

Modell der ETCS-Bremskurven: Verbesserungsvorschlag für bereits bremsende Züge

The ETCS braking curves model: Proposal for improvements for already braking trains

Jakub Marek | Ivo Myslivec | Bohumil Drápal

Ein harmonisiertes Modell der Bremskurven (Funktionalität) wurde in die ERTMS/ETCS-Spezifikationen im Rahmen von Baseline 3 eingeführt. Die Berechnungen, wie heute festgesetzt, spiegeln jedoch nicht die aktuelle Bremsung des Zuges wider. Dies beeinträchtigt, unserer Meinung nach, den Eisenbahnbetrieb und möglicherweise auch die Gesamtkapazität der Bahninfrastruktur. In diesem Beitrag versuchen wir, diese Meinung zu erklären und zu verteidigen sowie Änderungen an den Formeln vorzuschlagen, um bessere Ergebnisse für den Fall zu erzielen, dass der Zug derzeit auf ein Ziel bremst, und das resultierende Verhalten zu demonstrieren.

1 Einführung

ETCS ist ein Zugbeeinflussungssystem, das neben Sicherstellung der Interoperabilität eine kontinuierliche Geschwindigkeitsüberwachung bietet, die die Sicherheit erheblich verbessert, insbesondere in den Ländern, wo Altsysteme keine solche Funktion haben. Bei der kontinuierlichen Geschwindigkeitsüberwachung wird nicht nur kontinuierlich überprüft, ob die von der Streckenseite vorgegebene zulässige (Höchst-) Geschwindigkeit an keinem Ort überschritten wird, sondern auch ob der Zug seine Geschwindigkeit so verringern kann, dass er bei einer Absenkung der zulässigen Geschwindigkeit diese am Zielpunkt nicht überschreitet. Für letztere erstellt das fahrzeugseitige ETCS eine Vorhersage und berechnet verschiedene Überwachungsgrenzen, die für die gegebene geschätzte Geschwindigkeit / Beschleunigung die erforderliche Zeit gewährleisten, um den Zug zu einem beliebigen nächsten Ziel abzubremesen.

Es ist zu beachten, dass dieser Beitrag hauptsächlich auf dem Reverse Engineering der entsprechenden ETCS-Formeln (European Train Control System, ETCS) basiert, da wir (als die Gesellschaft AŽD Praha) zu diesem Zeitpunkt kein Vollmitglied von UNISIG waren. Diese unter dem Eisenbahnindustrie-Verband UNIFE gegründete technische Arbeitsgruppe repräsentierte die Industrie im Bereich der Wartung und Weiterentwicklung der ETCS-Spezifikationen, als 2012 die Funktionalität von harmonisierten Bremskurven in die ETCS-Baseline 3-Spezifikationen eingeführt wurde. Daher hatten wir keine Informationen aus dazugehörigen Diskussionen. Es ist auch zu beachten, dass in der Vergangenheit ein ähnliches Verhalten des ETCS-Fahrzeuggerätes beobachtet wurde, als AŽD Praha das erste ATO-System (Automatic Train Operation, ATO) 2008 lieferte, das im Rahmen des tschechischen ETCS-Pilotprojekts in Prag mit ETCS zusammenarbeitete.

A harmonised braking curves model (functionality) was introduced to the ERTMS/ETCS Baseline 3 specifications. The calculations, as specified today, in principle do not reflect sufficiently current braking of a train. In our opinion, this has a very negative impact on railway operations and possibly also on the overall capacity of the railway infrastructure. We have endeavoured to explain and defend this opinion as well as to propose changes to the formulas in order to obtain better results if the train is currently braking to a target and to demonstrate the resulting behaviour in this article.

1 Introduction

ETCS is a train protection system which – in addition to ensuring interoperability – provides a full speed supervision function which considerably improves safety, especially in those countries where their legacy systems do not have such a function. The full speed supervision not only continuously checks that the allowed (ceiling) speed permitted for the train for a given piece of track is not exceeded at any given location, but also that the train is still able to decrease its speed so that it does not exceed any allowed (target) speed permitted at a further (target) location in the case of a speed decrease. In the case of the latter, the ETCS on-board – for a given estimated speed/acceleration of the train – creates a prediction and calculates various supervision limits which provide the time needed to slow the train down for any upcoming target. It must be noted that this article is mainly based on the reverse engineering of the related ETCS formulas, as we (the AŽD Praha company) were not a full member of UNISIG, a technical body which was created under the umbrella of the UNIFE to represent the industry in the field of the maintenance and development of ETCS specifications, at the time when the harmonised braking curves functionality was introduced to the ETCS Baseline 3 specifications in 2012. We therefore had no information from any of the related discussions. It must also be noted that a similar behaviour of the ETCS on-board was observed in the past when AŽD Praha delivered its first Automatic Train Operation (ATO) system that co-operated with ETCS within the scope of the Czech ETCS Pilot Project in 2008.

2 The proposal for improvements of the ETCS braking curves functionality

2.1 The proposal for the calculation of the ETCS supervision limits

2.1.1 General introduction

As already mentioned, the ETCS on-board creates a prediction with regard to the behaviour of the train approaching a target.

2 Vorgeschlagene Verbesserungen der Funktionalität von ETCS-Bremskurven

2.1 Vorschlag für Berechnung der ETCS-Überwachungsgrenzen

2.1.1 Allgemeine Einführung

Wie bereits erwähnt, erstellt das ETCS-Fahrzeuggerät eine Vorhersage des Verhaltens eines Zuges, der sich einem Bremsziel nähert. Dazu werden die Bremsmodelle verwendet, die geschwindigkeitsabhängige Verzögerungen zur Erstellung von Zwangsbrems- oder Betriebsbremsablaufkurven (EBD/SBD) liefern und die auch die äquivalenten Bremsaufbauzeiten festsetzen. Neben den sich aus den Modellen ergebenden Angaben werden auch anders festgelegte Zeitintervalle verwendet, um den Lokführer zu informieren. Es werden Zeitangaben für verschiedene Überwachungsgrenzen berechnet, für die die geschätzte Zuggeschwindigkeit (V_{est}) und Beschleunigung (A_{est}) verwendet werden, die zu Beginn jeder Bremskurvenberechnung gemessen werden: Reaktionszeit des Triebfahrzeugführers (T_f), um den Zug rechtzeitig zu verlangsamen und nicht zu schnell zu fahren ($T_{indication}$); Reaktionszeit des Tf, um den Zug zu verlangsamen, ohne dass ETCS eingreifen muss (T_{driver}); Zeit zum Aufbau der vollen Bremskraft der Betriebsbremse (T_{bs}); Zeit zum Aufbau der vollen Bremskraft der Zwangsbremse (T_{be}); Zeit für die Bremsung auf den Zielpunkt ($t_{braking}$).

Wir konzentrieren uns in diesem Beitrag nur auf die EBD-Kurve. Um die obengenannten Zeiten festzustellen, geht das ETCS-Fahrzeuggerät davon aus, dass die zu Beginn der Berechnung gemessene Zuggeschwindigkeit V_{est} konstant bleibt, bis der Zug die EBD-Kurve erreicht. In diesem Teil der Vorhersage ist daher $v(t) = V_{est}$. Weiterhin wird angenommen, dass die Geschwindigkeit gemäß der EBD-Kurve abnimmt gemäß A_{safe} , was bedeutet, dass $v(t) = f(A_{safe})$; siehe Formel (1). Es gibt eine Ausnahme, die gilt, wenn der Zug zum Zeitpunkt der Berechnung beschleunigt, d. h. wenn $A_{est} > 0 \text{ m/s}^2$; siehe Formel (2). In diesem Fall wird angenommen, dass sich die Geschwindigkeit während der äquivalenten Bremsaufbauzeit für die Zwangsbremse (T_{be}) gemäß A_{est} erhöht, d. h. $v(t) = f(A_{est})$ zwischen der EBI-Überwachungsgrenze und der EBD-Kurve, um sicherzustellen, dass die Zeit, in der die Zwangsbremse ihre Bremskraft voll entwickelt, nicht verkürzt wird.

Das Obengenannte kann in den folgenden zwei Formeln ausgedrückt werden – (1) und (2):

- Für einen Zug, der zum Zeitpunkt der Berechnung mit konstanter Geschwindigkeit fährt oder verzögert ($A_{est} \leq 0 \text{ m/s}^2$):

$$d_{CSM/TSM} = \int_0^{t_{braking}} v(A_{safe}) dt + \int_{t_{braking}}^{t_{braking} + T_{be} + T_{bs2} + T_{driver} + T_{indication}} V_{est} dt \quad (1)$$

- Für einen Zug, der zum Zeitpunkt der Berechnung beschleunigt ($A_{est} > 0 \text{ m/s}^2$):

$$d_{CSM/TSM} = \int_0^{t_{braking}} v(A_{safe}) dt + \int_{t_{braking}}^{t_{braking} + T_{be}} v(A_{est}) dt + \int_{t_{braking} + T_{be}}^{t_{braking} + T_{be} + T_{bs2} + T_{driver} + T_{indication}} V_{est} dt \quad (2)$$

Der in (1) und (2) ausgedrückte Ansatz hat allerdings einen Nachteil. Es kann durchaus vorkommen, dass ein Zug, der bereits ausreichend auf ein Ziel bremst, vom ETCS dennoch systematisch zwangsge-

brake wird. Dies geschieht durch die Bremsmodelle, die geschwindigkeitsabhängige Verzögerungen in order to create Emergency Brake or Service Brake Deceleration (EBD/SBD) curves and also give the equivalent brake build up times. In addition to the time intervals coming from the models, it also uses other defined time intervals to advise the driver. In order to provide these times – i. e. for the driver to slow the train down sufficiently in order not to overspeed ($T_{indication}$), for the driver to slow the train down without a need for ETCS to intervene (T_{driver}), for the service brake to fully develop its brake force (T_{bs}), for the emergency brake to fully develop its brake force (T_{be}), and for the train to brake to a new target ($t_{braking}$) – it calculates various supervision limits, for which it uses the estimated train speed (V_{est}) and acceleration (A_{est}), as measured at the beginning of each braking curves calculation.

We will only focus on the EBD curve in this article. In order to provide the aforementioned times, the ETCS on-board assumes that the train speed V_{est} (measured at the beginning of the calculation) remains constant until the train reaches the EBD curve. Thus, $v(t) = V_{est}$ in this part of the prediction. The speed is then considered to decrease as per the EBD curve; i. e. as per A_{safe} , meaning $v(t) = f(A_{safe})$; see formula (1). There is one exception which applies when the train is accelerating at the time the calculation is made; i. e. $A_{est} > 0 \text{ m/s}^2$; see formula (2). In this case, the speed is considered to increase throughout the equivalent brake build up time for the emergency brake (T_{be}) as per A_{est} ; i. e. $v(t) = f(A_{est})$ between the EBI supervision limit and the EBD curve in order to ensure that the time for the emergency brake to fully develop its brake force is not shortened. The aforementioned can be expressed using the following two formulas, (1) and (2):

- For a train which is either running at a constant speed or decelerating ($A_{est} \leq 0 \text{ m/s}^2$) at the time the calculation is made:

$$d_{CSM/TSM} = \int_0^{t_{braking}} v(A_{safe}) dt + \int_{t_{braking}}^{t_{braking} + T_{be} + T_{bs2} + T_{driver} + T_{indication}} V_{est} dt \quad (1)$$

- For a train which is accelerating ($A_{est} > 0 \text{ m/s}^2$) at the time the calculation is made:

$$d_{CSM/TSM} = \int_0^{t_{braking}} v(A_{safe}) dt + \int_{t_{braking}}^{t_{braking} + T_{be}} v(A_{est}) dt + \int_{t_{braking} + T_{be}}^{t_{braking} + T_{be} + T_{bs2} + T_{driver} + T_{indication}} V_{est} dt \quad (2)$$

However, the approach expressed in (1) and (2) has a drawback. It may very well occur that a train which is braking sufficiently to a target can easily (and systematically) be further braked by ETCS, which then has a very negative effect on railway operations and possibly on the overall capacity of the railway infrastructure. In our opinion, this phenomenon should be avoided as much as possible, which we have tried to explain in more detail in the next chapter (2.1.2).

2.1.2 Why should ETCS take the actual level of train braking into account?

The current approach, expressed in formulas (1) and (2), may cause that a train, which is already braking sufficiently ($A_{est} <$

bremst wird, was sehr negativ den Eisenbahnbetrieb und möglicherweise auch die Gesamtkapazität der Bahninfrastruktur beeinträchtigt. Unserer Meinung nach sollte dieses Phänomen möglichst vermieden werden, was wir im nächsten Kapitel (2.1.2) näher erläutern werden.

2.1.2 Warum sollte ETCS die tatsächliche Bremsung des Zuges berücksichtigen?

Der aktuelle, in den Formeln (1) und (2) ausgedrückte Ansatz kann dazu führen, dass ein Zug, der ausreichend bremst ($A_{est} < 0 \text{ m/s}^2$) – und der daher damit die Zielgeschwindigkeit vor dem Zielort erreichen kann – in der Mitte seiner Bremsphase vom ETCS gebremst wird. Dies wird in Bild 1 für einen bestimmten Güterzug gezeigt, der sich der EOA/SvL nähert. Es ist zu beachten, dass nur die aus der EBD-Kurve abgeleiteten ETCS-Überwachungsgrenzen berücksichtigt werden und keine Ungenauigkeiten bei der Entfernungsmessung betrachtet sind. Die Strecke ist flach (Neigung = 0‰) und in dem ETCS-Fahrzeuggerät ist die Verwendung der Betriebsbremse in Target Speed Monitoring (TSM) eingestellt. Der Zug ist ein Lambda-Zug mit $\lambda = 117\%$, Länge = 640 m, Bremsen in G-Stellung; zugehörige integrierte Korrekturfaktoren (K_{intb} , K_{intt} , K_{intv}) haben alle ihre Standardwerte. Dies bedeutet, dass $A_{\text{safe}} = 0,6 \text{ m/s}^2$ (bis zu ca. 130 km/h), $T_{\text{be}} = 15,5 \text{ s}$.

Nehmen wir an, dass der Zug reibungslos bremst, sodass er 20 m vor der EOA / SvL anhält. Zum Beispiel bremst der Zug momentan von der Geschwindigkeit von 90 km/h mit einer konstanten Verzögerung von $0,3 \text{ m/s}^2$. Das bedeutet, dass der Zug innerhalb von 1042 m zum Stillstand kommt. Dies wird durch die blaue Kurve (Parabel) ausgedrückt, die in Bild 1 den bremsenden Zug darstellt. Wie bereits erwähnt, senkt der Zug seine Geschwindigkeit, und Bild 1 zeigt mehrere Schritte von V_{est} sowie zugehörige ETCS-Überwachungsgrenzen, die jedes Mal erneut berechnet werden. In Bild 1 ist ersichtlich: Je niedriger die geschätzte Zuggeschwindigkeit ist, desto näher ist der Zug an der EBD-Kurve des Ziels (EOA / SvL) und desto mehr Überwachungsgrenzen werden vom Zug überschritten. Dies spiegelt sich in der Statusänderung der ETCS-Überwachung wider, die sich aus der Geschwindigkeits- und Entfernungüberwachung ergibt. Gleichzeitig wechselt das ETCS-Fahrzeuggerät in den Interventionsstatus (IntS) und die Zwangsbremsausgabe (EB) ist aktiviert. Dies geschieht für den gegebenen Zug etwa 650 m vor der EOA / SvL. Und das, obwohl der Zug ca. 20 m vor der EOA / SvL seinen Stillstand erreicht hätte (siehe Fuß der blauen Parabel).

Der Grund der unnötigen Bremsung des Zuges (Bild 1) ist, dass das ETCS-Fahrzeuggerät die Verzögerung des Zuges bei der Berechnung der Überwachungsgrenzen nicht berücksichtigt, insbesondere der Interventionsgrenzen.

2.1.3 Wie kann ETCS die tatsächliche Bremsung des Zuges berücksichtigen?

In diesem Kapitel wird unser neuer Vorschlag zur Berechnung der ETCS-Überwachungsgrenzen beschrieben, mit dem der Nachteil des oben beschriebenen derzeitigen Ansatzes gemindert werden soll. **Mit diesem neuen Vorschlag kann ETCS die aktuelle Verzögerung des Zuges (A_{est}) berücksichtigen.** Damit kann das ETCS vorhersagen, ob der Zug in der Lage ist, vor der EOA / SvL anzuhalten (oder allgemein vor einem Ziel ausreichend abzubremsen) und Korrekturmaßnahmen (Hinweise, Eingriffe) nur dann zu ergreifen, wenn dies wirklich erforderlich ist. Dies ist aus Sicht des Eisenbahnbetriebs und, unserer Meinung nach, auch aus Sicht der Sicherheit besser (siehe unten).

Aus diesem Grund schlagen wir vor, die Berechnung nicht vom Schnittpunkt der Linie bei V_{est} und der EBD-Kurve aus zu starten, sondern vom Schnittpunkt der Bremskurve mit aktueller Verzögerung ($= f(A_{\text{est}})$) und der EBD-Kurve ($= f(A_{\text{safe}})$) aus. Gleichzeitig wird nicht die Zeit hinzuge-

0 m/s^2) to be able to reach the target speed before the target location, is further braked by ETCS during its braking to the target. This is demonstrated for a particular freight train which is approaching the EOA / SvL in fig. 1. Please note that only the ETCS supervision limits derived from the EBD curve are considered and no distance measurement inaccuracy has been included. The track is level (gradient = 0‰) and the ETCS on-board has inhibited the use of the service brake in target speed monitoring (TSM). The train is a lambda train with $\lambda = 117\%$, the length = 640 m, and the brakes are in G position; the related integrated correction factors (K_{intb} , K_{intt} , K_{intv}) all have their default values. This means that $A_{\text{safe}} = 0.6 \text{ m/s}^2$ (up to approximately 130 km/h), $T_{\text{be}} = 15.5 \text{ s}$.

Let us assume that such a train is braking smoothly so that it will stop 20 m in rear of the EOA / SvL. For example, the braking train is currently slowing down from the speed of 90 km/h with a constant deceleration of 0.3 m/s^2 . This means that the train will reach a standstill within 1,042 m. This is expressed by the blue curve (parabola) representing the braking train in fig. 1. As has already been stated, the train is decreasing the speed and fig. 1 depicts several steps of V_{est} and also related ETCS supervision limits which are re-calculated every time.

As you can see in fig. 1, the lower the estimated train speed is, the closer the train is to the EBD curve of the upcoming target (EOA / SvL), and therefore the more supervision limits are exceeded by the train. This is reflected by the change of status of the ETCS supervision, resulting from the speed and distance monitoring function. As soon as the ETCS on-board switches to Intervention Status (IntS), the Emergency Brake (EB) command is activated. This happens for the given train about 650 m in rear of the EOA / SvL. And it happens despite the fact that the train would have reached a standstill approximately 20 m in rear of the EOA / SvL (see the foot of the blue parabola).

The reason why the train is unnecessarily braked (fig. 1) is that the ETCS on-board does not consider the train's deceleration when calculating the supervision limits, especially the intervention ones.

2.1.3 How could ETCS take the actual level of the train's braking into account?

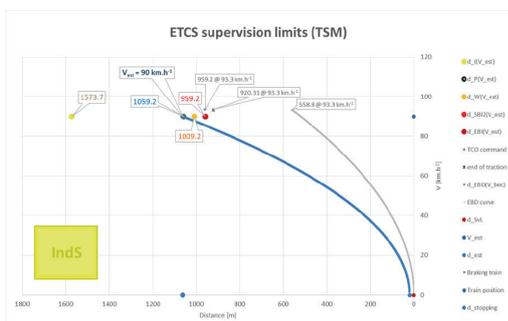
This chapter describes our new proposal for calculating the ETCS supervision limits, the aim of which is to mitigate the drawback of the current approach described above. **This new proposal will enable ETCS to consider the current deceleration of the train (A_{est}).** This will allow ETCS to predict whether the train is able to stop in rear of the EOA / SvL (or to slow down sufficiently in rear of any target in general) and to take any corrective actions (indications, interventions) only if truly necessary. This is better from a railway operations point of view and in our opinion also from a safety point of view (see further).

For this reason, we propose that the calculation should not start from the intersection of the line at V_{est} and the EBD curve, but from the intersection of the braking train's parabola ($= f(A_{\text{est}})$) and the EBD curve ($= f(A_{\text{safe}})$). As well as the time needed for the train / system and / or the driver to act should not be gained from the distance travelled at a constant speed if the train is already known to be braking, i. e. when A_{est} measured at the beginning of the calculation is negative ($A_{\text{est}} < 0 \text{ m/s}^2$). Instead, we propose using to use the value of the estimated deceleration (A_{est}) or the value which has been proven to be trusted (A_{trusted}) (to be on the safe side) to derive the related ETCS supervision limits (with the intersection of the train's braking parabola and

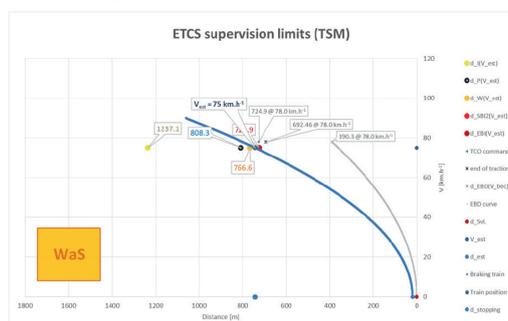
Bild 1: Ausreichend bremsender Zug gebremst vom ETCS-Fahrzeuggerät (bei aktuell spezifizierten Berechnungen)

Fig. 1: A sufficiently braking train subjected to unwanted braking by the ETCS on-board (using the currently specified calculations)

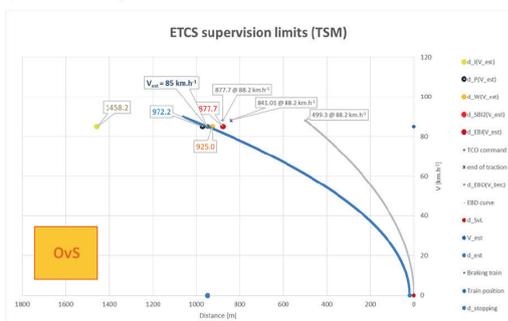
1. $V_{est} = 90 \text{ km.h}^{-1}$, Indication Status (IndS) / Anzeige



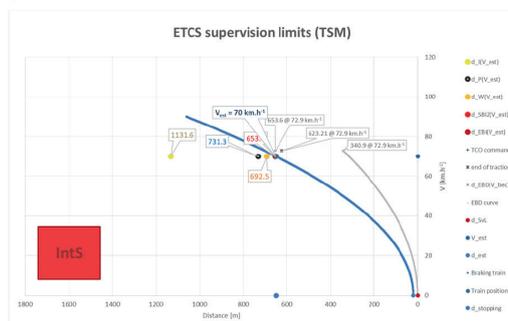
4. $V_{est} = 75 \text{ km.h}^{-1}$, Warning Status (WaS) (2) / Warnung



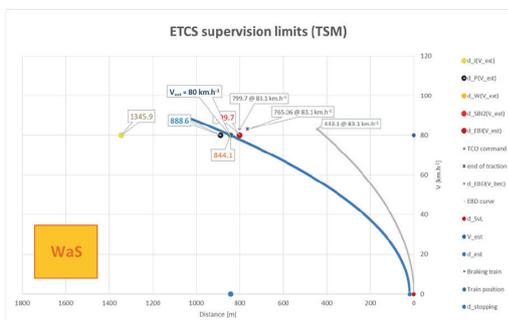
2. $V_{est} = 85 \text{ km.h}^{-1}$, Overspeed Status (OvS) / Übertempo



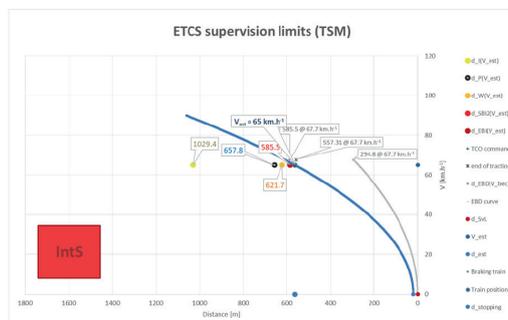
5. $V_{est} = 70 \text{ km.h}^{-1}$, Intervention Status (IntS)*) / Einsatz



3. $V_{est} = 80 \text{ km.h}^{-1}$, Warning Status (WaS) / Warnung



6. $V_{est} = 65 \text{ km.h}^{-1}$, Intervention Status (IntS) (2) / Einsatz



*) Der Interventionsstatus sowie der EB-Befehl werden ca. 650 m von der EOA/SvL ausgelöst. Der Zug mit einer solchen Verzögerung hätte jedoch 20 m von der EOA/SvL den Stillstand erreichen können. So; Grundsätzlich ist es nicht erforderlich, diese Zwangsbremung auszulösen.

*) The Intervention Status and the EB command are triggered ca 650 m in front of the EOA/SvL. However, a train with such deceleration could reach a standstill 20 m in rear of the EOA/SvL. So, in principle, there is no need to trigger this emergency braking.

rechnet, die der Zug/das System oder der Lokführer benötigt, um aus der zurückgelegten Strecke mit konstanter Geschwindigkeit zu handeln, wenn bekannt ist, dass der Zug bereits bremst, d.h. wenn A_{est} gemessen zum Beginn der Berechnung, negativ ist ($A_{est} < 0 \text{ m/s}^2$). Wir schlagen stattdessen vor, den Wert der geschätzten Verzögerung (A_{est}) zu verwenden oder den sicherheitlich belastbaren Wert ($A_{trusted}$) und von diesem die zugehörigen ETCS-Überwachungsgrenzen abzuleiten (mit dem Schnittpunkt der Bremskurve mit aktueller Verzögerung und der EBD-Kurve als Referenz). Dies bedeutet, dass mit diesem neuen Vorschlag die Zeit gewonnen wird, die der Zug zur Abbremsung benötigt, d.h. also Zeit, die der Zug benötigt, um seine kinetische Energie zu reduzieren (umzuwandeln), anstelle der Zeit, die benötigt wird, um eine Strecke mit konstanter Geschwindigkeit zu fahren, was ohnehin nicht der Fall ist, wenn der Zug bereits bremst.

the EBD curve as a reference). This means that the needed time is gained as a time that is used by the train to slow down, i.e. as the time needed for the train to reduce (convert) its kinetic energy (instead of the time needed to travel a distance at a constant speed, which is not constant anyway when the train is already braking).

Thus, we propose considering a constant deceleration (or even acceleration) A_{est} or $A_{trusted}$ i.e. the decreasing (or even increasing) speed $v = f(A_{est})$, for the calculation in the part in rear of the location where the train reaches the EBD/SBD curve; for the rest of the calculation, the speed should be (as currently) considered to be decreasing as per the EBD or SBD curve, i.e. $v = f(A_{safe})$ or $v = f(A_{expected})$. This can be expressed for any EBD-based target using the following formula:

Unser Vorschlag ist daher, eine konstante Verzögerung A_{est} oder $A_{trusted}$ zu betrachten, d. h. für die Berechnung im Abschnitt vor dem Ort, an dem der Zug die EBD/SBD-Kurve erreicht, die sinkende Geschwindigkeit $v = f(A_{est})$ zu verwenden. Für die restliche Berechnung wird angenommen, dass die Geschwindigkeit (wie derzeit) gemäß der EBD- oder SBD-Kurve sinkt; d. h. $v = f(A_{safe})$ oder $v = f(A_{expected})$. Dies kann – für jedes EBD-basierte Ziel – durch die folgende Formel ausgedrückt werden:

$$d_{CSM/TSM} = \int_0^{t_{braking}} v(A_{safe}) dt + \int_{t_{braking}}^{t_{braking} + T_{be} + T_{bs2} + T_{driver} + T_{indication}} v(A_{est}) dt \quad (3)$$

$$d_{CSM/TSM} = \int_0^{t_{braking}} v(A_{safe}) dt + \int_{t_{braking}}^{t_{braking} + T_{be} + T_{bs2} + T_{driver} + T_{indication}} v(A_{est}) dt \quad (3)$$

Fig. 2 depicts how the results would look like if the current deceleration of the train (A_{est}) were considered in the calculations of the ETCS supervision limits (see the limits marked with blue frames, i. e. the ones which lie on the braking train's parabola). As you can see, the more the train is braking (A_{est} is greater), the more further ahead of the train the ETCS supervision limits are, and the more freedom the driver or the ATO system has to drive the train. Note: this article will fur-

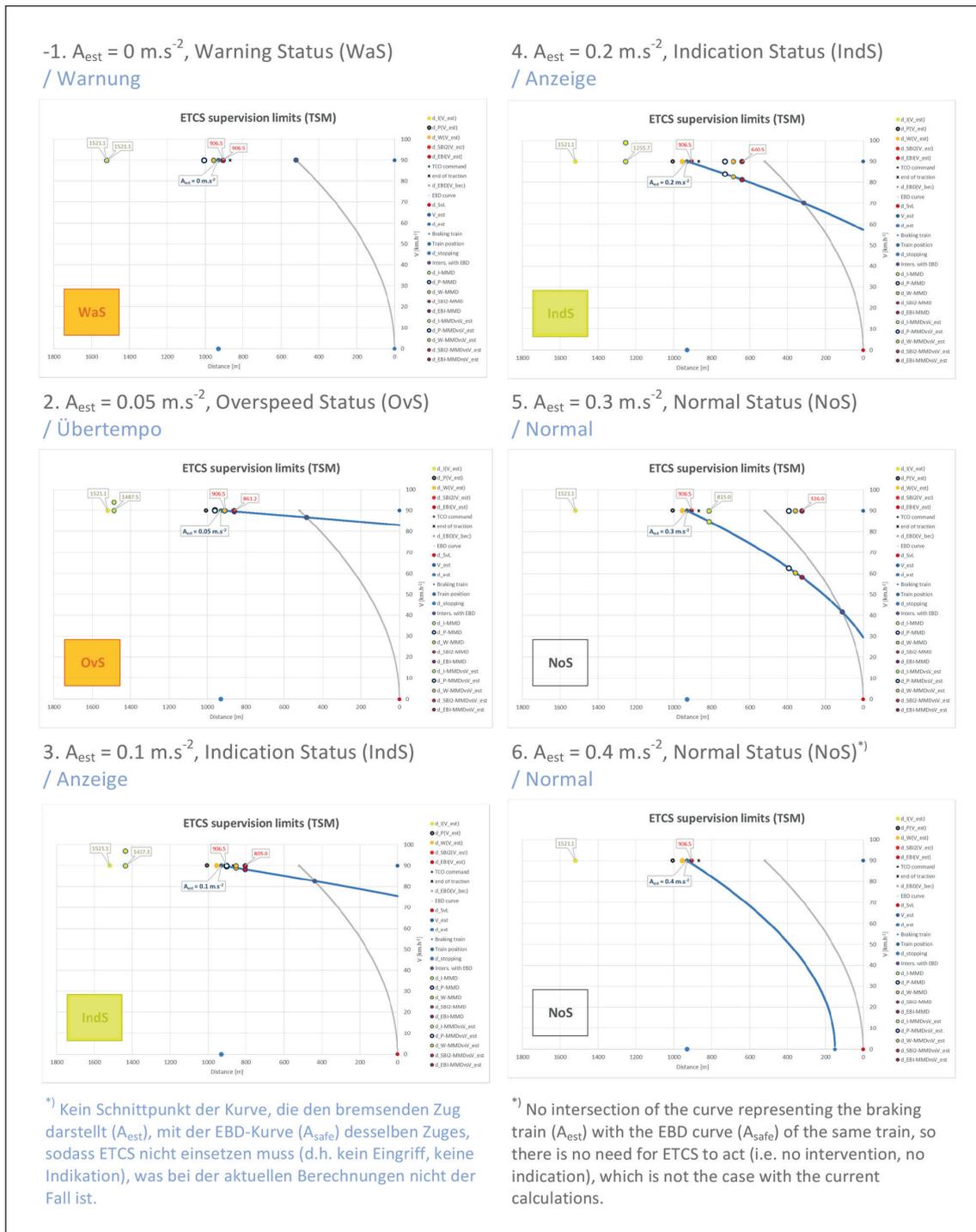


Bild 2: Demonstration der Auswirkung der Bremsstufe (A_{est}) des Zuges auf die Positionen der entsprechenden Überwachungsgrenzen, wenn dies von dem ETCS-Fahrzeuggerät berücksichtigt wird (unter Verwendung der neu vorgeschlagenen Berechnungen)

Fig. 2: A demonstration of the influence of the train's braking level (A_{est}) on the locations of the related supervision limits, when considered by the on-board ETCS (using the newly proposed calculations)

Tab. 1: ETCS-Überwachungsgrenzen: EBI, SBI2, W, P, und I (auf der EBD-Kurve basiert)

Tab. 1: ETCS supervision limits: EBI, SBI2, W, P, and I (based on the EBD curve)

Name		Time provided / Angegebene Zeit	Constant speed (V_{est}) / Konstante Geschwindigkeit (V_{est}) [SUBSET-026]	Constant acceleration (A_{est}) / Konstante Beschleunigung (A_{est}) [Marek, Myslivec, Drápal]
Reference for the following calculations / Referenz für die anschließenden Berechnungen	d_{EBD}	$t_{braking2SvL}$ (emergency braking to the SvL) / (Zwangsbremmung auf SvL)	$d_{EBD}(V_{est})$	$d_{EBD}(V_{inters}, A_{est})$ $V_{inters} = \sqrt{\frac{A_{safe} \cdot (V_{est}^2 + 2 \cdot A_{est} \cdot d_{SvL})}{A_{safe} + A_{est}}}$ <p>(Note 1: The above formula is valid only if $A_{safe} =$ a constant at least for the speed interval of $(0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}; V_{inters})$) Note 2: If $A_{est} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, then $V_{inters} = V_{est}$) (Bemerkung 1: Die obengenannte Formel ist gültig nur wenn $A_{safe} = \text{const.}$, mindestens für die Geschwindigkeit in Intervall $(0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}; V_{inters})$) Bemerkung 2: Wenn $A_{est} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, dann $V_{inters} = V_{est}$)</p>
EB Intervention / EB-Einsatz	d_{EBI}	T_{be} (equivalent brake build up time for EB) / (äquivalente Bremsaufbauzeit für EB)	$d_{EBD}(V_{est}) + V_{est} \cdot T_{be}$	$V_{\Delta d_{EBI}} = -A_{est} \cdot T_{be}, V_{d_{EBI}} = V_{inters} + V_{\Delta d_{EBI}}$ $d_{EBD}(V_{inters}, A_{est}) + \left(V_{inters} + \frac{V_{\Delta d_{EBI}}}{2} \right) \cdot T_{be}$
SB Intervention / SB-Einsatz	d_{SBI2}	T_{bs2} (equivalent brake build up time for SB) / (äquivalente Bremsaufbauzeit für SB)	$d_{EBI}(V_{est}) + V_{est} \cdot T_{bs2}$	$V_{\Delta d_{SBI2}} = -A_{est} \cdot T_{bs2}, V_{d_{SBI2}} = V_{d_{EBI}} + V_{\Delta d_{SBI2}}$ $d_{EBI}(V_{inters}, A_{est}) + \left(V_{d_{EBI}} + \frac{V_{\Delta d_{SBI2}}}{2} \right) \cdot T_{bs2}$
Warning / Warnung	d_W	$T_{warning}$	$d_{SBI2}(V_{est}) + V_{est} \cdot T_{warning}$	$V_{\Delta d_W} = -A_{est} \cdot T_{warning}, V_{d_W} = V_{d_{SBI2}} + V_{\Delta d_W}$ $d_{SBI2}(V_{inters}, A_{est}) + \left(V_{d_{SBI2}} + \frac{V_{\Delta d_W}}{2} \right) \cdot T_{warning}$
Permitted Speed / Erlaubte Geschwindigkeit	d_P	T_{driver}	$d_{SBI2}(V_{est}) + V_{est} \cdot T_{driver}$	$V_{\Delta d_P} = -A_{est} \cdot T_{driver}, V_{d_P} = V_{d_{SBI2}} + V_{\Delta d_P}$ $d_{SBI2}(V_{inters}, A_{est}) + \left(V_{d_{SBI2}} + \frac{V_{\Delta d_P}}{2} \right) \cdot T_{driver}$
Indication / Indikation	d_I	$T_{indication}$	$d_P(V_{est}) + V_{est} \cdot T_{indication}$	$V_{\Delta d_I} = -A_{est} \cdot T_{indication}, (V_{d_I} = V_{d_P} + V_{\Delta d_I})$ $d_P(V_{inters}, A_{est}) + \left(V_{d_P} + \frac{V_{\Delta d_I}}{2} \right) \cdot T_{indication}$

Bild 2 zeigt, wie die Ergebnisse aussehen würden, wenn die aktuelle Verzögerung des Zuges (A_{est}) bei den Berechnungen der ETCS-Überwachungsgrenzen berücksichtigt würde (siehe die mit blauen Rahmen gekennzeichneten Grenzen, d.h. diejenigen, die auf der Parabel des bremsenden Zuges liegen). Man kann erkennen: **Je mehr der Zug bremst (A_{est} ist größer), desto weiter vor dem Zug liegen die ETCS-Überwachungsgrenzen und desto mehr Freiheit hat der Lokführer oder das ATO-System, den Zug zu steuern.** Bemerkung: Die A_{est} wird in diesem Artikel näher betrachtet; $A_{trusted}$ kann jedoch auf die gleiche Weise betrachtet werden.

ther deal with A_{est} , but $A_{trusted}$ could be used in the very same manner.

2.1.4 A comparison of the two calculations: based on the constant speed (V_{est}) vs. acceleration (A_{est})

If we convert the general formulas mentioned above into more specific ones which are much closer to the formulas given in the ETCS SRS – SUBSET-026 [1], we receive tab. 1 and 2.

Note 1: Please note that the current train acceleration (A_{est}) in tab. 1 and 2 has a natural physical sign, while the acceleration A_{safe}

Name	Requirement/ Assumption / Erfordert/ Vorgenommen	Constant speed (V_{est}) / Konstante Geschwindigkeit (V_{est}) [SUBSET-026]	Constant deceleration (A_{est}) / Konstante Verzögerung (A_{est}) [Marek, Myslivec, Drápal]
Permitted speed / Erlaubte Geschwindigkeit (V_p)	If $d_{MSFE} = d_p$: $V_p = V_{est}$	$d_{\Delta dp,forVp} = V_{est} \cdot (T_{driver} + T_{bs2} + T_{be})$ 1. If $(d_{MSFE} + d_{\Delta dp,forVp}) < d_{svL}$: $V_p = V_{EBD} (d_{MSFE} + d_{\Delta dp,forVp})$ 2. If $(d_{MSFE} + d_{\Delta dp,forVp}) \geq d_{svL}$: $V_p = 0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$V_{\Delta dp,forVp} = -A_{est} \cdot (T_{driver} + T_{bs2} + T_{be})$, $d_{\Delta dp,forVp} = (V_{inters} + \frac{V_{\Delta dp,forVp}}{2}) \cdot (T_{driver} + T_{bs2} + T_{be})$ 1. If $(d_{MSFE} + d_{\Delta dp,forVp}) < d_{svL}$: $V_p = V_{EBD} (d_{MSFE} + d_{\Delta dp,forVp}) + V_{\Delta dp,forVp}$ 2. If $(d_{MSFE} + d_{\Delta dp,forVp}) \geq d_{svL}$: $V_p = 0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
Intervention speed / Bremsensatzgeschwindigkeit (V_{sbiz})	If $d_{MSFE} = d_{sbiz}$: $V_{sbiz} = V_{est}$	$d_{\Delta dsbiz,forVsbiz} = V_{est} \cdot (T_{bs2} + T_{be})$ 1. If $(d_{MSFE} + d_{\Delta dsbiz,forVsbiz}) < d_{svL}$: $V_{sbiz} = V_{EBD} (d_{MSFE} + d_{\Delta dsbiz,forVsbiz})$ 2. If $(d_{MSFE} + d_{\Delta dsbiz,forVsbiz}) \geq d_{svL}$: $V_{sbiz} = 0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$V_{\Delta dsbiz,forVsbiz} = -A_{est} \cdot (T_{bs2} + T_{be})$, $d_{\Delta dsbiz,forVsbiz} = (V_{inters} + \frac{V_{\Delta dsbiz,forVsbiz}}{2}) \cdot (T_{bs2} + T_{be})$ 1. If $(d_{MSFE} + d_{\Delta dsbiz,forVsbiz}) < d_{svL}$: $V_{sbiz} = V_{EBD} (d_{MSFE} + d_{\Delta dsbiz,forVsbiz}) + V_{\Delta dsbiz,forVsbiz}$ 2. If $(d_{MSFE} + d_{\Delta dsbiz,forVsbiz}) \geq d_{svL}$: $V_{sbiz} = 0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

Tab. 2: Bei ETCS angezeigte Geschwindigkeiten: die erlaubte Geschwindigkeit und Bremsensatzgeschwindigkeit (auf der EBD-Kurve basierend)
Tab. 2: ETCS displayed speeds: the permitted one and the speed of intervention (based on the EBD curve)

2.1.4 Vergleich der beiden Berechnungen: basierend auf der konstanten Geschwindigkeit (V_{est}) vs. der Beschleunigung (A_{est})

Wenn wir die oben genannten allgemeinen Formeln in konkretere Formeln umwandeln, die den in ETCS SRS - SUBSET-026 [1] angegebenen Formeln näher sind, erhalten wir die Tab. 1 und 2.

Anmerkung 1: Beachten Sie bitte, dass in den Tab. 1 und 2 die aktuelle Zugbeschleunigung (A_{est}) ein natürliches physikalisches Vorzeichen hat, während die Beschleunigung A_{safe} wie definiert beibehalten wird, d.h. als Verzögerung [1]. Dies bedeutet, dass A_{safe} den bremsenden Zug mit positiven Werten beschreibt, A_{est} hingegen mit negativen Werten.

Aus Tab. 1 geht hervor, dass beide Ansätze den beiden Grundvoraussetzungen folgen: Beide gehen vom Schnittpunkt mit der EBD-Kurve aus und beide bieten (beabsichtigt) die gleichen Zeiten, die für die definierten Aktionen benötigt werden. Letzteres gilt jedoch für den aktuellen Ansatz nur dann, wenn der Zug mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Für einen bereits bremsenden Zug werden Zeiten bereitgestellt, die länger sind als für die Ausführung der definierten Aktionen in der Realität benötigt. Ein besonderer Vergleich der beiden Ansätze ist in Bild 3 dargestellt, in dem die Berechnungen für den oben angegebenen Güterzug vorgenommen wurden und die Kompensation weder der Geschwindigkeit noch der Ungenauigkeit der Entfernungsmessung berücksichtigt wurde.

Anmerkung 2: In Realität ist die gesamte Berechnung komplexer. Die Verzögerung A_{safe} kann sich ändern, und zwar abhängig von der Entfernung (Änderungen der Steigung, spezielle Bremsinhibitionszonen etc.) und / oder von der Geschwindigkeit (unter dem Grenzwert V_{lim} etc.), d.h. die EBD-Kurve kann in mehrere miteinander verbundene Parabeln fragmentiert werden, d_p kann über die GUI-Kurve angepasst werden (sodass zwischen d_p und $d_{sbiz(2)}$ keine T_{driver} -Zeit mehr liegt), der TCO-Befehl kann auf die Warnüberwachungsgrenze verschoben werden (W) und damit auch das zu erwartende „Traktionsende“ verschoben wird etc. In diesem Beitrag wird nur das Grundprinzip beschrieben.

is kept as defined, i.e. as a deceleration [1]. This means that A_{safe} describes a braking train with positive values, while A_{est} does the same, but with negative ones.

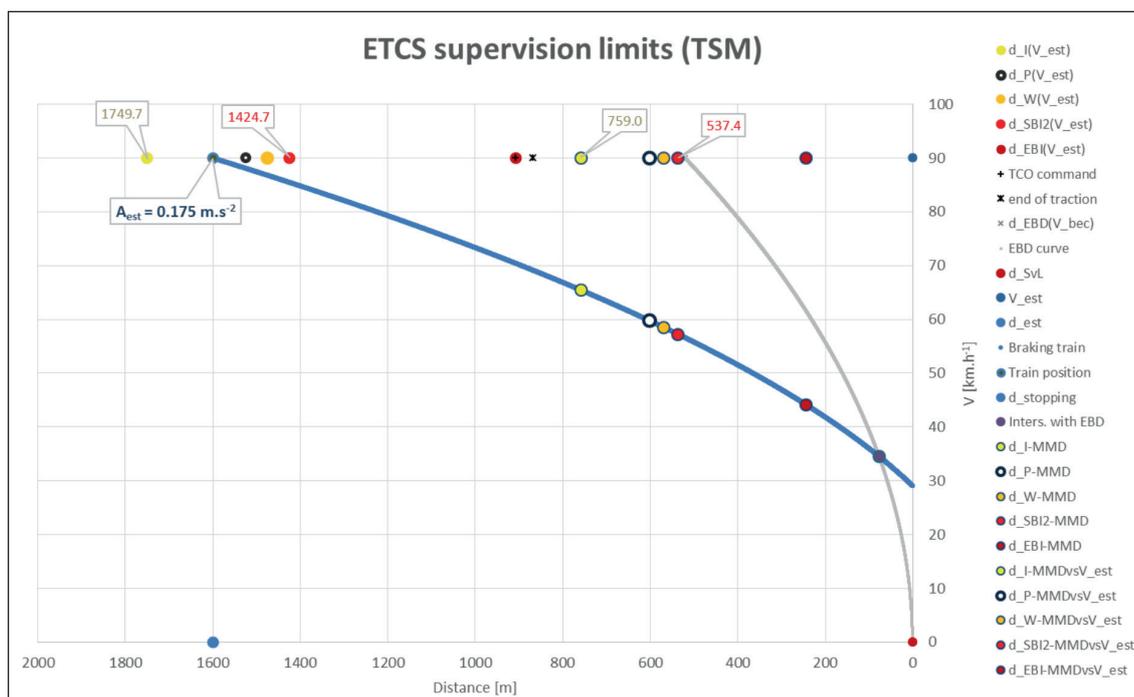
Tab. 1 clearly shows that both approaches follow the two basic premises: both start from the intersection with the EBD curve and both (intend to) provide the same times needed for the defined actions. However, the latter is only true for the current approach when the train is running at a constant speed. In the case of a currently braking train, it provides times which are greater than the ones needed for performing the defined actions. A particular comparison of the two approaches is provided in fig. 3, where the calculations were made for the aforementioned freight train and the compensation of neither the speed nor the distance measurement inaccuracy was considered.

Note 2: The whole calculation is more complex in reality. Deceleration A_{safe} can change depending on the distance (changes of gradient, special brake inhibition zones, ...) and / or speed (lower than the limit V_{lim} , ...), i.e. the EBD curve can be fragmented into several interconnected parabolas, d_p can be adjusted using a GUI curve (so that there is no more T_{driver} time in between d_p and $d_{sbiz(2)}$), the TCO command can be shifted to the Warning supervision limit (W), and thus the expected “end of traction” is also shifted, etc. Here, only the very basic principle is described in this article.

As can be seen in fig. 3, there is a difference of 887 m (for the SBIZ limit, i.e. for the first brake intervention – see the red figures) and 991 m (for the Indication limit, i.e. for the first indication – see the yellow figures) when considering a train speed of 90 km/h and deceleration of 0.175 m/s². So, the new calculations (approach) proposed in this article allow a train to travel closer to the target (in terms of both the indications and the braking intervention) when the train is currently braking.

Bild 3: Vergleich der beiden Ansätze zur Berechnung der ETCS-Überwachungsgrenzen: der aktuelle Ansatz (Punkte) und der neue Ansatz (Punkte mit blauem Rahmen)

Fig. 3: A comparison of the two approaches to calculating the ETCS supervision limits: the current one (points) vs. the new approach (points with a blue frame)



Wie aus Bild 3 ersichtlich, ergibt sich eine Differenz von 887 m (für die SBI2-Grenze, d. h. für den ersten Bremsenriff – siehe rote Zahlen) und 991 m (für die Indikationsgrenze, d. h. für die erste Indikation – siehe gelbe Zahlen) unter Betrachtung der Zuggeschwindigkeit von 90 km/h und seiner Verzögerung von 0,175 m/s². Die in diesem Beitrag vorgeschlagenen neuen Berechnungen (Ansätze) ermöglichen es daher einem Zug, näher an das Ziel heranzufahren (sowohl im Sinne von Indikationen als auch von Bremsenriffen), wenn der Zug bereits bremst.

Aus Bild 3 geht auch hervor, dass in beiden Ansätzen die Referenz für die Berechnung der ETCS-Überwachungsgrenzen ähnlich ist – der Schnittpunkt der EBD-Kurve (= $f(A_{safe})$) mit:

- entweder V_{est} (d. h. mit der Linie, die den mit konstanter Geschwindigkeit V_{est} fahrenden Zug darstellt) (aktueller Ansatz),
- oder V_{est} reduziert für die durch das Bremsen des Zuges verursachte Senkung der Geschwindigkeit (d. h. mit der durch $v(t) = f(A_{est})$ gegebenen Parabel) (neuer Ansatz).

Der Unterschied besteht jedoch darin, dass, wenn es keinen Schnittpunkt zwischen der Parabel des bremsenden Zuges (= $f(A_{est})$) und der EBD-Kurve (= $f(A_{safe})$) gibt, das ETCS-Fahrzeuggerät im Falle des neuen Ansatzes dann weder eine Indikation noch einen Eingriff gibt. Dies lässt dem Lokführer (oder dem ATO-System) mehr Freiheit beim Steuern des Zuges. Nur im Fall, dass dieser Schnittpunkt gefunden wird (d. h. dass tatsächlich die Möglichkeit besteht, dass der Zug in Zukunft die EBD-Kurve verletzt), werden dem Lokführer / Zug Indikationen und möglicherweise Bremsenriffe gegeben. Beim aktuellen Ansatz gibt es noch einen Schnittpunkt und somit immer Indikationen / Bremsenriffe für den sich nähernden Zug.

Sofern die Verzögerung des in den Berechnungen berücksichtigten Zuges konstant bleibt ($A_{est} = const.$), geben die neuen Formeln für den bremsenden Zug die Zeit(en) an, die der Zug, das Bremssystem und der Lokführer zum Einbremsen zu dem überwachten Ziel benötigen, ebenso wie die aktuell angegebene Formel für den Zug, der sich dem Ziel mit konstanter Geschwindigkeit nähert ($V_{est} = const.$). Für die Züge, die sich dem Ziel tatsächlich mit einer konstanten Geschwindigkeit nähern (d. h. wenn die

It is also clear from fig. 3 that the reference for the ETCS supervision limit calculation is similar in both approaches – the intersection of the EBD curve (= $f(A_{safe})$) with:

- either V_{est} (i. e. with the line representing the train running at constant speed V_{est}) (the current approach),
- or V_{est} reduced for the speed decrease caused by the braking of the train (i. e. with the parabola given by $v(t) = f(A_{est})$) (the new approach).

However, the difference lies in the fact that if there is no intersection of the braking train's parabola (= $f(A_{est})$) and the EBD curve (= $f(A_{safe})$), no indication is given and no intervention is imposed by the ETCS on-board in the case of the new approach. This leaves the driver (or the ATO system) the freedom to drive the train. Indications and possible interventions are only given to the driver / train if this intersection is found (meaning that there truly is the possibility that the train could overpass the EBD curve in the future). In the case of the current approach, there is still an intersection, and thus there are always indications / interventions for the approaching train.

The new formulas give for the train that is already braking the same time(s) necessary for the train, the brake system, and the driver / ATO system to slow down in rear of the supervised target, as do the ones currently specified for a train approaching the target at a constant speed ($V_{est} = const.$), provided that the deceleration of the train considered in the calculations remains constant ($A_{est} = const.$). The new formulas correspond to the current formulas for trains which are actually approaching the target at a constant speed (i. e. with the acceleration measured at the time the calculation is made of $A_{est} = 0$ m/s²). This can be demonstrated by setting A_{est} in the right-hand column of tab. 1 and 2 as equal to 0. Thus, the formulas which have been newly proposed by the authors in this article present a generalisation of the current formulas that in addition allows to consider the actual acceleration of the train and to prevent an already sufficiently braking train from being further braked by ETCS.

zum Zeitpunkt der Berechnung gemessene Beschleunigung $A_{est} = 0 \text{ m/s}^2$, entsprechen die neuen Formeln den aktuellen Formeln. Dies kann demonstriert werden, wenn A_{est} in der rechten Spalte von den Tab. 1 und 2 gleich 0 gesetzt wird.

Die in diesem Beitrag von den Autoren neu vorgeschlagenen Formeln stellen daher eine Generalisation der aktuellen Formeln dar, die zusätzlich auch die tatsächliche Beschleunigung des Zuges berücksichtigen, insbesondere um zu vermeiden, dass der bereits ausreichend bremsende Zug vom ETCS gebremst wird.

2.2 Vorschlag zur Reduzierung der ETCS-äquivalenten Bremsaufbauzeit

Darüber hinaus schlagen wir vor, die äquivalente Bremsaufbauzeit für bereits bremsende Züge auf Basis von A_{est} zu reduzieren. Diese Zeit wird von dem ETCS-Fahrzeuggerät verwendet, um die Interventionsüberwachungsgrenzen abzuleiten (EBI, SBI2, SBI1). Dazu muss ETCS wissen, wie sich der Zug verhalten würde, wenn der Bremsbefehl ausgelöst wird. Das ETCS-Fahrzeuggerät muss den Bremsbefehl eine definierte Zeit vor dem Moment auslösen, wenn der Zug die EBD/SBD-Kurve erreicht, um damit sicherzustellen, dass die Bremse ihre Bremskraft ausreichend entwickeln kann. Zu diesem Zweck (beschränken wir uns nur auf ein Modell) wird die sogenannte äquivalente Bremsaufbauzeit verwendet, die ein Teil des ETCS-Bremsmodells ist. Dies ist laut Definition das Zeitintervall, in dem die Bremse ihre Bremskraft von Null auf 95 % der vollen Bremskraft aufbaut.

Wenn der Zug gerade auf ein Ziel bremst, muss nicht die gesamte äquivalente Bremsaufbauzeit berücksichtigt werden, da ein Teil davon bereits von der Bremse verwendet wurde, um die Bremskraft (oder Verzögerung) auf den aktuellen Wert zu entwickeln. Daher sollte es sehr gut möglich sein, die Bremserrückmeldungzeit ($T_{increase}$), die ein Teil der äquivalenten Bremsaufbauzeit ist ($T_{brake\ build\ up}$), zu reduzieren, wobei zu berücksichtigen ist, dass noch eine gewisse Reaktionszeit der Bremse ($T_{brake\ react}$) erforderlich ist.

Dies ergibt sich aus der folgenden Formel (4) [1]:

$$T'_{brake\ build\ up} = T_{brake\ react} + \frac{1}{2} \cdot T_{brake\ increase} \tag{4}$$

wobei $T_{brake\ react}$ das Zeitintervall ist zwischen dem Bremsbefehl und dem Moment, in dem die Bremsverzögerung zuzunehmen beginnt, und $T_{brake\ increase}$ das Zeitintervall, in dem die Bremsverzögerung von Null auf 95 % der vollständigen Bremsverzögerung ansteigt (A_{full}) [1]. Um die aktuelle Verzögerung (A_{est}) für die Reduzierung der äquivalenten Bremsaufbauzeit zu berücksichtigen, sollte der Wert der $T_{brake\ increase}$ auf den Wert der $T_{brake\ increase} = f(A_{est})$ reduziert werden, wie in Formel (5) angegeben:

$$T'_{brake\ build\ up} = T_{brake\ react} + \frac{1}{2} \cdot T'_{brake\ increase}(A_{est}) \tag{5}$$

Betrachten wir weiter, dass $T'_{brake\ increase}(A_{est})$ das Zeitintervall ist, in dem die Bremsverzögerung vom Wert von A_{est} auf 95 % der vollständigen Bremsverzögerung (A_{full}) ansteigt (siehe Bild 4). Die Berechnung für diese Reduktion ist ein Teil der neu vorgeschlagenen Formel (6), die auch unter Berücksichtigung von 0 s als Minimum den Fall abdeckt, wenn $A_{est} > 0,95 A_{full}$:

$$T'_{brake\ increase}(A_{est}) = \text{MAX} \left\{ 0 \text{ s}; T_{brake\ increase} \cdot \left(1 - \frac{A_{est}}{0,95 \cdot A_{full}} \right) \right\} \tag{6}$$

Insbesondere, um die geschätzte Verzögerung (A_{est}) für die Reduzierung der äquivalenten Bremsaufbauzeit T_{be} (Zwangsbremse),

2.2 The proposal to reduce the ETCS equivalent brake build up time

In addition to the above, we also propose reducing the equivalent brake build up time for already braking trains based on A_{est} . This time is used by the ETCS on-board to derive the intervention supervision limits (EBI, SBI2; SBI1). In order to do so, ETCS needs to know how the train would behave if it triggered the braking command. The ETCS on-board needs to trigger the brake command at a defined time before the train reaches the EBD/SBD curve in order to ensure that the brake can sufficiently develop its braking force. For this purpose (let us limit ourselves to one model only), so-called equivalent brake build up time, which is part of the ETCS braking model, is used. According to the definition, this is the time interval needed for the brake to develop its brake force from zero to 95 % of the full brake force.

If the train is currently braking to a target, there is no need to consider the entire equivalent brake build up time because part of it has already been used by the brake to develop the currently applied brake force (deceleration) to the current value. And thus, it should very well be possible to reduce the brake increase time ($T_{increase}$), which is part of the equivalent brake build up time ($T_{brake\ build\ up}$), while respecting the fact that there is still some brake reaction (response) time ($T_{brake\ react}$).

This comes from the following formula (4) [1]:

$$T_{brake\ build\ up} = T_{brake\ react} + \frac{1}{2} \cdot T_{brake\ increase} \tag{4}$$

where $T_{brake\ react}$ is the time interval between the issuing of the brake command and the moment when the brake deceleration starts to increase and $T_{brake\ increase}$ is the time interval in which the brake deceleration increases from zero to the 95 % of full brake deceleration (A_{full}) [1]. In order to consider the current deceleration (A_{est}) for the reduction of the equivalent brake build up time, the value of $T_{brake\ increase}$ should be reduced to the value of $T_{brake\ increase} = f(A_{est})$, as indicated in formula (5):

$$T'_{brake\ build\ up} = T_{brake\ react} + \frac{1}{2} \cdot T'_{brake\ increase}(A_{est}) \tag{5}$$

Let us further consider that $T'_{brake\ increase}(A_{est})$ is the time interval in which the brake deceleration increases from the value of A_{est} to the 95 % of the full brake deceleration (A_{full}) (see fig. 4). The calculation for this reduction is part of the newly proposed formula (6), which also covers the case where $A_{est} > 0,95 \cdot A_{full}$ by taking 0 s as the minimum:

$$T'_{brake\ increase}(A_{est}) = \text{MAX} \left\{ 0 \text{ s}; T_{brake\ increase} \cdot \left(1 - \frac{A_{est}}{0,95 \cdot A_{full}} \right) \right\} \tag{6}$$

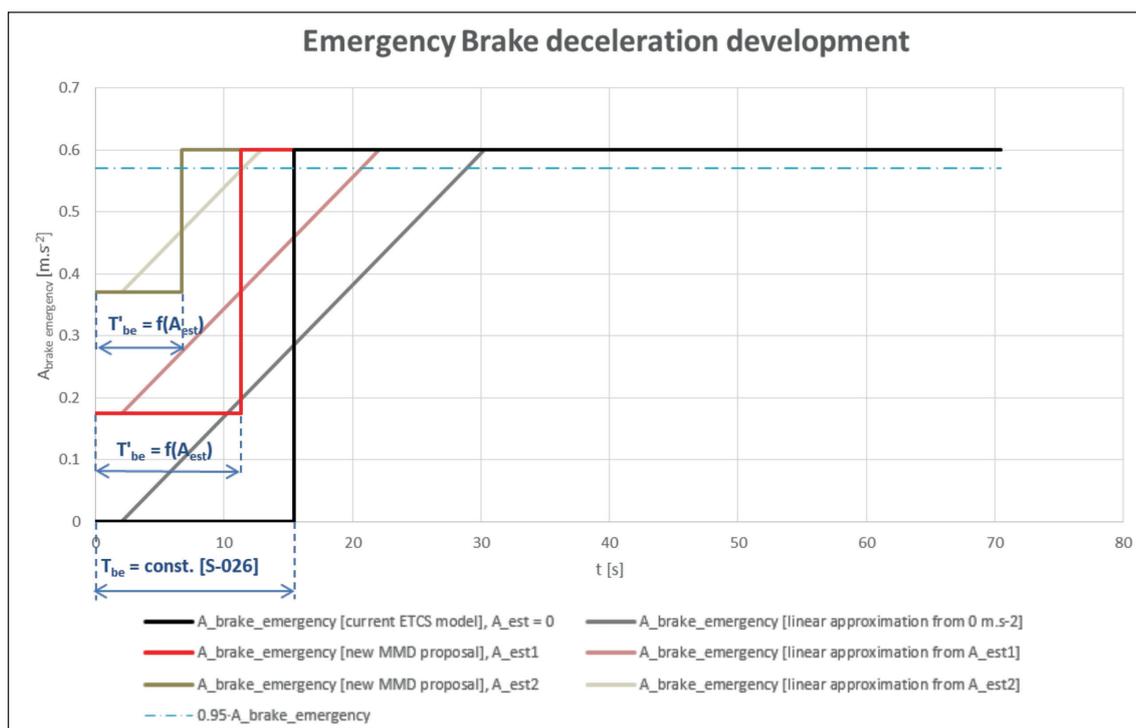
In particular, formulas (5) and (6) can be used with the following substitutions: $T_{brake\ build\ up} = T_{be}$ or T_{bs} , $T_{brake\ react} = T_{be\ react}$ or $T_{bs\ react}$, $A_{full} = A_{brake\ safe}$ or $A_{brake\ service}$ to consider the estimated deceleration (A_{est}) for the reduction of the equivalent brake build up time for T_{be} (emergency brake) and T_{bs} (service brake).

Applying these substitutions, for example, for the emergency brake (T_{be}) gives the following specific formula (7) for the reduced equivalent brake build up time T'_{be} :

$$T'_{be}(A_{est}) = T_{be\ react} + \text{MAX} \left\{ 0 \text{ s}; (T_{be} - T_{be\ react}) \cdot \left(1 - \frac{A_{est}}{0,95 \cdot A_{brake\ safe}} \right) \right\} \tag{7}$$

The reduction of the equivalent brake build up time T_{be} proposed in formula (7) is – for the aforementioned freight train – demonstrated for the two initial decelerations $A_{est} = 0.175$ and 0.37 m/s^2 in fig. 4. This reduction of T_{be} and possibly T_{bs2} , in the end, shortens the dis-

Bild 4: Demonstration des Vorschlags für eine Reduzierung der äquivalenten Bremsaufbauzeit (T_{be}) für Zwangsbremung basierend auf A_{est}
 Fig. 4: A demonstration of the proposal for the Emergency Brake equivalent brake force development time (T_{be}) reduction based on A_{est}



T_{bs} (Betriebsbremse) zu berücksichtigen, können die Formeln (5) und (6) mit den folgenden Substitutionen verwendet werden:
 $T_{brake\ build\ up} = T_{be}$ oder T_{bs} , $T_{brake\ react} = T_{be\ react}$ oder $T_{bs\ react}$, $A_{full} = A_{brake\ safe}$
 bzw. $A_{brake\ service}$.

