraftmessung der Bremseinheiten zeigte Werte innerhalb der zulässigen Toleranz.
- Es war keine Fehlfunktion der Mechanik der Bremsausrüstung festzustellen.
- Die Prüfung der Materialeigenschaft und des Reibwerts der Bremsbeläge ergaben konforme Resultate. Bei der ersten Bremsung lag der Reibwert allerdings unter den Erwartungen.
- Der allgemein vorhandene Schienenzustand begünstigte das schlechte Bremsverhalten kaum.
- Es ist denkbar, dass der leichte Schneefall die Reste allenfalls bereits eingetrockneter Salzlösung wieder verflüssigte.
- Die geschmierte Radlaufläche dürfte zusammen mit der Salzlösung die Adhäsion zwischen Rad und Schiene drastisch gesenkt haben. Zusammen mit den Schwächen der Gleitschutzregelung war die Bremswirkung geringer als üblich.

3.1.2 Organisatorische Aspekte

- Die Untersuchungsergebnisse veranlassten die BLS, Verbesserungen vorzunehmen und Massnahmen umzusetzen, die die Bremsleistung der Triebzüge vom Typ RABe 515 auch bei schlechten Adhäsionsverhältnissen sicherstellen sollen.
- Die ungünstige Wirkung der Softwareanpassungen wurde angesichts der bei Bremsversuchen nach wie vor genügend erreichten Bremsleistung nicht erkannt.

3.1.3 Betriebliche oder prozessuale Aspekte

- Ungenügende Bremswirkungen traten auf, wenn die Witterung nasskalt mit Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt war und die Schnellbremsung bei einer Geschwindigkeit von höchstens 40 km/h eingeleitet wurde.
- Es war zulässig, die Fahrt von Belp Steinbach nach Belp in ein besetztes Gleis zu leiten.
- Die zur Verfügung stehende Bremswirkung führte zu einem erheblich längeren Bremsweg, so dass der Triebzug nicht vor der im Einfahrgleis aufgestellten Komposition anhalten konnte.

3.1.4 Menschliche Aspekte

- Der Lokführer führte seine Handlungen rechtzeitig und in geeigneter Reihenfolge durch.
- Jede einzelne Bedienhandlung des Lokführers für sich allein hätte den unfallverursachenden Triebzug vor dem Kollisionspunkt zum Stillstand bringen müssen.
- Aus den Erfahrungen der vorangegangenen Bremsungen und wegen Fehlen der typischen Anzeichen bei Gleiten eines Zuges ging der Lokführer nicht von schlechten Adhäsionsverhältnissen aus.

3.1.5 Bereits umgesetzte Optimierungen

- Die mit dem [Zwischenbericht Reg.-Nr. 2020123101](#) vom 24. Februar 2021 zum Anprall beim Anfahren an eine stehende Komposition am 31. Dezember 2020 in Belp ausgesprochene Sicherheitsempfehlung Nr. 158 ist bereits umgesetzt.
- Die BLS hat zusammen mit Stadler Optimierungen an der Bremssteuerung vorgenommen.
- Auf die Tendenz zur Verglasung der Bremsbeläge hat die neue Bremsregelung, die nur bei einer Schnell- oder Zwangsbremung wirkt, im Normalbetrieb keinen Einfluss.

3.2 Ursachen

Der Anprall beim Anfahren an eine stehende Komposition am 31. Dezember 2020 in Belp ist auf das Zusammentreffen mehrerer Umstände zurückzuführen, die das Bremsvermögen des Zuges derart ungünstig beeinflussten, dass der zur Verfügung stehende Bremsweg nicht ausreichte, um den Zug rechtzeitig anzuhalten.

Zum Unfall haben beigetragen:

- Das gleichzeitige Vorhandensein von schmieriger Schiene durch Salznässe und Schmierfett auf den Radlaufflächen führte zu einem erhöhten Schlupf zwischen Rad und Schiene.
- Die Regelung der Bremssysteme stellte unter den Bedingungen schlechter Adhäsionsverhältnisse nicht sicher, dass der Triebzug den vorgesehenen Bremsweg einhalten konnte.
- Die Bremsbeläge hatten nicht von Beginn weg den vollen Reibwert.

4 Sicherheitsempfehlungen, Sicherheitshinweise und seit dem Unfall getroffene Massnahmen

4.1 Sicherheitsempfehlungen

Die schweizerische Gesetzgebung sieht in der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen vom 17. Dezember 2014 (VSZV), Stand am 1. Februar 2015 (SR 742.161), bezüglich Sicherheitsempfehlungen folgende Regelung vor:

Art. 48 Sicherheitsempfehlungen

¹ Die SUST richtet die Sicherheitsempfehlungen an das zuständige Bundesamt und setzt das zuständige Departement über die Empfehlungen in Kenntnis. Bei dringlichen Sicherheitsproblemen informiert sie umgehend das zuständige Departement. Sie kann zu den Umsetzungsberichten des Bundesamts zuhanden des zuständigen Departements Stellung nehmen.