Wendet man diese Substitutionen beispielsweise für die Zwangsbremse (T_{be}) an, erhält man die folgende spezifische Formel (7) für die reduzierte äquivalente Bremsaufbauzeit T'_{be} :

$$T'_{be}(A_{est}) = T_{brake\ react} + \text{MAX} \left\{ 0; (T_{be} - T_{brake\ react}) \cdot \left(1 - \frac{A_{est}}{0.95 \cdot A_{brake\ safe}} \right) \right\} \quad (7)$$

Die oben vorgeschlagene Reduzierung der äquivalenten Bremsaufbauzeit T_{be} – für den obengenannten Güterzug –, die in Formel (7) vorgeschlagen wird, ist für die beiden Anfangsverzögerungen $A_{est} = 0,175$ und $0,37 m/s^2$ in Bild 4 gezeigt. Bei dieser Reduzierung von T_{be} und ggf. T_{bs2} verkürzt sich am Ende der Abstand zwischen EBI- und EBD-Kurve sowie zwischen SBI2 und EBI. Und so **verschiebt diese Reduzierung schließlich die Überwachungsgrenzen** (EBI, SBI2 und andere) **weiter vor dem Zug**.

Daraus kann geschlossen werden, dass für eine solche Reduzierung der äquivalenten Bremsaufbauzeit (unter Angabe von $T_{brake\ react}$) neue Parameter in dem ETCS-Fahrzeuggerät erforderlich wären. Dies kann entweder ein Konfigurationsparameter oder eine aus der Zuglänge und der Bremsstellung (Personenzug, Güterzug in P, oder Güterzug in G) berechnete Angabe sein. Dies ist noch zu überlegen.

3 Schlussfolgerungen

Dieser Beitrag beleuchtet, warum das ETCS-Fahrzeuggerät die aktuelle Bremsverzögerung berücksichtigen sollte, wenn der Zug gerade bremst, und macht einen Vorschlag zur Umsetzung. Der Grund ist klar: **Je näher das erwartete Zugverhalten an der Realität liegt, desto mehr Sicherheit und Leistung bringt ETCS.**

- Wenn **erwartet** wird, dass der Zug **später den Stillstand erreicht**, als das in der Realität der Fall ist (z. B. wenn die aktuelle

tances between the EBI and the EBD curve as well as between SBI2 and EBI. And thus; finally, **this reduction again shifts the supervision limits** (EBI, SBI2, as well as the others) **to be further ahead of the train.**

It can be concluded that for the proposed reduction new ETCS on-board parameter(s) would be needed (specifying the value of $T_{brake\ react}$). It could be either a configuration parameter or an artefact calculated from the train length and the position of the brake (Passenger, Freight in P, or Freight in G). This has to be further analysed.

3 Conclusions

This article describes why the ETCS on-board should consider the deceleration when the train is already braking to a target and proposes how this could be done. The reason is clear: **the closer the expected train behaviour is to reality, the more safety and performance ETCS brings.**

- If the train is **expected** to be able to reach a **standstill later** than in reality (e.g. the current braking of the train is ignored), this results in **more restrictive behaviour of the ETCS on-board** (earlier interventions/indications) **and** in the end possibly in the **need of switching the ETCS on-board to a degraded state** in which **fewer supervision functions are available** (e.g. to Staff Responsible mode or to the supervision of a Release Speed instead of the supervision of Target Speed Monitoring limits which still monitors that the train speed is decreasing adequately on approach to a target and that can eventually trigger the brake if the real train behaviour exceeds the expected limitary one). Such an enforced degraded state **can reduce the safety the ETCS can bring indirectly.**
- On the contrary, if the train is **expected** to be able to reach a **standstill earlier** than in reality (e.g. the current braking of the train has been overestimated), this results in **less restrictive behaviour of the ETCS on-board**, so that it **may intervene** (i.e. trigger the brake) **too late**, and thus **can reduce the safety the ETCS can bring directly.**

Bremmung des Zuges ignoriert wird), führt dies zu einem **restriktiveren Verhalten des ETCS-Fahrzeuggerätes** (frühere Eingriffe/Indikationen) und am Ende ggf. auch zum Wechsel des ETCS-Fahrzeuggerätes **in eine Rückfallebene**, in der **weniger Überwachungsfunktionen verfügbar sind** (z. B. in der Betriebsart „Staff Responsible“ [ETCS-Befehlsfahrt] oder in die Überwachung von „Release Speed“ anstelle der Überwachung der Grenzen von „Target Speed Monitoring“ [Zielgeschwindigkeitsüberwachung], die überwacht, dass die Zuggeschwindigkeit bei der Annäherung an ein Ziel angemessen sinkt und am Ende die Bremse auslösen kann, wenn das tatsächliche Zugverhalten die erwartete Grenze überschreitet). Eine solche erzwungene Rückfallebene **kann die Sicherheit verringern**, die das ETCS **indirekt** bieten kann.

- Andererseits, wenn **erwartet** wird, dass der Zug früher **den Stillstand erreicht**, als das in der Realität der Fall ist (z. B. wenn die aktuelle Bremsung des Zuges überschätzt wird), führt dies zu einem **weniger restriktiven Verhalten des ETCS-Fahrzeuggerätes**, sodass der Bremseneingriff **zu spät** kommt und somit die **Sicherheit verringern kann**, die das ETCS **direkt** bieten kann.

Um die Situation zu verbessern, befürworten wir, die **gemessene Verzögerung des Zuges** (oder ggf. nur einen Teil davon) **in den Berechnungen der ETCS-Bremskurven zu berücksichtigen**, da dies der Sicherheit hilft, indem die indirekten Auswirkungen der ETCS-Überwachung beseitigt werden (z. B. durch Reduzieren des Erfordernisses für die Verwendung der „Release Speed“ [Freigabegeschwindigkeit]) und Erhöhen der Leistung des Eisenbahnbetriebs durch Verschieben aller ETCS-Überwachungsgrenzen weiter vor dem Zug, näher an das überwachte Ziel (siehe z. B. Bild 3). Diese Verlagerung bringt auch den obengenannten Kapazitätsgewinn für die Eisenbahninfrastruktur mit sich.

Wird die in diesem Beitrag zum Ausdruck gebrachte **Meinung** innerhalb des EU-Eisenbahnsektors **geteilt**, sollte **baldmöglichst ein offizieller Änderungsantrag gestellt werden**, um die Diskussion zu diesem Thema mit den jeweiligen Stakeholdern zu beginnen, mit dem Ziel, diese Änderung (welche es ermöglichen würde, auch die aktuelle Verzögerung für bereits bremsende Züge zu berücksichtigen) im Rahmen des ERTMS Braking Curves Game Changer in der nächsten Ausgabe der TSI ZZS (die im Jahr 2022 erwartet wird) implementieren zu können.

Die Autoren danken Roman Treydel, Deutsche Bahn AG, für die freundliche Unterstützung bei der Endkorrektur der deutschen Version des Beitrags. ■

In order to improve the situation, we are in favour of **considering the measured deceleration of the train** (or possibly only part of it) **in the ETCS braking curves calculations**, as it **helps** (increases) the safety by removing the indirect impact of the ETCS supervision (e. g. by reducing the need to use the Release Speed) as well as it helps the performance of railway operations by shifting all the ETCS supervision limits to be further ahead of the train and closer to the supervised target (see for example fig. 3). This shift also brings the aforementioned capacity gain for the railway infrastructure.

If the opinion expressed in the present article **is shared** within the EU Railway sector, then **an official Change Request should be raised** as soon as possible in order to start discussions on this topic with the respective stakeholders with the aim of implementing this change (which will enable the consideration of the current deceleration for trains which are already braking) implemented in the frame of the ERTMS Braking Curves Game Changer in the next issue of the CCS TSI, which is expected in 2022.

The authors would like to thank Roman Treydel, Deutsche Bahn AG, for his kind help with the final review of the German text of this article. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] ERA – UNISIG – EEIG ERTMS USERS GROUP. ERTMS/ETCS – System Requirements Specification. SUBSET-026, Issue 3.6.0 (Baseline 3 Release 2). Brussels: European Commission (EC), 2016. 701 p.
- [2] ERA. ERTMS/ETCS – ETCS Driver Machine Interface. ERA_ERTMS_015560, Issue 3.6.0 (Baseline 3 Release 2). Brussels: European Commission (EC), 2016. 263 p.
- [3] Hougardy, A.: (ERA – ERTMS Unit). Introduction to ETCS Braking Curves. Version 1.4. Valenciennes: European Union Agency for Railways (ERA), 2016. 28 p.

AUTOREN | AUTHORS

Dipl.-Ing. Jakub Marek, Ph.D., MIRSE

ERTMS/ETCS Engineer

AŽD Praha s.r.o.

Anschrift / Address: Žitovnická 3146/2, Záběhlice, CZ-106 00 Praha 10

E-Mail: marek.jakub@azd.cz

Dr.-Ing. Ivo Myslivec

ATO Engineer

AŽD Praha s.r.o.

Anschrift / Address: Žitovnická 3146/2, Záběhlice, CZ-106 00 Praha 10

E-Mail: myslivec.ivo@azd.cz

Dipl.-Ing. Bohumil Drápal

Head of Brake Systems Department

VUZ, Institut für Eisenbahnforschungen AG

Anschrift / Address: Novodvorská 1698, Braník, CZ-142 01 Praha 4

E-Mail: drapalb@cdvuz.cz