² Die Bundesämter unterrichten die SUST und das zuständige Departement periodisch über die Umsetzung der Empfehlungen oder über die Gründe, weshalb sie auf Massnahmen verzichten.

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 des zuständigen Bundesamtes unter www.sust.admin.ch und erlaubt so einen Überblick über den aktuellen Stand der Umsetzung der entsprechenden Sicherheitsempfehlung.

Im [Zwischenbericht Reg.-Nr. 2020123101](#) vom 24. Februar 2021 zum Anprall beim Anfahren an eine stehende Komposition am 31. Dezember 2020 in Belp wurde zum Sicherheitsdefizit der Bremsleistung der Triebzüge vom Typ RABe 515 die Sicherheitsempfehlung Nr. 158 ausgesprochen:

Die SUST empfiehlt dem BAV, die Betreiber der Triebzüge vom Typ RABe 515 aufzufordern, die Bremsleistung zu überprüfen und so zu korrigieren, dass die Triebzüge in allen Betriebssituationen die Bremsleistungswerte der Zulassung erreichen können, oder andere Massnahmen zu treffen, die einen rechtzeitigen Stillstand gewährleisten können.

Die Sicherheitsempfehlung Nr. 158 wurde bereits umgesetzt.

Die BLS hat zusammen mit Stadler verschiedene Massnahmen und Optimierungen umgesetzt.

Die SUST sieht keine Notwendigkeit, weitere Sicherheitsempfehlungen zu formulieren.

4.2 Sicherheitshinweise

4.2.1 Verglasung Bremsbeläge vermeiden

4.2.1.1 Sicherheitsdefizit

Das Bremskonzept der Triebzüge vom Typ RABe 515 sieht vor, primär die stark wirkende elektrische Bremse zu nutzen und die pneumatische Bremse dann wirken zu lassen, wenn die elektrische Bremskraft für die angeforderte Bremswirkung nicht ausreicht. Im Normalbetrieb wird die pneumatische Bremse erst kurz vor dem Stillstand auf den End- und Mittelwagen wirksam, um den Zug im Stillstand festzuhalten. Durch diese Form des Einsatzes der pneumatischen Bremse neigen die Bremsbeläge zu Verglasungen, was wiederum einen ungünstigen Einfluss auf den Reibwert und somit auf die Bremsleistung haben kann.

Im Normalbetrieb haben die bisher getroffenen Massnahmen auf den Einsatz der pneumatischen Bremse und damit auf die Tendenz zur Verglasung der Bremsbeläge keinen Einfluss.

4.2.1.2 Sicherheitshinweis Nr. 31

Zielgruppe: BLS

Die BLS sollte Vorgaben einführen, die bei den Triebzügen vom Typ RABe 515 den vermehrten Einsatz der pneumatischen Bremse im Normalbetrieb so regeln, dass ein Verglasen der Bremsbeläge nicht eintritt.

4.3 Seit dem Unfall getroffene Massnahmen

Als Sofortmassnahmen hat die BLS das Lokpersonal angewiesen, bei schlechten Schienenverhältnissen die Geschwindigkeit vor Signalen oder anderen Haltepunkten früher und stärker zu reduzieren und zum sicheren Bremsen vermehrt Sand einzusetzen. Die Strecke zwischen Bern und Schwarzenburg weist aufgrund ihrer Topologie, der Signalstandorte und der fehlenden Schutzeinrichtungen bei Kreuzungen ein höheres Gefährdungspotential auf. Die BLS entschied deshalb, auf dieser Strecke bis zur Umsetzung der Optimierungen der Bremssteuerung statt der Triebzüge vom Typ RABe 515 andere Fahrzeugtypen einzusetzen.

Als dauerhafte Anpassungen wurden folgende Optimierungen umgesetzt und auf allen Fahrzeugen vom Typ RABe 515 installiert:

- Ausschliessliches Wirken der pneumatischen Bremse (ohne elektrische Bremse) bei einer Schnell- oder Zwangsbremmung.
- Einsatz der Magnetschienenbremse nach einer Schnell- oder Zwangsbremmung auch bei Ausgangsgeschwindigkeiten von weniger als 50 km/h.
- Abschaltung Teillastbetrieb der Fahrmotoren unter 45 km/h sowie bei höheren Geschwindigkeiten bei jeder Bremsung mittels Fahr-/Bremsshalter.
- Keine 50%-Begrenzung mehr des elektropneumatischen Bremszylinderdrucks bei aktiven Gleitschutzeingriffen (Adhäsionsschnüffler).
- Angepasste Berücksichtigung des notwendigen Mindest-Bremszylinderdrucks der elektropneumatischen Bremse bei den Mittelwagen.
- Korrektur der Kompensationsrechnung bei Ergänzung der fehlenden Bremskraft der elektrischen Bremse der Endwagen mit der pneumatischen Bremse der Mittelwagen.

- Softwareanpassung der Fahrdaten-Aufzeichnungsgeräte.

Bei den dauerhaften Massnahmen wirkt insbesondere die Optimierung der Bremssteuerung.

Dieser Schlussbericht 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, 25. Januar 2022

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle