

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vliv nových systémů zabezpečení jízdy vlaku na kapacitu železniční
infrastruktury

HABILITAČNÍ PRÁCE

Ing. Petr Nachtigall, Ph.D.

Obor

Technologie a management v dopravě a telekomunikacích

Název práce

Vliv nových systémů zabezpečení jízdy vlaku na kapacitu železniční infrastruktury

Prohlašuji:

Práci s názvem **Vliv nových systémů zabezpečení jízdy vlaku na kapacitu železniční infrastruktury** jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 7. 10. 2022

Ing. Petr Nachtigall, Ph.D. v. r.

Poděkování:

Není možné na jednom místě poděkovat všem, kteří hráli při sepsání této práce důležitou roli. Nelze však opomenout mou neblížší rodinu, bez jejichž pochopení a podpory by tato práce nemohla vzniknout. Dále bych rád zmínil kolektiv pracovníků katedry Technologie a řízení dopravy, kteří mi poskytli cenné rady při závěrečné fázi práce. Nemalá byla také pomoc a konzultace od zástupců z praxe. Zejména pak ze společnosti METRANS Rail, která mi poskytla potřebná data i software pro jejich vyhodnocení, ze Správy železnic, s.o. a také ze společnosti AŽD Praha, s.r.o. Speciální poděkování pak patří Janu Ouředníčkovi, který mi poskytl mnoho zpětných vazeb, které zpřesnily řadu mých tvrzení uvedených v práci.

Vám všem, ale i ostatním, ze srdce děkuji.

Anotace

Habilitační práce se zabývá vlivem zavedení nových způsobů zabezpečení jízdy vlaku (ETCS) na kapacitu tratí. V první části práce je prostor věnován technické části nových zabezpečovacích systémů. Jsou zde představeny principy fungování CBTC a ETCS. Zvláštní důraz je kladen na brzdění vlaku a dohledu nad jeho brzděním. V další části se pak autor zaměřil na efekty, které přinese zavedení ETCS L2 do ČR. Negativní vlivy jsou podpořeny možnými způsoby jejich odstranění. Jedna z částí práce se věnuje také přípravě nových staveb ve vazbě na ETCS, jejichž nedílnou součástí je také využití simulačních nástrojů.

Klíčová slova

brzdná křivka; ETCS; kapacita; simulace; železniční doprava

Title

Impact of new train protection systems on railway infrastructure capacity

Annotation

The habilitation thesis deals with the influence of the introduction of new train protection systems (ETCS) on the capacity of lines. The first part of the thesis is devoted to the technical part of the new signalling systems. The principles of operation of CBTC and ETCS are presented. Special emphasis is placed on train braking and braking supervision. In the next part, the author focuses on the effects of the introduction of ETCS L2 in the Czech Republic. The negative effects are supported by possible ways of eliminating them. One of the parts of the work is also devoted to the preparation of new constructions in connection with ETCS. An integral part of the preparation of new railway lines is also the use of simulation tools.

Key words

Braking curve; ETCS; capacity; simulation; railway transport

OBSAH

Resumé	8
Resume	9
Seznam zkratk	10
Úvod	13
Cíl habilitační práce	15
1 Nové možnosti zabezpečení jízdy vlaku	16
1.1 Základní principy systému CBTC	18
1.2 Normy pro systém CBTC	23
1.3 Technická základna komunikace v prostředí CBTC	26
2 Evropský vlakový zabezpečovací systém	27
2.1 Nastavení brzdných křivek ETCS	36
2.1.1 Historický kontext vlakových zabezpečovačů	36
2.1.2 Dohledové limity ETCS	37
2.1.3 Dohled ETCS nad snížením rychlosti	41
2.1.4 Datová struktura informací pro dohled nad snížením rychlosti	43
2.1.5 Dílčí závěr	47
2.2 Možnosti úpravy brzdné křivky	48
2.3 Výpočet brzdné křivky	50
2.4 Další prostředky zvýšení bezpečnosti.....	56
3 Propustnost a kapacita tratí ve vztahu k ETCS	57
3.1 Pozitivní efekty zavedení ETCS.....	59
3.2 Negativní efekty zavedení ETCS	64
3.3 Náběh brzdného účinku	77
3.4 Průběh brzdného účinku	81
3.5 Změna Subsetů	84
3.6 Dílčí závěr.....	86
4 Příprava nových staveb a využití simulace	88
4.1 Vliv ETCS na nové stavby	88
4.2 Využití simulace	89
4.3 Dílčí závěr.....	95

Vlastní přínos	96
Závěr.....	98
Citovaná literatura	99
Vlastní zdroje k tématu habilitační práce	107
Seznam obrázků	110
Seznam tabulek	112
Seznam příloh.....	113

RESUMÉ

Habilitační práce se zaměřuje na oblast, která je průnikem technologie a řízení dopravy a zabezpečovací techniky. Obsahem je především vazba nových systémů zabezpečení jízdy vlaku (CBTC, resp. ETCS) na kapacitu infrastruktury.

Cílem habilitační práce je definovat a kvantifikovat efekty, které přinese zavedení ETCS v oblasti kapacity tratí. V úvodu habilitační práce je provedena deskripce jejího cíle. K naplnění vytyčeného cíle bylo nezbytné rozdělit tuto práci do několika částí, konkrétně pak do čtyř hlavních kapitol. První dvě kapitoly jsou zaměřeny na technické části, tedy nové způsoby zabezpečení jízdy vlaku z hlediska principu nastavení požadavků a parametrů jednotlivých systémů. Je zde představen systém CBTC, který se uplatňuje zejména v uzavřených systémech městské kolejové dopravy. V oblasti železniční dopravy je pak dominantním systémem ETCS. Jsou zde analyzovány především části technických specifikací, týkající se brzdění vlaku a dohledem nad tímto brzděním. Podrobně je zkoumána brzdná křivka a nastavení dohledových limitů.

Třetí kapitola se soustředí na efekty, které zavedení ETCS L2 v České republice přinese v oblasti kapacity tratí. Jsou zde analyzovány efekty pozitivní a negativní. U negativních efektů jsou zároveň představeny možné nástroje pro jejich eliminaci. Zcela samostatná podkapitola se pak věnuje kontrastu přesného matematického popisu dohledových křivek a nejistoty v oblasti průběhu brzdění a brzdného účinku.

Ve čtvrté kapitole této práce je pak sledován budoucí vývoj a efekt zavedení ETCS z pohledu přípravy nových staveb, u kterých je možné již předem eliminovat negativní efekty a dimenzovat nové stavby na míru výhledovému provozu či provoznímu konceptu. Nedílnou součástí tohoto procesu je také využití simulačních nástrojů jako efektivního prostředku pro ověření provozních i stavebních parametrů připravované infrastruktury.

Přínos této habilitační práce lze spatřovat především v komplexním pojetí celé problematiky s akcentem na provozní stránku zavedení systému ETCS v České republice. Z pohledu vědeckého přínosu jsou pak stěžejní zjištění o budoucích efektech zavedení ETCS na kapacitu jednotlivých tratí. U zavedení ETCS L2 se dá hovořit o navýšení kapacity oproti současnému stavu o 15 až 25 %. Dalším zkoumáním v oblasti zavedení ETCS L3 bylo zjištěno, že oproti ETCS L2 dojde ke zvýšení kapacity o 4 až 6 %.

RESUME

The habilitation thesis focuses on an area that is the intersection of technology and control of transport and signalling systems. The content is mainly related to the link between new train protection systems (CBTC or ETCS) and infrastructure capacity.

The aim of the habilitation thesis is to define and quantify the effects that the introduction of ETCS will bring to track capacity. In the introduction of the habilitation thesis, a description of its objective is made. To fulfil the stated objective, it was necessary to divide the thesis into several parts, namely four main chapters. The first and second chapters are focused on the technical parts, i.e., new systems of train protection from the point of view of the principle and the requirements and parameters of the individual systems. The CBTC system which is mainly applied in closed urban rail transport systems is introduced. Further attention is paid to the ETCS system which is dominant in the field of rail transport. In particular, the parts of the technical specifications relating to train braking and the monitoring of this braking are analysed. The braking curve and the setting of supervision limits are examined in detail.

The third chapter focuses on the effects that the introduction of ETCS L2 in the Czech Republic will bring to line capacity. Positive and negative effects are analysed. Possible tools for the elimination of the negative effects are also presented. A separate subchapter is devoted to the contrast between the precise mathematical description of the monitoring curves and the uncertainty in the braking process and braking effect.

The fourth chapter of this thesis then examines the future development and effect of the introduction of ETCS from the perspective of the preparation of new infrastructure projects. Negative effects can be eliminated in advance and new projects can be sized to the future traffic or operational concept. An integral part of this process is also the use of simulation tools to effectively verify the operational and construction parameters of the infrastructure being prepared.

The contribution of this habilitation thesis can be seen mainly in the comprehensive approach to the whole issue with an emphasis on the operational aspect of the ETCS system implementation in the Czech Republic. From the point of view of the scientific contribution, the key findings are about the future effects of ETCS implementation on the capacity of individual lines. In the case of the introduction of ETCS L2, an increase in capacity of 15 to 25 % can be discussed. Further investigation into the introduction of ETCS L3 revealed that compared to ETCS L2 there will be an increase in capacity of 4 to 6 %.

SEZNAM ZKRATEK

ATD	Automatic Train Driving	automatické řízení vlaku
ATO	Automatic Train Operation	automatický provoz vlaku
ATP	Automatic Train Protection	automatické zabezpečení vlaku
ATS	Automatic Train Supervision	automatický dohled nad vlakem
BG	Balise Group	balízová skupina
BTM	Balise Transmission Module	
CBTC	Communication-based Train Control	zabezpečení jízdy vlaků založené na komunikaci
CDP		Centrální dispečerské pracoviště
CRs	Change requests	požadavek na změnu
ČR	Czech Republic	Česká republika
DP	Danger Point	místo ohrožení
DSP	Dynamic speed profile	dynamický rychlostní profil
EBD	Emergency brake deceleration	křivka nouzového brzdění
EBI	Emergency Brake Intervention	zásah do nouzové brzdy
EEIG ERTMS	European Economic Interest Group ERTMS	
EoA	End of Authority	konec oprávnění k jízdě
EOR	European Operation Rules	Evropské provozní předpisy
ERA	European Railway Agency	Evropská železniční agentura
ERTMS	European Rail Traffic Management System (ETCS + GSM-R)	
ETCS	European Train Control System	Evropský vlakový zabezpečovací systém
ETML	European Traffic Management System	Evropský standard provozního řízení
EU	European Union	Evropská Unie
GoA	Grade of Automation	stupeň automatizace
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway	
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
Indusi	Induktive Zugsicherung	

LEU	Lineside Electronics Unit	
LMA	Limit of Movement Authority	hranice oprávnění k jízdě
LoS	Level of Service	úroveň služby
LRBG	Last Relevant Balise Group	poslední relevantní balizová
skupina		
MRSP	Most Restrictive Speed Profile	nejvíce omezující rychlostní
profil		
NGTC	Next Generation Train Control	
NV	National Values	národní hodnoty
OCC	Operations Control Centres	Centrum řízení provozu
OL	Overlap distance	prokluzová vzdálenost
OTI	Onboard Train Integrity	integrita vlaku
P	Permitted speed	dovolená rychlost
PZ	level crossing interlocking	přejezdové zabezpečení
RBC	Radio Block Centre	rádiobloková centrála
RIU	Radio In-fill Unit	jednotka rádiového vykrytí
SBD	Service brake deceleration	křivka provozního brzdění
SBI	Service Brake Intervention	zásah do provozní brzdění
SH	Shunting	posun
SHP	Samoczynne hamowanie pociągu	Automatic Train Braking
System		
SR	Staff Responsible	odpovědnost obsluhy vlaku
SSP	Static Speed Profile	statický rychlostní profil
SvL	Supervision Limit	hranice dohledu
SZZ	Station interlocking system	staniční zabezpečovací
zařízení		
TMS	Traffic Management System	System pro řízení dopravy
TPI	Train Positioning Inaccuracies	nepřesnost určení polohy
vlaku		
TPWS	Train Protection and Warning System	
TSI CCS	Technical Specifications for Interoperability – Control Command and	
Signaling		
TZZ	track interlocking system	traťové zabezpečovací
zařízení		

UGTMS	Urban Guided Transport Management System	
UNISIG	Union Industry of Signalling	
UTO	Unattended Train Operation	bezobslužný provoz vlaku
VCO	train path with a restriction	vlaková cesta s omezením
VNPN		výstraha při nedovoleném
projetí návěsti		
VRT	high speed line	vysokorychlostní trať
W	Warning	výstraha
ZUB	Zugbeeinflussung	vlakový zabezpečovač
(Německo)		

ÚVOD

Rozvoj dopravních systémů ovlivňuje technický pokrok i požadavky moderní společnosti. Pokud moderní železnice nemá ztratit svou pozici na přepravním trhu v osobní i nákladní dopravě, musí nezbytně nutně držet krok v oblasti zvyšování kvality služeb, spolehlivosti, bezpečnosti, dostupnosti či ekonomické výhodnosti (1). V posledních dvaceti letech se termíny jako interoperabilita, liberalizace či udržitelná mobilita stala realitou vědeckých projektů, technických řešení v železničním průmyslu, ale i na akademické půdě. Nové přístupy v oblasti železničního průmyslu od požadavků na vozidla přes zabezpečovací systémy až po informační systémy ovlivňují mimo jiné také práci dopravních technologů, jejichž úkolem je efektivně využívat poskytnuté zdroje v oblasti dopravní techniky, dopravní cesty a lidského kapitálu.

Habilitační práce poskytuje ucelený přehled o současném stavu vědeckého poznání v oblasti implementace nových způsobů zabezpečení jízdy vlaku a jeho provozních dopadech. Zvláštní pozornost je věnována zavádění Evropského vlakového zabezpečovacího zařízení¹ (dále jen ETCS) do podmínek české konvenční železniční infrastruktury. Toto zařízení má vliv na technologii a řízení železniční dopravy. Proto je cílem jedné z kapitol habilitační práce identifikace pozitivních a negativních efektů zavedení ETCS v ČR. U negativních efektů je pomocí porovnání provozních situací před a po zavedení ETCS kvantifikováno jejich působení a jsou předloženy návrhy způsobu jejich možné eliminace nebo zmírnění. Ke kvantifikaci pozitivních efektů zavádění ETCS v ČR je využito simulace a zkušeností ze zavádění ETCS v jiných zemích.

Novinky v této oblasti mají vliv na řadu oblastí technologie a řízení železniční dopravy. Jedná se zejména o nové způsoby řízení a organizování železniční dopravy, propustnost železničních tratí, způsoby jejich zabezpečení, předávání informací mezi subjekty v železniční dopravě i mimo ni, a mnoho dalších. Všechny tyto inovace nebo trendy mají přímý či nepřímý vliv na kapacitu železniční infrastruktury, a to jak pozitivní, tak negativní.

Práce se také věnuje novým projektům výstavby železniční infrastruktury v ČR zejména pak vysokorychlostním tratím (dále jen VRT), u kterých lze vycházet z některých negativních zkušeností z konvenčních tratí a připravovat projekty již s výhledem k výhradnímu provozu ETCS. Nedílnou součástí těchto projektů je použití metod založených na simulaci. Pomocí ní

¹ ETCS – European Train Control System

je možné analyzovat různé varianty řešení dopravní infrastruktury nebo správně stanovit požadavky na budoucí vozidla, která budou tuto novou infrastrukturu užívat.

Habilitační práce vychází z výzkumných aktivit autora v oblasti zavádění systému ETCS do podmínek ČR a jeho vlivu na výkonnost železniční infrastruktury. Představuje základní podmínky funkčnosti tohoto systému a na dílčích výzkumných pracích z praxe dokládá, jaké bude nebo může mít zavedení tohoto systému důsledky pro kapacitu tratí. Zároveň představuje možná řešení negativních efektů.

CÍL HABILITAČNÍ PRÁCE

Cílem habilitační práce je **identifikace pozitivních a negativních efektů** zavedení systému ETCS v podmínkách ČR a **návrh úprav** v oblasti implementace systému ETCS, které budou **minimalizovat negativní efekty** z jeho zavedení. Systém ETCS je sice evropský interoperabilní zabezpečovací systém, nicméně jeho implementace do národních prostředí jednotlivých států vyžaduje velkou pozornost. Národním cílem číslo 1 v souvislosti se zavedením ETCS je zvýšení bezpečnosti. Tento aspekt předčil například i aspekt interoperability. Nastavení systému je však potřeba věnovat dostatečnou pozornost, aby jeho zavedení nemělo negativní vliv na výkonnost, atraktivitu, a především konkurenceschopnost celého železničního systému.

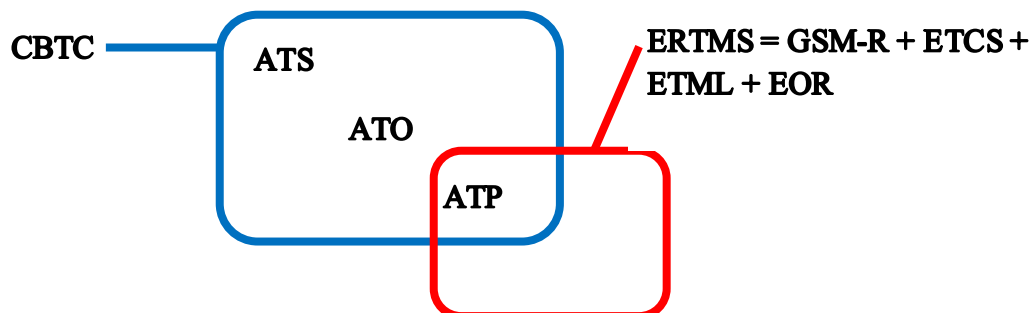
Při řešení autor vychází z vlastních výzkumů² v této oblasti a také ze současného stavu poznání v oblasti implementace systému ETCS. Na základě identifikace pozitivních a negativních efektů zavedení ETCS jsou tyto podrobeny kritické analýze a jsou navrženy možné úpravy. Chování budoucího systému je komparováno také s datovými záznamy z jízd reálných vlaků pro ověření potřebnosti řešení této problematiky. Kromě této komparace je provoz vlaků pod dohledem ETCS také simulován v software OpenTrack. Bylo zjištěno, jaké pozitivní efekty přinese zavedení ETCS L2 s optimalizací konvenčního zabezpečovacího zařízení³. U negativních efektů byla provedena hloubková analýza a dekompozice za účelem zjištění jejich dopadů do výkonnosti železniční infrastruktury. Také zde je navrženo možné řešení daného problému.

² Společně s Ing. Ouředníčkem, Ph.D. v oblasti dohledových limitů brzdných křivek ETCS, s Ing. Tischerem v oblasti simulace v software OpenTrack a s dalšími spoluautory, uvedenými v seznamu vlastních zdrojů k tématu habilitační práce.

³ Tento pojem označuje zavádění ETCS na současných tratích rozdělených oddílovými návěstidly, která jsou doplněna o další oddíly, které jsou ohraničeny lokační značkou. Výsledkem je trať, která je rozdělena na více kratších oddílů, než je tomu v současnosti, což má, při určité kombinaci prvního a druhého vlaku, pozitivní efekt na následné mezidobí.

1 NOVÉ MOŽNOSTI ZABEZPEČENÍ JÍZDY VLAKU

Svět provází v posledních dvaceti letech dynamický rozvoj v oblasti techniky a na tento stav musela pochopitelně reagovat také železniční doprava. Na úrovni EU byl například řešen projekt NGTC⁴, který zkoumal možnosti propojení a využití dvou systémů a to Communication-based train control (dále jen CBTC⁵) a European Rail Traffic Management System (dále jen ERTMS⁶). Tento projekt ukázal, jak je možné využít synergií obou systémů k dosažení vyšší kvality a spolehlivosti železniční dopravy (2). Na obrázku 1 jsou zachyceny vazby mezi jednotlivými systémy, které lze zařadit do CBTC systémů. Jedná se především o systém automatického dohlížení provozu (ATS⁷), systém automatického vedení vlaku (ATO⁸) a systém vlakového zabezpečovacího zařízení s kontrolou rychlosti a místa zastavení (ATP⁹). Nově se spojení ATO a ATP systému označuje jako automatic train driving (ATD¹⁰) (Zatímco CBTC v sobě dokáže integrovat prvky všech tří systémů, tak ETCS je v současné době definováno pouze jako ATP. Autor se ve své práci zaměřuje na ETCS, nicméně při své analýze bral v potaz fakt, že schopnosti systémů CBTC mohou být inspirací pro úpravu současných a tvorbu nových specifikací systému ETCS.



Obrázek 1 Obecné schéma působnosti systémů CBTC a ETCS

Zdroj: autor

Kromě zabezpečovacích zařízení na dráze železniční se po roce 2000 začalo velmi významně rozvíjet zabezpečovací zařízení na drahách speciálních, nejčastěji pak v metru. Pomohl k tomu pokrok v oblasti informačních a komunikačních (přenosových) technologií a také to, že je zde mnohem jednodušší zajistit podmínky pro automatický provoz (homogenní soupravy, rovnoběžný grafikon, stabilní adhezní podmínky či minimální vliv okolní dopravní i klimatické situace). Nejčastěji používaným standardem pro automatický provoz metra je

⁴ NGTC – Next Generation Train Control

⁵ CBTC – Communication-based Train Control

⁶ ERTMS – European Rail Traffic Management System (ETCS + GSM-R)

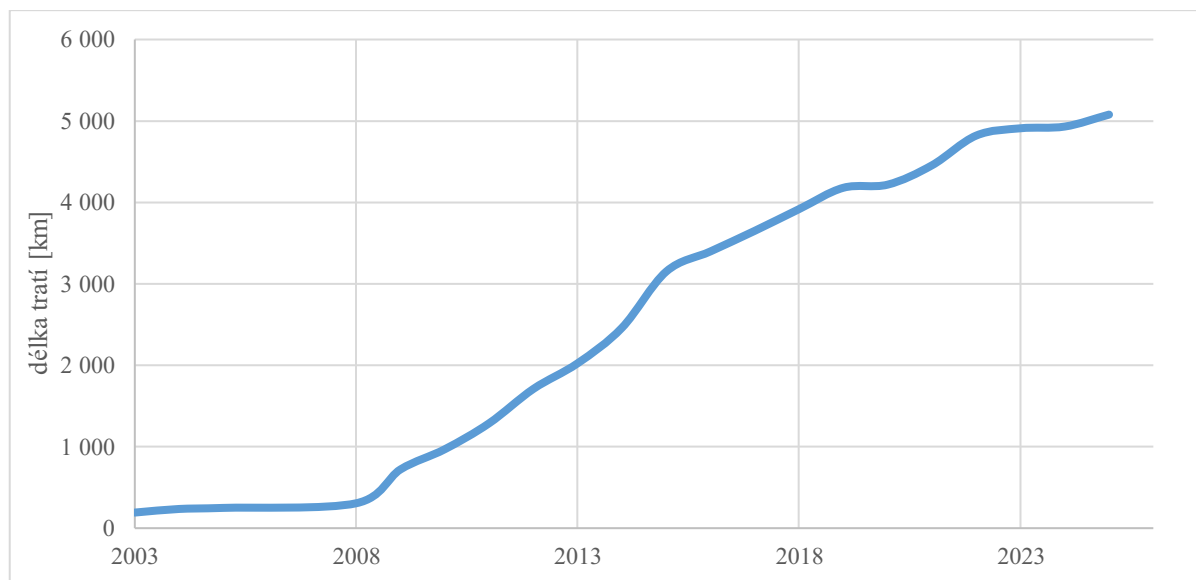
⁷ ATS – Automatic Train Supervision

⁸ ATO – Automatic Train Operation

⁹ ATP – Automatic Train Protection

¹⁰ ATD – Automatic Train Driving

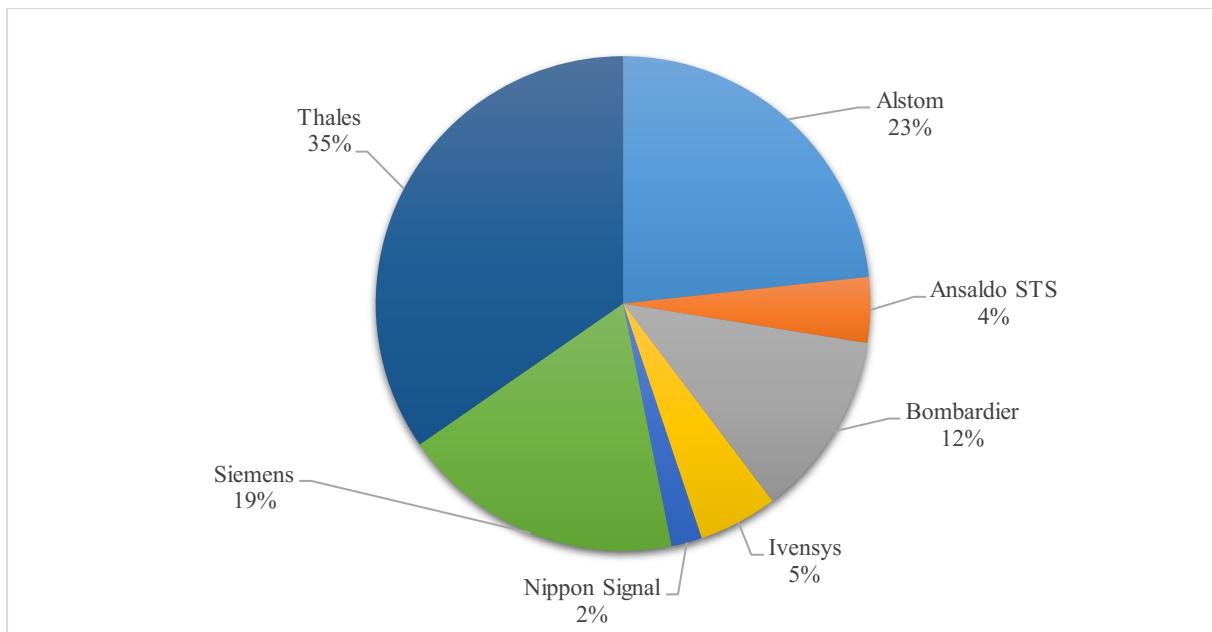
CBTC. Technický vývoj tohoto způsobu zabezpečení je spojen s počátkem 80. let 20. století, kdy společnost Thales představila svůj SkyTrain v kanadském Vancouveru. Zásadní rozmach však nastal až po roce 2000, přičemž více než dvě třetiny všech automatických provozů metra na světě jsou dnes zabezpečeny právě pomocí tohoto standardu a celková délka tratí již přesáhla 5 000 km. Postupný rozvoj využití CBTC je na obrázku 2.



Obrázek 2 Kumulativní délka tratí se CBTC

Zdroj: (3) s úpravou autora

Více než 85 % tratí metra, které byly zprovozněny po roce 2010, je vybaveno právě systémy na bázi CBTC (4), proto se i při projektování trasy D pražského metra také počítá s využitím této technologie (5). Největším dodavatelem CBTC je firma Thales (cca 1 720 km), kterou následuje firma Alstom (1 155 km) a firma Siemens (918 km) (6), (7), (8), (9). Čísla se však mohou v různých informačních zdrojích lišit, z důvodu uvádění délek úseků, které již byly zprovozněny vs. délek nasmlouvaných úseků. Některé systémy byly také dodávány v konsorciu více dodavatelů jako například pro New York (Siemens + Thales) nebo pro Paříž (Ansaldo STS + Siemens). Podíl jednotlivých výrobců CBTC podle délky linek, pro které bylo ZZ dodáno je znázorněn v grafu na obrázku 3. Tomuto tématu se věnuje také řada vědeckých publikací. Souhrnný pohled nabízí např. Carvajal (10), Ferrari (6) nebo Tischer (3).



Obrázek 3 Podíl výrobců CBTC podle délky linek

Zdroj: (3) s úpravou autora

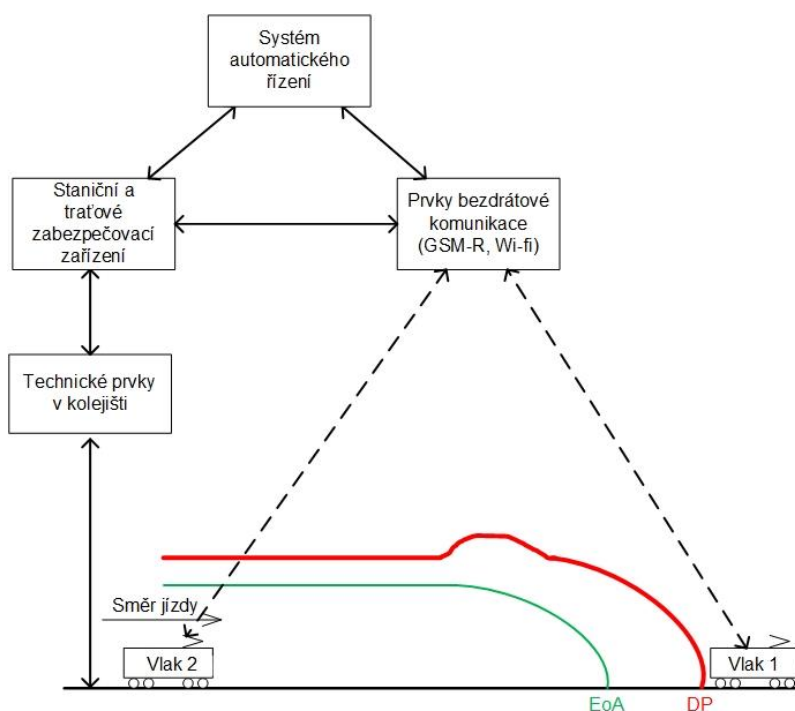
Vývoj systému CBTC byl směřován tak, aby při zachování maximální bezpečnosti zvýšil celkovou kapacitu systému, a tím i počet přepravených cestujících. Systém CBTC byl vyvinut zejména pro městskou železniční kolejovou dopravu. Z pohledu kapacity souprav má dnes již téměř 50 % provozů toho systému kapacitu soupravy větší než 700 osob (4), (11). Pro srovnání v případě pražského metra se uvažuje o střední velikosti soupravy pro cca 530 osob.

Z dosavadních poznatků o nasazení tohoto systému je patrné, že převládají segregované tratě s provozem souprav se stejnými nebo velmi podobnými parametry a pro tratě s minimálními odchylkami povětrnostních a klimatických podmínek. Proti pádu do kolejiště se využívají nástupištní bariéry, které zvyšují bezpečnost při příjezdu či průjezdu vlaku a snižují riziko, že někdo neoprávněně vnikne do tunelů metra. Na druhou stranu vyžadují např. unifikovanou vzdálenost dveří soupravy, což může působit potíže při vypisování veřejných zakázek. Jedna z podstatných výhod těchto segregovaných systémů je jejich nezávislost na vnějším prostředí. Jedná se zejména o stupeň dopravy na povrchu a také o stabilní adhezní podmínky. Ten umožňuje řídicím systémům ATO mnohem lépe ovládat a kontrolovat jízdu vozidla. Právě vliv vnějšího okolí na součinitel adheze tvoří z pohledu vlivu na kapacitu dráhy největší komplikaci při zavádění ATP systémů v podmínkách dráhy železniční. Zkušenosti z provozu ATP systémů na drahách speciálních však mohou pomoci při implementaci ATP systémů v podmínkách ČR.

1.1 Základní principy systému CBTC

Pojem CBTC je definován ve standardu IEEE 1474.1-2004 jako systém se schopností velmi přesného určení polohy vozidla, který není závislý na kolejových obvodech, a který je

schopen daný drážní systém nejen zabezpečit, ale také řídit. Jeho další součásti pak byly definovány v rámci projektu UGTMS. Tím bylo dosaženo určité standardizace požadavků a funkcí tohoto systému, což umožnilo propojovat různé části systému od různých výrobců. Zároveň je charakteristickým rysem CBTC z hlediska bezpečného řízení dopravy skutečnost, že se zde uvažuje provoz souprav v pohyblivých blocích (moving block). Konzervativní zabezpečovací systémy používají pro řízení dopravy návěstní systém s hlavními nebo seřadovacími návěstidly a pro detekci polohy vlaku zejména kolejové obvody nebo počítače náprav (3). Není tedy možné provozovat soupravy v pohyblivých prostorových oddílech, ale pouze v pevných prostorových oddílech vymezených návěstidly nebo kolejovými úseky obecně. Technologie CBTC umožňuje realizovat provoz souprav v pohyblivých prostorových oddílech s relativně nejkratšími následnými mezidobími díky vysoce dostupné, tj. spolehlivé a rychlé komunikaci mezi mobilní a traťovou částí systému, viz obrázek 4. Tímto způsobem je minimalizován časový interval mezi soupravami (headway) a kapacitu celého systému je možné měnit také pomocí rychlosti souprav. Při snížení rychlosti soupravy je systém schopen zkrátit bezpečný rozestup mezi vlaky a tím zvýšit počet vlaků, které mohou být v jednom okamžiku v systému. Negativním dopadem je pak prodloužení cestovního času.



Obrázek 4 Schéma komunikace souprav se zabezpečovacím zařízením v systému ATS

Zdroj: autor na podkladě (10)

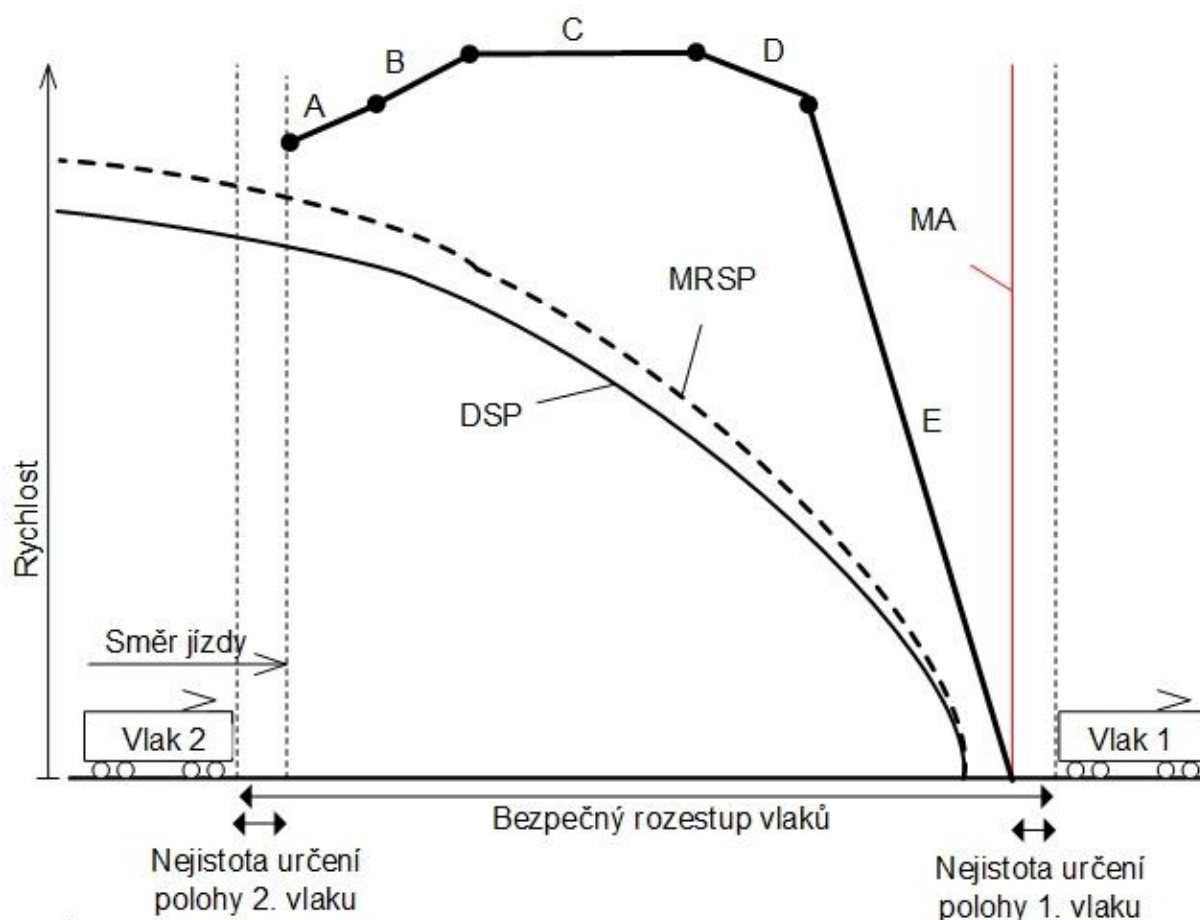
Zavedení pohyblivého bloku však vyžaduje splnění celé řady technických podmínek a standardů (12). V případě pohyblivého bloku musí souprava automaticky vyhodnocovat svou

polohu vůči DP¹¹, ze které pak odvozuje cílové místo zastavení, které je před DP předsazeno o pojistnou vzdálenost a je označeno jako EoA¹². Zároveň musí brát na zřetel nepřesnost určení polohy obou souprav¹³. Rozdíl oproti pevným oddílům je v tom, že tento bod se může nacházet kdekoliv na trati, a nikoliv pouze u hranic jednotlivých oddílů. Palubní část CBTC určuje polohu vlaku s vysokou přesností a rychlostní profil pro následující úsek je vozidlu odeslán z řídicího střediska v reálném čase, což snižuje velikost rozdílu mezi reálným stavem v okamžiku odeslání informace o prvním vlaku a stavem, ve kterém se nachází první vlak ve chvíli, kdy tuto informaci obdrží druhý vlak. Vyšší rychlost přenosu informace tak snižuje požadavky na pojistné časy a vzdálenosti. Tato vlastnost nijak negarantuje vyšší bezpečnost systému, ale je vhodným nástrojem pro zvýšení jeho kapacity. Kontinuální dohled nad polohou a parametry souprav umožňuje CBTC provoz v pohyblivých prostorových oddílech, čímž se snižuje vzdálenost mezi následnými vlaky na trati na minimum při zajištění bezpečnosti následných jízd. Vzdálenost mezi vlaky je závislá na nejistotě určení obou vlaků, rychlosti vozidel, na jejich brzdných vlastnostech, rychlosti přenosu informací a pojistné vzdálenosti, kterou pokrývá provedení bezpečnostně-kritických funkcí (6), (10). Obecné schéma pro určování vzdálenosti mezi následnými vlaky je uvedeno na obrázku 5.

¹¹ DP – Danger Point

¹² EoA – End of Authority

¹³ Zejména polohy maximálního a minimálního čela a konce vlaku



A	Doba reakce systému ATP při překročení rychlosti	D	Doba náběhu nouzové brzdy
B	Reakční doba vlakového zabezpečovače	E	Průběh nouzového brzdění
C	Doba aktivace nouzové brzdy		

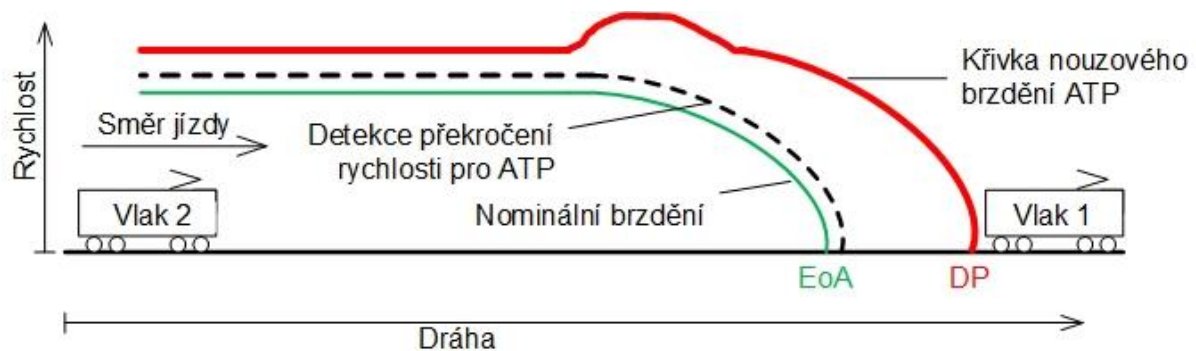
Obrázek 5 Schéma určení bezpečného rozestupu vlaků

Zdroj: autor na podkladě (3), (13)

Při pohledu na obrázek 5 je patrné, že značnou část bezpečného rozestupu vlaků zabírá délka úseček A až C. Jedná se o prostor mezi zjištěním překročení rychlosti a náběhem účinku nouzové brzdy. Tato skutečnost je dána především bezpečnostně relevantním přístupem k těmto systémům. Z pohledu bezpečnosti je třeba uvažovat to, že v této oblasti může strojvedoucí libovolně disponovat s výkonem vozidla a zvyšovat tak rychlost. U systémů bez strojvedoucího je pak uvažováno o chybě systému řízení, která zvyšuje rychlost, než zasáhne brzdící soustava. Aby byl systém pohyblivého bloku skutečně bezpečný, musí mít kontrolní systém CBTC přesnou a spojitou¹⁴ informaci o poloze a rychlosti vlaku. Z těchto údajů vypočte traťová část zabezpečovacího zařízení oprávnění k jízdě tak, aby byl vždy zajištěn bezpečný

¹⁴ Při ztrátě komunikace se aktivuje mód řízení, který zachovává bezpečnost celého systému, nicméně může mít jiné (zpravidla horší) ukazatele jako je rychlost či velikost následného mezidobí

rozestup mezi soupravami. Tato vlastnost však současně zvyšuje nároky na pojistné dráhy a rezervní časy¹⁵ a tím snižuje výkonnost celého systému. Na obrázku 6 je mezi zelenou a červenou křivku z obrázku 4 vložena ještě šedá, která symbolizuje kontrolu nad překročením maximální dovolené rychlosti. Tento princip je využíván při výpočtu brzdných křivek u ETCS¹⁶ pro zajištění bezpečného zastavení vlaku v případě překročení brzdné křivky (14), (15). Zkušenosti z užívání standardu CBTC budou v dalších částech habilitační práce využity při identifikaci efektů vlakového zabezpečovače s úplnou kontrolou rychlosti, tedy ETCS. Jádrem habilitační práce se tak bude zabývat efekty implementace ETCS v ČR.



Obrázek 6 Kontrola maximální rychlosti

Zdroj: autor na podkladě (10)

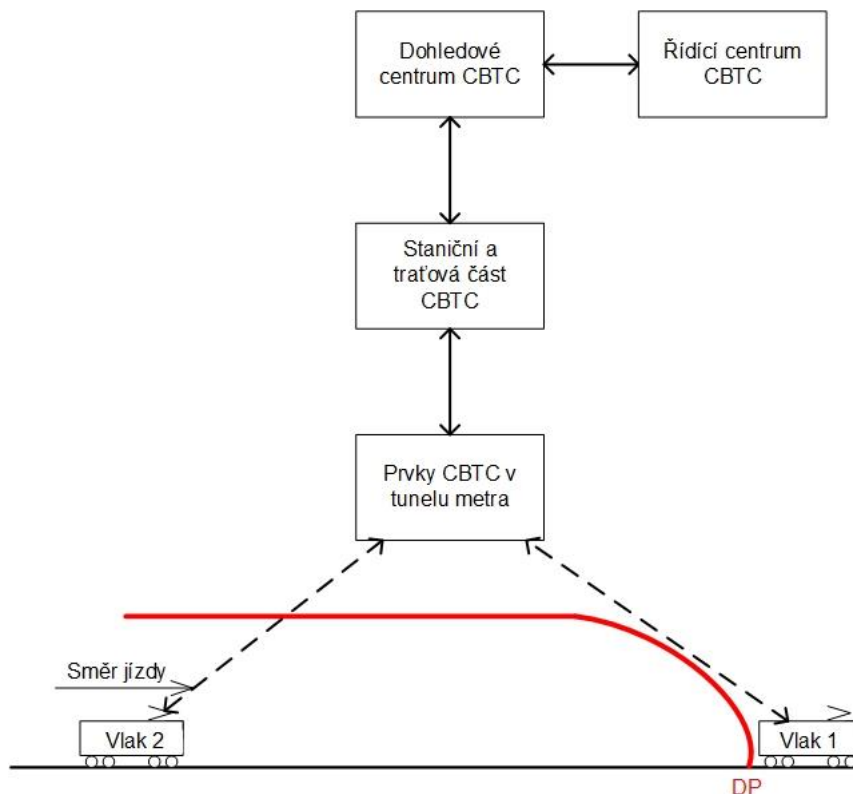
Obecně se tento subsystém zabezpečovacího zařízení označuje jako ATP a jeho úkolem je výpočet rychlostního profilu, který vlak svou jízdou nepřekročí (6). Zabezpečovací zařízení je odpovědné za dodržení této křivky, což je velmi důležité z pohledu bezpečnosti a nastavení celého systému. Běžně se dnes užívají systémy ATO, u kterých ale odpovědnost za nepřekročení maximální rychlosti či oprávnění k jízdě stále leží na obsluze vlaku. Kromě této mobilní části, která je nedílnou součástí každé soupravy, je dalším nezbytným technickým prostředkem CBTC jeho traťová část, ve které jsou především technické prostředky pro identifikaci polohy vlaku. Systém ATS pak má za úkol dohled nad soupravami a jejich vzájemnou koordinaci či kooperaci s dalšími částmi systému jako jsou například stanice¹⁷. Systém ATS také monitoruje všechny vlaky, které se nacházejí v síti, ať už jsou v aktivní jízdě nebo odstaveny, kontroluje jejich odchylku od jízdního řádu a ovládá informační systémy pro cestující a zaměstnance provozovatele dráhy i pro zaměstnance provozovatele drážní dopravy. Systém ATS také kontinuálně kontroluje integritu celého systému a dále pomocné systémy jako záložní kolejové obvody či bezpečnostní prvky proti nežádoucímu vniknutí do tunelu či

¹⁵ Sem lze zařadit přenos a zpracování bezpečnostně-relevantních dat a nepřesnost polohy a rychlosti. Vše je nutné zohledňovat více kritickým směrem

¹⁶ U standardu CBTC není tento parametr předmětem standardizace

¹⁷ Eskalátory či nástupištní stěny

poškození systému (6). Existují dva způsoby, jakým mohou v systému CBTC vozidla komunikovat s traťovou částí. Jedním z nich je instalace rádiové sítě, druhým pak využití indukčních smyček (loop) a balízových skupin (13). Oba principy se využívají také v ETCS, kterému se věnuje kapitola 2. V případě instalace trasy metra D v Praze se bude jednat o rádiovou síť. Schéma funkčních závislostí této sítě je na obrázku 7.



Obrázek 7 Schéma funkčních závislostí systému CBTC trasy metra D v Praze

Zdroj: autor na podkladě (5)

1.2 Normy pro systém CBTC

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.1, principy CBTC jsou založeny na komunikaci a jejich celosvětové využití je možné pouze při dodržování mezinárodních norem a požadavků na funkčnost systému CBTC. Pouze tak je možné zajistit kompatibilitu částí systému od různých dodavatelů bez vlivu na funkčnost. Pro oblast CBTC byly definovány dvě základní mezinárodní normy. První je norma **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE 1474.1)**, která byla schválena Standardizační asociací IEEE v roce 2004 a týká se funkčních a výkonnostních požadavků na systémy CBTC. Stěžejní jsou vlastnosti a parametry systému ATP. Funkce ATO a ATS nejsou dle této normy mandatorními součástmi CBTC systému. Norma IEEE 1474.1 je využitelná také pro další subsystémy městské drážní dopravy. V souvislosti s touto normou je vhodné zmínit její další části (IEEE 1474.2 až IEEE 1474.4),

kteří definují například standardy uživatelského rozhraní nebo podmínky testování jednotlivých komponent systému CBTC.

Druhou normou je **Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems** (IEC 62290), která je uváděna pod zkratkou UGTMS¹⁸. Tato norma byla schválena Mezinárodní elektrotechnickou komisí v roce 2007. Význam této normy spočívá mimo vymezení základních pojmů a popisu jednotlivých kontrolních a řídicích funkcí především v tom, že definuje stupně automatizace (GoA¹⁹). Základních stupňů automatizace je pět, GoA0 až GoA4 a užívají se pro klasifikaci všech železničních systémů. Zjednodušeně je možné vlastnosti těchto standardů zobrazit v tabulce 1 a také v příloze A.

Tyto mezinárodní normy byly promítnuty také do technických norem ČR (16). Konkrétně do normy

- ČSN EN 62267 (Dražní zařízení – automatizovaná městská doprava s vyhrazenou vodící dráhou – Bezpečnostní požadavky),
- ČSN EN 62290–1 (Dražní zařízení – Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou – Část 1: Systémové principy a základní pojmy), která vychází z IEC 62290 a,
- ČSN EN 62290–2 (Dražní zařízení – Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou a příkazové/kontrolní systémy – Část 2: Specifikace funkčních požadavků).

Tabulka 1 Stupně automatizace (GoA)

		GoA0	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
Zajištění bezpečné jízdy vlaku	Zabepečení jízdní cesty	Red	Green	Green	Green	Green
	Zajištění bezpečného rozestupu vlaků	Red	Green	Green	Green	Green
	Zajištění bezpečné rychlosti	Red	Green	Green	Green	Green
Řízení vlaku	Zrychlování a brzdění	Red	Yellow Provozní personál nebo částečně UGTMS	Green	Green	Green
Dohled nad vodící dráhou	Zabránění střetu s překážkami	Red	Red	Red	Green	Green
	Zabránění střetu s osobami v kolejišti	Red	Red	Red	Green	Green
Dohled nad pohybem cestujících	Otevírání dveří pro cestující	Red	Red	Red	Red	Green
	Zabránění úrazům osob mezi vozy nebo v nástupním prostoru	Red	Red	Red	Red	Green
	Zajištění podmínek pro bezpečný rozjezd	Red	Red	Red	Red	Green

¹⁸ UGTMS – Urban Guided Transport Management System

¹⁹ GoA – Grade of Automation

		GoA0	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
Provozování vlaku	Uvádění vlaku do provozu a odstavení z provozu					
	Dohled nad stavem vlaku					
Zajištění detekce a řešení nouzových situací	Detekce ohně/kouře a detekce vykojení, detekce roztržení vlaku, nouzová signalizace cestujících					UGTMS nebo personál v OCC

Zdroj: (17)

Toto rozdělení dle GoA je definováno v IEC 62267 a určuje, které funkce systému ovládá provozní personál, a které automatický systém. Hlavními funkcemi tohoto systému je zajištění bezpečnosti personálu a cestujících ve vlacích a na nástupištích a ochrana systému proti narušení zvenčí, ať už nahodilé či záměrné. Z pohledu rozdělení těchto systémů na současné a budoucí lze považovat GoA0 až GoA2 za systémy, které jsou využívány v současné době, a GoA3 až GoA4 jako systémy budoucí. Zde se vžil označení autonomní systémy. Z tohoto důvodu jsou v práci dále rozvíjeny pouze autonomní systémy.

GoA3 – vlak bez strojvedoucího

Tento stupeň se v IEC 62267 označuje jako driverless. U tohoto stupně automatizace není v čele vlaku (řídícím vozidle) přítomen žádný zaměstnanec, který by byl zodpovědný za rozjezd či brzdění vlaku nebo pohledem kontroloval trať a v případě nebezpečí jej zastavil. Za bezpečnost jízdy vlaku je zcela zodpovědné zabezpečovací zařízení, které monitoruje volnost vlakové cesty před vlakem a dohlíží nad dodržováním traťové rychlosti. Ve vlaku je přítomen pouze vlakový personál zodpovídající za bezpečnost cestujících uvnitř soupravy, zavření dveří atp. V případě poruchy či jiné mimořádné události, může tento personál také převzít některé funkce automatického systému (4) jako například vedení vlaku sníženou rychlostí do nejbližší stanice.

GoA4 – provoz vlaku bez obsluhy

V IEC 62267 je označován jako Unattended Train Operation (UTO). Tato automatizace je označována jako Automated Metro, tedy provoz vlaků bez strojvedoucího i jiného provozního personálu. Celý systém musí být vybaven bezpečnou detekcí pro ohlášení nebezpečných podmínek a nouzových situací. Při vzniku nebezpečné situace je dohledový personál informován a následují se bezpečnostní postupy. V kapitole 1.4 jsou uvedeny příklady těchto systémů a obecně se dá říct, že tento způsob zabezpečení umožňuje díky maximální možné míře automatizace provoz vlaků až na následné mezidobí 75 sekund a zkrácení pobytů ve stanicích až na 15 sekund (18).

1.3 Technická základna komunikace v prostředí CBTC

Komunikace v CBTC spočívá z hlediska fyzické vrstvy na dvou klíčových technologiích, které v uplynulém období technologického rozvoje doznaly výrazného rozšíření na komerční bázi, a tím se staly snadno dostupnými. Jsou to optické kabely a bezdrátové mobilní komunikace. Tyto kabely mají dostatečnou kapacitu pro přenos velkého množství dat v krátkém čase (kapacita optického kabelu je mezi 10 a 40 Gb za sekundu), což je jeden ze základních pilířů těchto systémů. Zároveň mají tyto kabely také vysokou spolehlivost přenosu informace. To je dáno tím, že jednou z vlastností optických kabelů je také imunita vůči elektrickému rušení či elektrická nevodivost. Samotná konstrukce kabelu pak musí zajišťovat bezpečnost proti požáru, vlhkosti, chemickým reakcím či běžnému mechanickému poškození. Z pohledu přenosu informací implementuje systém CBTC protokol IEEE 802.11 a/g/p/n, který je součástí běžných typů WiFi/WLAN sítí. Rádiová síť CBTC používá kmitočty 2,4 GHz a 5,8 GHz, které mají dobré vlastnosti a dosah pro provoz v tunelech metra (19). Zároveň jde o otevřený a běžně používaný standard, čímž je umožněna kompatibilita s různými jinými technickými řešeními. Ve standardním provedení se používá nepřetržitá obousměrná komunikace vozidlo-trať při využití dublovaných komunikačních kanálů. To má za následek zvýšení spolehlivosti systému, protože pokud by při použití pouze jednoho kanálu došlo k přerušení informačního toku (nebo přijetí nesrozumitelné informace), došlo by následně k aktivaci nouzového brzdění. Rozmístění prvků (stacionární části) radiové sítě podél trati musí zajišťovat její kontinuální pokrytí. Propojení prvků (stacionární části) radiové sítě je zabezpečeno opět sítí optických kabelů (zpravidla 10 až 20 vláken). Základní vlastnosti nejběžnějších CBTC systémů jsou uvedeny v Příloze B, která byla sestavena na základě literatury (6), (7), (8) a (9).

Všechny tyto prvky tvoří nedílnou součást technické základny CBTC systémů. Pro potřeby budoucího posouzení ETCS byly standardy CBTC použity jako vodítko při posuzování možných úprav systémových vlastností ETCS. I když normy CBTC a specifikace ETCS vznikaly paralelně bez vzájemné interakce, je možné při dalším vývoji či úpravách systému ETCS využít zkušeností z implementace systému CBTC. Úlohou ERA pak je zajistit, aby takové úpravy vlastností a chování jednotlivých částí systému, aby byly interoperabilní, bezpečné a jednoznačně identifikovatelné. V kapitole 2 budou tyto soubory vlastností definovány a analyzovány.

2 EVROPSKÝ VLAKOVÝ ZABEZPEČOVACÍ SYSTÉM

Jak již bylo uvedeno na obrázku 1, Evropský vlakový zabezpečovací systém ETCS je podmnožinou ERTMS²⁰, jehož další nedílnou součástí je GSM-R²¹, ETML²² a EOR²³. Tento způsob zabezpečení tratí a jízdy vlaku je ve světě poměrně rozšířen. V roce 2020 bylo tímto systémem vybaveno více než 110 tisíc km tratí a 19 tisíc vozidel. Ještě v roce 2010 to nebyla ani polovina (20). Nejrozšířenější je tento systém v Asii, na kterou připadají dvě třetiny celkového objemu vybavených tratí a pětina vybavených vozidel. Evropské železnice pak zauímají cca 30 % tratí a 70 % vozidel. Objem kolejí vybavených tímto systémem v Evropě je nevyšší v Belgii 7 860 km, dále ve Francii 7 500 km, Španělsku 7 300 km a také v Polsku 4 700 km. Nejvíce vozidel vybavených palubní částí je v Německu, Spojeném království a Švýcarsku. Z neevropských zemí je tento systém nejvíce instalován v Číně (20 870 km), Turecku (5 315 km) či Saudské Arábii (4 519 km). Co se týče vozidel, nejvíce je zastoupen Tchaj-wan, Jižní Korea a Austrálie.

Veškeré principy a fungování ETCS jsou obsaženy v tzv. specifikacích²⁴, které obsahují přesné procedury jednotlivých funkčních celků a výměny informací mezi jednotlivými částmi systému, tedy jakýsi datový a funkční rámec. Základním důvodem pro tvorbu těchto specifikací v evropském kontextu je naplnění plánů interoperability evropského železničního sektoru v subsystému řízení a zabezpečení²⁵. Proces tvorby specifikací je organizován a zaštiťován Evropskou železniční agenturou²⁶ tak, aby byl zajištěn jednotný výklad všech funkcí a pojmů, které následně ovlivňují chování a bezpečnost celého systému. (21). V obecné rovině se ETCS skládá ze stacionární (traťové) části a části mobilní (vozidlové). Stacionární část je ve specifikacích popsána velmi detailně a z pohledu kapacity dráhy je důležitá zejména z toho důvodu, aby informace, která se přenáší do mobilní části, byla validní a aktuální. Způsob získání a tvorba těchto informací je již ale závislá na národních zvyklostech a pravidlech, které určují vlastnosti SZZ²⁷, TZZ²⁸ či PZ²⁹. Obecnými principy, vlastnostmi a nasazením vlakového zabezpečovače ETCS se zabývají zdroje (22) (23), (24), (25), (26), a (27). S postupnou

²⁰ ERTMS – European Rail Traffic Management System

²¹ Global System for Mobile Communications – Railway

²² ETML – Evropský standard provozního řízení

²³ EOR – Evropské provozní předpisy

²⁴ Set of specifications 1, 2, 3

²⁵ TSI CCS – Technical specifications for interoperability – Control Command and Signaling

²⁶ ERA – European Railway Agency

²⁷ SZZ – staniční zabezpečovací zařízení

²⁸ TZZ – traťové zabezpečovací zařízení

²⁹ PZ – přejezdové zabezpečení

implementací ETCS Level 2 (dále jen ETCS L2) na české železnici se tento systém vlakového zabezpečovače stal velmi diskutovaným tématem v řadách odborné veřejnosti (28). Nejvíce rezonují tři témata. Každé z nich je možné řešit samostatně, neboť řeší jinou část problematiky implementace ETCS. Nicméně největší užitek samozřejmě přinese synergické řešení všech tří témat. V praxi jsou všechna tato tři témata řešena paralelně.

Prvním tématem je dilema, zda **vybavit současná hnací vozidla novým vlakovým zabezpečovačem** nebo **pořizovat vozidla nová**, která mají tento zabezpečovač implementován již v rámci jejich dodávky zákazníkovi. To je velmi komplikované, neboť cena takového zařízení u prototypu se pohybuje okolo 50 milionů Kč. Při výběrových řízeních v ČR se pak vlivem výrazného převisu poptávky pohybovala hodnota dovybavení větší série hnacích vozidel mezi 8 a 12 miliony Kč za jedno vozidlo. Tato částka u starších hnacích vozidel značně převyšuje jejich současnou hodnotu (účetní i tržní). Na druhou stranu délka migračního období³⁰ neposkytuje dopravcům dostatek času pro zajištění odpovídajícího počtu nových hnacích vozidel. Nehledě na to, že masivní nákupy nových hnacích vozidel vyžadují velké investiční prostředky. Cena jednoho hnacího vozidla se pohybuje okolo 100 milionů Kč. Nicméně toto je otázka spíše ekonomická a nemá přímý vliv na výkonnost železniční infrastruktury, proto se jí autor v dalších částech habilitační práce dále nevěnuje.

Druhým tématem je **vybavování vozidel, která nejezdí pravidelně po tratích vybavených ETCS**. U těchto vozidel se pak efekt investice do nového zabezpečovače ještě více rozměňuje. Řešením nejen tohoto tématu se zabývá Správa železnic, s. o. a jako východisko se jeví zavedení různých aplikačních úrovní systému ETCS pro všechny tratě v ČR. Chyby lidského faktoru při nehodách v roce 2020 jen urychlily práce na plánu pro instalaci dalších dvou verzí ETCS na celé síti Správy železnic, které se souhrnně označují jako ETCS Regional. Konkrétně ETCS L1 LS³¹ a ETCS STOP³². Přínos je oproti ETCS L2 v nižších investičních nákladech a zachování funkce systému ATP. Tyto verze jsou určeny pro tratě s menšími dopravními výkony, a proto nelze objektivně zhodnotit, zda budou dopady na výkonnost infrastruktury pozitivní či negativní. Proto ani této otázce není v dalších částech habilitační práce věnována pozornost. V každém případě však bude zajištěna přechodnost vozidel mezi všemi tratěmi vybavenými ETCS.

³⁰ Pojem Migrační období je Součástí Národního implementačního plánu ETCS a pro tratě Děčín-Praha-Česká Třebová-Brno-Břeclav, Břeclav-Bohumín a Česká Třebová-Přerov končí 31.12.2024.

³¹ ETCS L1 LS – LS je limited supervision. Bodový vlakový zabezpečovač, který aktivuje nouzové brzdění v případě projetí konce oprávnění k jízdě.

³² ETCS STOP – systémová verze, která umí především schopná při projetí návěsti stůj nouzově zastavit vlak a dohlíží také nejvyšší dovolenou rychlost.

Třetím tématem je vlastní **nastavení vlastností** (parametrů) **brzdných křivek**, které zajišťují dohled nad zastavením (snížením rychlosti) vlaku. Tomuto tématu se autor věnuje ve spolupráci s AŽD Praha, s.r.o. a Správou železnic, s. o. Vzhledem k tomu, že správné nastavení brzdných křivek má přímý vliv na výkonnost železniční infrastruktury, zaměřil se autor právě na tuto otázku. Podrobněji je o tématu pojednáno v podkapitole 2.2 vycházející z literatury (29) a (30).

Složitost této problematiky je umocněna tím, že s některými z těchto aspektů je železniční doprava v ČR konfrontována vůbec poprvé. Aktuálně jsou projekty realizace ETCS L2 (24), (31) již v rutinním provozu, tzn., že je umožněn provoz všech vozidel vybavených mobilní částí ETCS příslušné systémové verze a splňující legislativní a další technické podmínky pro jízdu s cestujícími. Takto je možné začít zkoumat reálné dopady zavedení ETCS na trati Brno – Břeclav. Ostatní úseky budou do rutinního provozu postupně nabíhat.

Ideální variantou by pochopitelně bylo implementovat ETCS pouze na nové tratě, kde lze konfiguraci kolejíště a umístění prvků uzpůsobit podmínkám a specifikacím ETCS. Takový přístup však není možný, a to jak z prostorového, tak především z ekonomického hlediska. Je tedy nutné implementovat ETCS do stávajících podmínek infrastruktury Správy železnic, s. o. Tyto podmínky však mohou způsobovat provozní omezení. Konkrétně se jedná o to, že zastavení vlaku před danou polohou je plně v kompetenci strojvedoucího, neexistují prokluzové úseky, přímá boční ochrana u dopravních kolejí není standardem. Také délky staničních kolejí korelují s délkou provozovaných vlaků, což má za důsledek, že vzdálenost bodu ohrožení³³ od místa zastavení je velmi malá (zpravidla 20 až 30 metrů). Také v oblasti technologie a řízení dopravy byly v posledních letech učiněny kroky k minimalizaci provozních intervalů. Zavedení ETCS může zejména na jednokolejných tratích prodloužit intervaly křižování či narušit současné vjezdy vlaků. Na víceokolejných tratích může dojít ke zhoršení situace při změně sledu vlaků. Lze tak říci, že zvýšení bezpečnosti a předání dohledu nad zastavením vlaku sníží provozní rezervy a výkonnost infrastruktury. Po přechodnou dobu tak bude třeba počítat s tlakem na strojvedoucího ve snaze zachovat původní výkonnost infrastruktury. Manévrovací prostor strojvedoucího bude do značné míry omezen dohledovými funkcemi brzdných křivek ETCS.

³³ Může se jednat o námezník nebo hrot výhybky. Obecně tedy místo, kde reálně hrozí kolize dvou vozidel.

Samostatnou otázkou rozvoje ETCS je definice provozních aspektů a Subsetů pro aplikační úroveň 3, tedy pro ETCS L3. Tato úroveň musí kromě funkcí obsažených v ETCS L2 pomocí OBU zajišťovat kontrolu jeho integrity³⁴. Jednou z hlavních vlastností tohoto systému je vznik pohyblivého bloku³⁵, podobně jako u existujících systémů CBTC pro metro. Velikost oddílů tak bude determinována pouze maximálním bezpečným čelem (koncem), minimálním bezpečným čelem (koncem) a délkou vlaku. Bezpečný odstup mezi vlaky (a z něj plynoucí následné mezidobí) pak bude záviset na rychlosti následujícího vlaku, brzdných vlastnostech druhého vlaku a traťových poměrech.

Level 3 je v rovině experimentálního vývoje například v Německu, kde společnost DB Netz ve spolupráci s firmou THALES a univerzitou v Düsseldorfu od roku 2017 zkouší simulovat level 3 na testovací trati pomocí různě dlouhých prostorových oddílů. Délka těchto oddílů je kratší v oblasti před obvyklými místy zastavení a delší na širé trati. Technicky se tak jedná o hybridní model, který je stále L2 bez návštěvidel, ale znamená to určitý krok vpřed směrem k pohyblivému bloku. Závěry ukazují, že kratší oddíly o délce cca 400 metrů dokážou zvýšit propustnost trati až o 20 %.

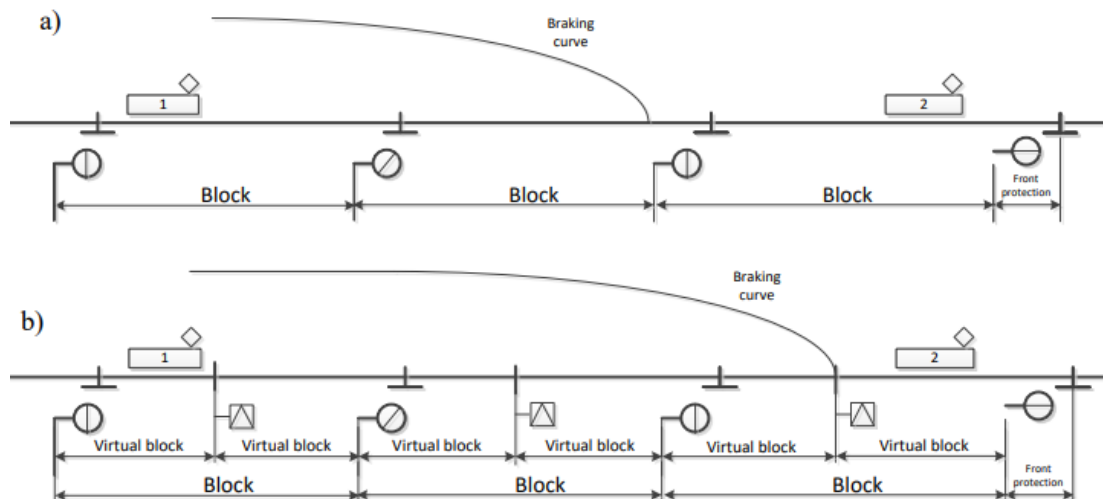
Na úrovni ERA byl k tomuto tématu v roce 2016 založen dokument (32), který shrnuje principy funkce Hybridního modelu ETCS L3³⁶, a který není souborem specifikací pro tento systém, ale je to důležitý dokument Users Group EEIG ERTMS³⁷. Podrobnější informace zahrnuje také literatura (33) a (34). V literatuře (35) je provedena analýza kapacity tratě při použití tříznakého a čtyřznakého autobloku v komparaci s pevnými oddíly ETCS a kombinací pevných a virtuálních oddílů ETCS (obrázek 8).

³⁴ Fyzickou kontrolou integrity bude zajišťovat jednotka OTI, která bude tuto informaci předávat OBU

³⁵ Moving block

³⁶ Hybrid ERTMS/ETCS Level 3

³⁷ EEIG ERTMS – European Economic Interest Group ERTMS



Obrázek 8 Současný stav s pevnými oddíly (a) a aplikace virtuálních oddílů (b)

Zdroj: (35)

Z porovnání variant vyplývá, že při rychlosti $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ je kapacita tříznakého autobloku srovnatelná s aplikací ETCS. Kapacita trati s virtuálními návěstidly je podobná jako u čtyřznakého autobloku. Závěry tohoto výzkumu vedly autora k provedení podobného výzkumu v podmínkách ČR. Výsledky jsou uvedeny v kapitole 4.

Postoj Správy železnic, s.o., je v otázce ETCS L3 takový, že existuje zájem o tuto aplikační úroveň, ale chybí vozidla, neexistuje výhradní provoz a nejsou dokončeny specifikace této aplikační úrovně. Jakmile budou tyto podmínky splněny, bude možné uvažovat o zavedení ETCS L3 v ČR. Další vývoj ETCS L3 je tak v současné době v rovině vědeckého a technického výzkumu. Zajímavý článek (36) na téma integrity vlaku byl prezentován v roce 2022 na konferenci WCRR v Birminghamu. V tomto článku jsou shrnuty poznatky z řešení projektu X2RAIL-4, jehož cílem je stanovit funkční požadavky na integritu vlaku. To je zásadní vlastnost pro bezpečnou funkci ETCS L3. V článku je prezentován vývoj modulu integrity vlaku (OTI³⁸) v několika variantách. Na projektu X2RAIL-4 se podílí také česká firma AŽD Praha, s.r.o. Z pohledu kapacity autoři článku předpokládají, že při použití pohyblivého bloku se sníží vytížení kritických míst stanice (výhybky, přejezdy) o 15 až 20 %. Pravděpodobně až další vývoj ukáže, zda je tento směr dostatečně bezpečný, ekonomicky efektivní a tudíž životaschopný.

V každém případě však propustnost souvisí s tím, jak přesně je možné určit polohu vozidla na infrastruktuře. Tímto problémem se zabývala celá řada publikací, jejichž přehled je možné najít v literatuře (37). Kolektiv autorů zde analyzuje význam TPI³⁹ pro celkovou kvalitu a výkonnost systémů, které lze označit jako TMS⁴⁰. Byla vytvořena funkční struktura takového

³⁸ OTI – Onboard Train Integrity

³⁹ TPI – Train Positioning Inaccuracies

⁴⁰ TMS – Traffic Management System

systemu, aby mohl být následně zhodnocen význam TPI na výkonnost TMS jako celku. Tato struktura je v příloze C a obsahuje všechny parametry mající vliv na fungování tohoto systému. Každý ze vstupů byl pak definován fixní hodnotou nebo pravděpodobností s příslušnými parametry. Sledovaná veličina pak byla vždy reprezentována sadou hodnot. Zajímavostí tohoto přístupu bylo také to, že jeho matematická část neprobíhala v žádném specializovaném software pro železniční dopravu, ale v prostředí MATLAB. Autoři vytvořili scénáře a simulovali pomocí metody Monte Carlo kombinaci vstupního zpoždění (na vstupu do simulované oblasti) a nepřesnost určení polohy vlaku. Závěr z tohoto výzkumu ukazuje, že současná nepřesnost v určení polohy vlaku má vliv na celkové zpoždění v systému. Zároveň, ale ukázal, že nepřesnost (časová nejistota) na vstupu do oblasti má mnohem vyšší vliv na celkové chování systému ve vztahu k celkovému zpoždění. Tento efekt se prohlubuje se zvětšující se řízenou oblastí. Z pohledu praktické aplikace tohoto výzkumu tak lze usoudit, že nepřesnost odometrie u ETCS je z pohledu propustnosti menší problém než vstupní zpoždění vlaků. Tento fakt určitě platí, pokud se jedná o propustnost traťových oddílů a mezistaničních úseků. Autor předpokládá, že v případě stanic je přesnost odometrie velmi významným faktorem ovlivňujícím propustnost zhlaví, protože přesnost určení polohy vlaku má přímý vliv na užitečnou délku koleje, a tím i na dobu obsazení rozhodné výhybky v pojížděné vlakové cestě. Tento negativní efekt lze částečně odstranit pomocí vložených (doplňkových) balizových skupin, které se umisťují na staniční koleje několik set metrů před balizové skupiny na koncích staničních kolejí.

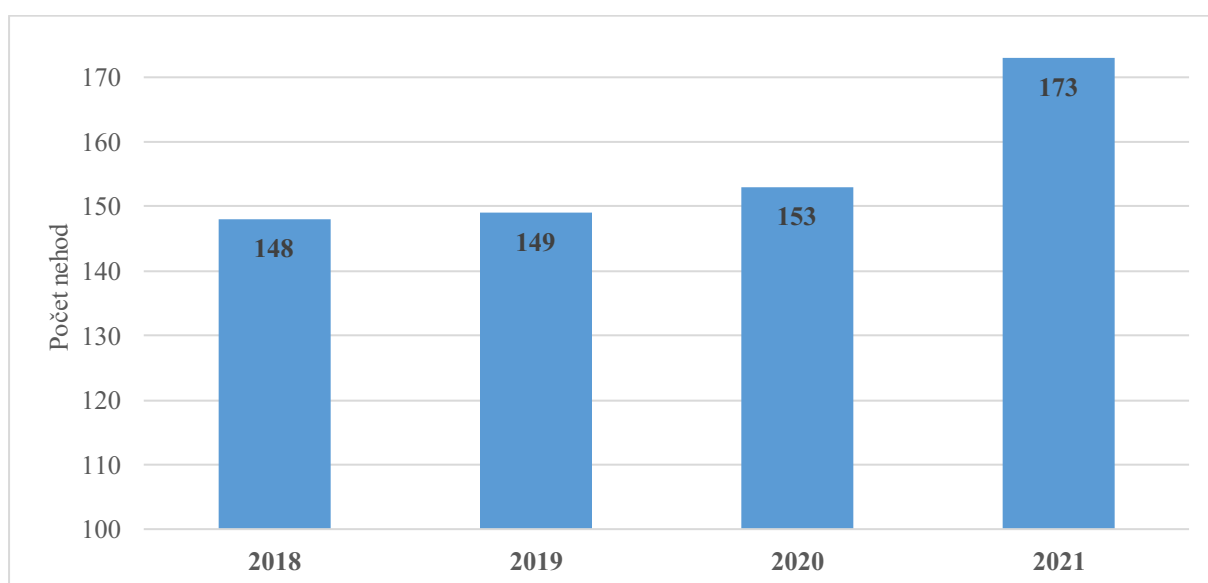
Dohled nad brzděním vlaku

Již od počátku železničního provozu na českém území byl jedním ze základních principů fakt, že strojvedoucí je přímo, a to dokonce trestně, odpovědný za včasné snížení rychlosti⁴¹ vlaku dle rychlostníků nebo návěstidel či rychlostní návěstní soustavy. S tím souvisí stanovení zábrzdné vzdálenosti, na kterou se návěstidla (kmenové návěstidlo a jeho předvěst) umisťují, aby měl strojvedoucí vždy dostatek času provést požadovanou změnu rychlosti. Aby byl tento požadavek splněn za všech okolností, je nutné, aby byl vlak dostatečně brzděn, tedy aby jeho skutečné brzdicí procento bylo vyšší nebo rovno předepsané hodnotě⁴². Brzdicí hmotnost jednotlivých vozidel ve vlaku je stanovována typově pomocí experimentu, kdy se schvaluje daný typ vozidla pro provoz. Osoba odpovědná za sestavení vlaku pak určí skutečné

⁴¹ V celém textu se bude hovořit o snížení rychlosti vlaku. Pod tímto pojmem bude chápáno jak snížení rychlosti vlaku například do odbočky, tak i jeho zastavení před koncem jízdní cesty (MA). Z důvodu lepší přehlednosti textu však bude uváděno pouze **snížení rychlosti**.

⁴² Předepsané brzdicí procento je v Příloze 2 Vyhlášky 173/1995 Sb. – Dopravní řád drah

brzdící procento a potvrdí toto zprávou o brzdění. Další parametry jako aktuální povětrnostní podmínky, které přímo ovlivňují adhezi, se při tomto výpočtu již neuvažují. Výsledné snižování rychlosti vlaku je tak podstatnou měrou dáno citem, schopnostmi a zkušenostmi strojvedoucího. Z tohoto postupu je patrné určité bezpečnostní riziko, které spočívá v tom, že když strojvedoucí nesnižuje rychlost vlaku dostatečně (nebo vůbec⁴³), může velmi reálně a závažně ohrozit železniční provoz. Statistika Drážní inspekce (38) na obrázku 9 ukazuje, že počet nedovolených jízd za návěstidla zakazující jízdu roste. Tyto statistiky však obsahují pouze události, při kterých došlo k vykolejení nebo srážce. Skutečný počet mimořádných událostí tohoto typu je mnohem vyšší.



Obrázek 9 Vývoj počtu mimořádných událostí nedovolené jízdy za návěstidla

Zdroj: autor na podkladě statistik Drážní inspekce

Nehody z let 2020 a 2021 tedy jasně ukazují, že s vyšší hustotou provozu se také zvyšuje riziko tohoto typu mimořádné události a její následky. Jediným prostředkem k eliminaci těchto nežádoucích jevů je implementace vlakového zabezpečovače ATP. Prostředky ATP jsou schopné spojitě kontrolovat, zda vlak nejede rychleji, než mu dovoluje jeho dynamický rychlostní profil (dále jen DSP)⁴⁴. Tuto kontrolu nemusí pochopitelně vykonávat pouze nad strojvedoucím, ale kontrolovat lze také systém ATO. Aby bylo možné vytvořit DSP je nutné znát dvě jeho komponenty. Tou první je nejvíce omezující rychlostní profil (dále jen MRSP⁴⁵), který je vytvořen na základě informací o traťových rychlostech, stanovené rychlosti vlaku, rychlostí, které plynou z aktuálních návěstí návěstidel, o pomalých jízdách a postavených

⁴³ Při nehodě u Milavče strojvedoucí patrně z důvodu zdravotní indispozice vůbec nereagoval na návěst výstraha a projel ve vysoké rychlosti návěst stůj. To mělo za následek velmi vážnou nehodu.

⁴⁴ DSP – Dynamic speed profile

⁴⁵ MRSP – Most restrictive speed profile

vlakových cest. Tím druhým je brzdna křivka, jež je tvořena jako diferenciální rovnice brzdění. Jejími vstupy jsou kromě brzdících procent také jízdní odpor, součinitel rotačních hmot, doba prodlevy náběhu brzdy nebo doba náběhu brzdy. Principem tak je výpočet závislosti brzdné síly na rychlosti a čase. Hlavním úkolem ATP je tedy určit okamžik, ve kterém je nejpозději nutné, aby vlak začal vyvíjet brzdnou sílu tak, aby v požadovaném místě dosáhl potřebné (stanovené) rychlosti. Posloupnost těchto bodů je možné označit jako brzdnou křivku, která může končit v nule nebo v jakékoli jiné kladné rychlosti. Existuje více metodik popisujících výpočet této brzdné dráhy, čímž dochází i k rozdílným výsledkům (brzdící procento, metodika UIC, konverzní model ETCS, ...). V další části této kapitoly je analyzována metodika, která vychází ze skutečných brzdících procent. Aplikací brzdných křivek v režimu ETCS se autor věnuje v kapitole 2.6.

Brzdící procento

Již bylo uvedeno, že brzdící procenta (λ) se v ČR získávají ze Zprávy o brzdění vlaku. Jejich výpočet je dán vztahem 1 a jejich velikost je pak porovnána s tabulkou v Příloze 2, Dopravního řádu drah⁴⁶. Podstatné tak je pouze to, že vlak je schopen z dané rychlosti zastavit na zábrzdnou vzdálenost, která je definována pro konkrétní traťovou rychlost.

$$\lambda = \frac{\text{brzdící hmotnost}}{\text{skutečná hmotnost}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Kde:

λ brzdící procento [%],

BP.....brzdící hmotnost daná počtem a typem použitých brzd [tuny],

SHskutečná hmotnost vozů včetně nákladu či cestujících [tuny].

Na úrovni ERA je uvažováno jiným způsobem a pomocí Kodexu UIC 544-1 (39) se stanovuje celková brzdna dráha. Mimo brzdících procent se používají i koeficienty, které jsou závislé na rychlosti vlaku. Tyto jsou dány vztahem 2 a konkrétní hodnoty jsou uvedeny v Příloze A Kodexu UIC 544-1 a zde v tabulce 2.

$$s = \frac{C}{\lambda + D} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Kde:

s.....brzdna dráha [m],

C, D.....koeficienty dle tabulky 2 [-],

λ brzdící procento [%].

⁴⁶ Vyhláška 173/1995 Sb. – Dopravní řád drah v platném znění

Tabulka 2 Koefficienty pro výpočet brzdné dráhy dle UIC 544-1

Rychlost [km·h ⁻¹]	C	D
100	61 300	8,9
120	91 633	11,6
140	130 995	11,6
150	152 640	11,6
160	176 714	11,6
180	228 219	11,6
200	287 620	11,6

Zdroj: (39)

Jako potenciální bezpečnostní riziko se při výpočtu skutečných brzdících procent jeví stanovení skutečné hmotnosti vlaku. V praxi je nejpřesnější stanovení u soupravových vlaků, kde nejsou cestující. U ostatních vlaků osobní dopravy je pak uvažována vždy plně obsazená souprava. V případě, že je ve vlaku více lidí, než je uvedena jeho tabulková kapacita, nemusí velikost brzdícího procenta zcela odpovídat. Nicméně velikost této chyby bude spíše marginální, protože při hmotnosti osobního vozu mezi 45 a 55 tunami představuje jeden cestující navíc (normovaná hmotnost 80 kg) cca 1,5 ‰.

Porovnáním vztahu 1 a 2 je možné dospět k názoru, že česká metodika určuje pouze skutečné brzdící procento, které následně porovnává s hodnotou uvedenou ve vyhláše č. 173/1995 Sb., kterou se vydává dopravní řád drah, ve znění pozdějších předpisů, zatímco metodika UIC určuje přesněji dráhu, na které musí daný vlak zastavit. To je pak možné použít jako vstupní hodnotu také pro ETCS. Pro ilustraci jsou vypočteny hodnoty brzdné dráhy dle UIC 544-1 pro vlaky se 100, 150 a 200 brzdícími procenty v tabulce 3.

Tabulka 3 Hodnoty brzdné dráhy dle UIC 544-1 [m]

Rychlost [km·h ⁻¹]	λ		
	100	150	200
100	562,9	385,8	293,4
120	821,1	567,0	433,0
140	1 173,8	810,6	619,1
150	1 367,7	944,6	721,4
160	1 583,5	1 093,5	835,1
180	2 045,0	1 412,2	1 078,5
200	2 577,2	1 779,8	1 359,3

Zdroj: autor

Jistou nevýhodou strojvedoucího je a vždy bude fakt, že on snižuje rychlost na základě svých zkušeností a pocitu při vedení vlaku. Oproti tomu systémy ATO či ATP řeší tuto otázku pomocí diferenciálních rovnic, tedy reverzně od potřebného místa zastavení k aktuální poloze.

Za normálních okolností tak brzdí strojvedoucí raději pozvolněji, protože potřebuje rezervu pro případ nějakého nestandardního chování vlaku či stavu koleje. Normálním stavem se rozumí stav, kdy strojvedoucí není nucen využívat plného výkonu hnacího vozidla například z důvodu snižování zpoždění. Z pohledu bezpečnosti je tak ATP systém bezpečnější než strojvedoucí.

2.1 Nastavení brzdných křivek ETCS

Z nehodových událostí, kterým může ETCS předcházet je nejčastějším důvodem projeti návěstidla zakazující jízdu (40). Škody při těchto událostech jdou do stovek milionů korun a drtivě většině těchto událostí by zabránil adekvátní způsob implementace ETCS.

2.1.1 Historický kontext vlakových zabezpečovačů

Historicky lze vlakové zabezpečovací systémy z pohledu přenosu informace na vlak rozdělit na bodové a liniové systémy. Vývoj bodových systémů (40) se datuje do druhé poloviny 19. století⁴⁷. Za první bodový zabezpečovač lze značit britský Autostop. Na něj navázal francouzský Crocodile. V průběhu 20. století bylo v různých zemích vyvinuto několik různých bodových zabezpečovacích systémů (TPWS⁴⁸ ve Velké Británii, Integra Signum či ZUB⁴⁹ 121 ve Švýcarsku, Indusi⁵⁰ v Německu a jiné), čímž byl mimo jiné položen základ tehdejší nekompatibility jednotlivých železničních systémů. Z dlouhodobého hlediska bylo v tehdejší Československu přistoupeno k vývoji liniového vlakového zabezpečovače, který zajišťoval spojitý přenos informace z trati na vozidlo, což umožňovalo mnohem lepší přehled o situaci na trati a teoreticky tak zaručovalo vyšší bezpečnost. Princip funkce systému LS je všeobecně znám a v ČR byl instalován na zhruba 1 500 km tratí. Nevýhodou tohoto zařízení prizmatem bezpečnosti bylo to, že pouze přenášelo informaci na vlak bez kontroly snižování rychlosti před omezením maximální rychlosti vlaku. Tato skutečnost představuje reálné bezpečnostní riziko, protože absence informací o povolené rychlosti v kombinaci s aktuální vzdáleností k příslušnému rychlostnímu omezení vede k nutnosti ponechat zodpovědnost za zastavení, resp. snížení rychlosti vozidla na strojvedoucím. Systém zodpovídá za vytvoření, přenos a zobrazení informace, přičemž k intervenci (vyvolání brzdění) dochází až při absenci reakce strojvedoucího na změnu informace restriktivním směrem. Systém nezná žádné brzdné křivky a nedohlíží tak na snížení rychlosti k dané poloze spojitě. V devadesátých letech 20. století byl přechodně testován také systém PAKS⁵¹. Zde již byly nastaveny určité vzdálenostní

⁴⁷ Patent prvního bodové systému, který byl schopen zastavit vlak, pochází z roku 1872

⁴⁸ TPWS – Train Protection and Warning System

⁴⁹ ZUB – Zugbeeinflussung

⁵⁰ Indusi – Induktive Zugsicherung

⁵¹ PAKS – Poloautomatická kontrola strojvedoucího

a rychlostní limity, které musel strojvedoucí dodržet, jinak došlo k samočinnému brzdění. Posledním vývojovým stádiem zabezpečovače LS je MIREL (palubní část), která již strojvedoucímu generuje brzdou křivku a eliminuje tak riziko z nesnižování rychlosti strojvedoucím s možným dílčím vlivem na provozní výkonnost při uplatnění předčasné, resp. neadekvátně přísné restriktce. Nevýhodou tohoto zabezpečovače je, že generuje brzdou křivku bez ohledu na skutečnou délku oddílu a délka brzdě křivky je vždy 900 metrů. U delších prostorových oddílů tak dochází k tomu, že po ujetí těchto 900 metrů přechází strojvedoucí do manuálního režimu, který potlačuje funkci vlakového zabezpečovače.

Řešení absence dohledu nad adekvátním snižováním rychlosti vlaku spočívá v implementaci systému ETCS L2, který je schopen převzít zodpovědnost za dohled nad rychlostí vozidla a zároveň zachovat provozní výhody v podobě včasné aktualizace povolující informace. Určité možnosti skýtala také instalace bodového ETCS L1, s lokálním využitím smyček (Euroloop) pro zajištění spojitého dohledu. Výhodou je mnohem nižší ekonomická náročnost systému ETCS L1. Tímto směrem se při modernizaci železničního systému vydalo například Švýcarsko⁵², které využilo částečně svůj národní vlakový zabezpečovač a mobilní části jsou kompatibilní pouze s tímto švýcarským systémem. Bohužel současné specifikace již využití smyček u nových systémů neumožňují. Toto lze provádět pouze balízovými skupinami.

2.1.2 Dohledové limity ETCS

Pojem brzdě křivka (brake curve) je ve specifikacích ETCS řešen v Subsetu 026 (41). V části 026-3 jsou uvedeny základní principy fungování ETCS včetně MA, kontroly dodržování rychlostních limitů a výpočtu brzdě křivek. Samostatná příloha je věnována NV. Právě výpočet brzdě zpomalení (dále jen odrychlení⁵³) je klíčovým parametrem pro zajištění bezpečnosti železničního provozu. Vlastnosti brzdě modelu, resp. odlišnosti od současných zvyklostí budou hrát rozhodující roli při zvýšení či snížení propustnosti.

Tradiční zabezpečovací technika předpokládá, že strojvedoucí je schopen zastavit vlak (respektive snížit jeho rychlost) od předvěsti k hlavnímu návěstidlu. Pro naplnění tohoto předpokladu je nutné, aby brzdě dráha vlaku byla menší nebo rovna zábrzdě vzdálenosti, resp. definované vzdálenosti k zastavení v případě rozložení brzdě dráhy vlaku do dvou zábrzdě vzdáleností, tedy do dvou prostorových oddílů. Za tímto účelem je nutné zajistit, aby byl vlak dostatečně brzdě, tedy jeho skutečné brzdě procento (λ) musí být větší

⁵² Informace od Ing. Tomáše Konopáče (manager programu implementace ETCS Správy železnic

⁵³ Odrychlení – tento pojem užívá autor pro **brzdě zpomalení**, tedy záporné zrychlení, které je vyvoláno účinkem libovolného typu brzdy. Pojem zpomalení je užíván jako nadřazený pojem pro snížení rychlosti. Zpomalení může být vyvoláno dalšími vlivy jako je odpor ze stoupání, aerodynamický odpor či valivý odpor.

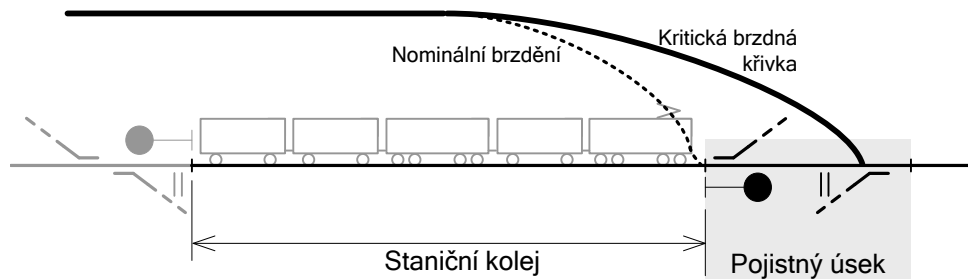
nebo stejné jako předepsané. Jak již bylo uvedeno, tak brzdicí procento se stanovuje tabelárně v závislosti na rychlosti jízdy, sklonu trati, zábrzdě vzdálenosti, způsobu brzdění, a délce vlaku. Na základě údajů o vozidlech je vypočteno brzdicí procento, které představuje poměr mezi brzdicí hmotností vlaku a skutečnou hmotností, která zohledňuje také ložení vozu, případně cestující (viz. vztah 1). Tuto informaci využívají také moderní vlakové zabezpečovače (ATP), které spojitě kontrolují, zda vlak (vedený strojvedoucím, nebo ATO) nejede rychleji, než udává jeho aktuální dynamický rychlostní profil. V ČR byl tento první systém s dynamickou kontrolou rychlosti zaveden zhruba před 20 lety na lince C pražského metra na vozidlech M1 a to v podobě systému Matra PA 135. Nejednalo se o brzdné křivky, které počítá vlaková část, ale o pevně dané informace o rychlosti, které byly obsaženy v kódovacích smyčkách položených mezi kolejnicemi. Brzdné křivky jsou na základě statického rychlostního profilu vypočteny pomocí diferenciální rovnice. Tento princip využívá také ETCS. Pro výpočet brzdné křivky se používá funkce brzdné síly v závislosti na rychlosti a čase. Pokud je tento princip aplikován na výpočet ucelené jednotky či soupravy je výsledkem brzdná křivka typická pro určitý typ vozidla či skladbu vozů. Z pohledu ETCS se takové vlaky nazývají **gama** a výpočet brzdné křivky lze podložit zkouškou. Pokud se jedná o náhodnou sestavu drážních vozidel tvořenou typicky lokomotivou a vozy nelze již gama přístup uplatnit, protože pro tuto sestavu vozidel neexistuje informace o tom, jaký bude průběh brzdné síly v závislosti na dráze a v čase. Jako jediná informace o schopnosti takové sestavy snižovat rychlost slouží brzdicí procento. Takové vlaky se nazývají **lambda** (42). U těchto vlaků je nutné přidávat při výpočtu brzdné křivky přírážky, které pokryjí nerovnoměrnosti či nedostatek informací o skutečném průběhu brzdné síly. Metoda lambda tedy vede k opatrnějším brzdným křivkám. Tento fakt může působit negativně na schopnost vozidel brzdit efektivně a využívat svých dynamických vlastností. Tuto skutečnost potvrdila v roce 2018 i Správa železnic, s.o., která v literatuře (43) uvádí doporučení pro dopravce, aby u elektrických a motorových jednotek zvážili, zda neinvestovat do provedení potřebných brzdných zkoušek za účelem tvorby gama vlaku. V opačném případě (lambda metoda) se tak vystavují riziku plošších brzdných křivek.

V podmínkách ČR je tato skutečnost dále prohloubena způsobem a zvyklostí brzdění ve vazbě na infrastrukturu, protože konec MA označovaný jako EoA⁵⁴ je totožný s místem ohrožení (dále jen DP⁵⁵). V řadě zemí, kde se uplatňují tzv. prokluzové vzdálenosti, jsou tato dvě místa odlišná (místo ohrožení není návěstidlo, ale výhybka), a vytváří tak lepší výchozí pozici pro dojíždění vlaku k návěstidlu. Situace zobrazená na obrázku 10 ukazuje rozdíl

⁵⁴ EoA – End of Authority

⁵⁵ DP – Danger Point

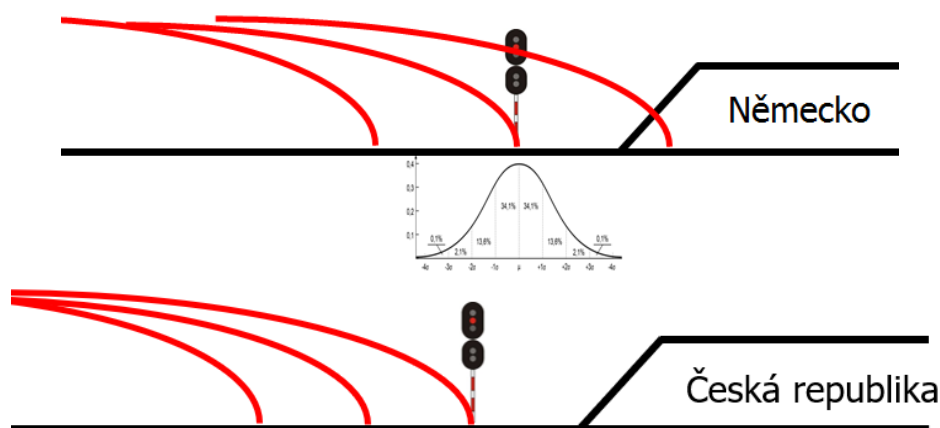
v kritické a nominální brzdě křivce v případě použití prokluzového úseku. Tento prokluzový úsek pak poskytuje prostor pro strojvedoucího, aby i při brzdění k EoA nepřekročil DP.



Obrázek 10 Pojistný (prokluzový) úsek

Zdroj: (12)

Z pohledu zastavení vozidla se jedná o proces, který lze vyjádřit pravděpodobností se střední hodnotou a směrodatnou odchylkou. Existuje tedy pravděpodobnost, že strojvedoucí nezastaví před EoA (špatný odhad, adhezní podmínky atp.), ale projede jím do prokluzového úseku. Úkolem výpočtu pravděpodobnosti je, aby byl systém nastaven tak, že s pravděpodobností 99,9999 % zastaví nejdále v místě DP. Princip prokluzových vzdáleností se však v ČR dosud neuplatňuje, proto musí být brzdě křivka nastavena tak, že s uvedenou pravděpodobností zastaví strojvedoucí vozidlo před návěstídem. Lépe je celá situace vidět na obrázku 11.



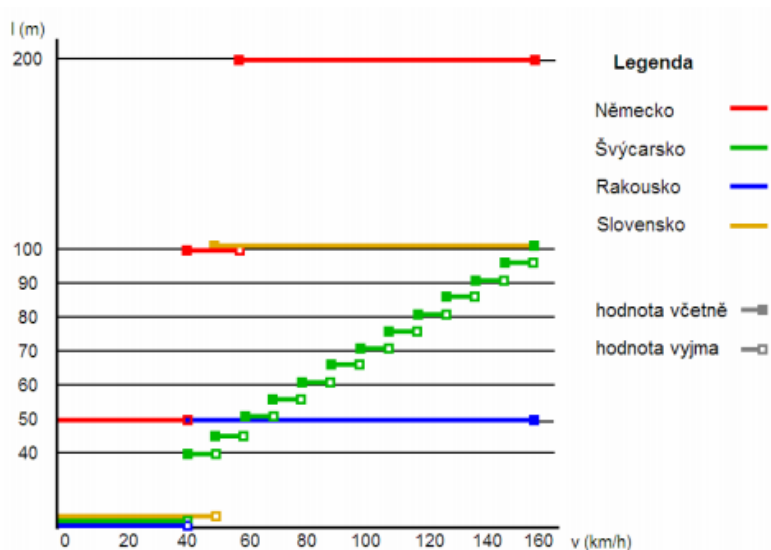
Obrázek 11 Vedení vlaku k návěstídlu v Německu a ČR

Zdroj: (42)

Zatímco vlak na německé infrastruktuře využívá k zastavení u návěstidla střední hodnotu intervalu, vlak na české infrastruktuře nesmí překročit návěstídlu svým maximálním bezpečným čelem. Dalšími důsledky tohoto faktu jsou zkrácení užitečné délky koleje, zastavení vlaku před koncem nástupiště, pokud toto končí u návěstidla, zastavení vlaku ve větší vzdálenosti před koncem kusé koleje nebo pomalé dojíždění vlaku ke konci nástupiště.

Pojem prokluzová vzdálenost nebo též pojistná vzdálenost či ochranná dráha má svůj původ v Německu, Rakousku či Švýcarsku jako součást jejich vlakového zabezpečovače

v interakci s traťovou částí zabezpečovacího zařízení. Její aplikaci lze vyjádřit funkcí, která je zobrazena na obrázku 11 pro různé země. Na příkladu Německa (červená funkce) je vidět, že traťové a staniční zabezpečovací zařízení rezervuje, tedy zabezpečuje či vylučuje pro jiný provoz také určitou vzdálenost za místem zastavení. Důvodem je právě pravděpodobnost, že vozidlo při svém nominálním brzdění nestihne zastavit včas a mine návěst zakazující jízdu. Z pohledu bezpečnosti však nemůže dojít k ohrožení bezpečnosti železniční dopravy, protože pro tyto případy kritického brzdění je vlaku rezervován ještě dostatečný úsek infrastruktury za místem zastavení. Jak vozidlo snižuje svou rychlost i tato rezervace pojistné vzdálenosti se zkracuje a uvolňují se části infrastruktury pro další provoz. To má významný vliv zejména při křižování či předjíždění vlaků. Z obrázku 12 je patrný i velmi rozdílný přístup k velikosti pojistné vzdálenosti v závislosti na rychlosti u různých manažerů infrastruktury. Velikost této prokluzové vzdálenosti je dána bezpečnostními výpočty statistického rozptylu a směrodatné odchylky brzdění a je zakotvena v předpisech provozovatele dráhy příslušného manažera infrastruktury. Kromě třech uvedených zemí disponuje touto pojistnou vzdáleností také Slovensko (žlutá čára), kde je to důsledek implementace ETCS L1. Více o této problematice pojednává literatura (44).



Obrázek 12 Matematické vyjádření pojistné vzdálenosti

Zdroj: (44)

Od roku 2018 se již tyto pojistné úseky implementují do připravovaných aplikací ETCS L2 v ČR, a to na úrovni stavědla. Z provozního hlediska to však negativně ovlivňuje propustnost, protože na současné infrastruktuře jsou omezeny možnosti současných vjezdů či předjíždění vlaků.

Dalším příkladem genetického vývoje specifikací ETCS může být v oblasti brzdných křivek ETCS kupříkladu přechod od neharmonizovaných brzdných křivek k harmonizovaným.

V první verzi specifikací, která se souhrnně pojmenovávala jako **Baseline 2** byl výpočet dohledových limitů⁵⁶ a brzdných křivek neharmonizovaný. Pravidla pro jejich výpočet byly stanoveny v ETCS Baseline 2 (SRS SUBSET 026 verze 2.3.0) a implementace jednotlivých algoritmů byla v režii každého dodavatele vozidlové části. Mohlo se tak stát, že parametrizace brzdných křivek nebyla pro příslušný typ vozidla kompatibilní na různých infrastrukturách. Manažeři infrastruktury neměli žádné nebo jen velmi malé, možnosti pro jejich změnu. To přinášelo řadu negativních efektů a potenciálních bezpečnostních rizik, protože přechodem z benevolentnější infrastruktury na přísnější mohlo dojít k ohrožení bezpečnosti železničního provozu. Doporučením proto bylo zadávat tyto limity a jejich parametry restriktivněji.

Geneze těchto specifikací v různých oblastech proto logicky vyústila ve vydání specifikací **ETCS Baseline 3**, kde došlo od verze 3.0.0 k harmonizaci brzdných křivek i dohledových limitů (45), (46). Jejich hlavním rysem byla jednoznačná algoritmicizace umožňující parametrizovat vozidlo při příjezdu na konkrétní železniční infrastrukturu, a to na základě dat ze stacionární části ETCS, které stanovuje manažer infrastruktury. Obecně se tím pro manažery infrastruktury otevřela možnost parametrizovat si brzdné křivky ETCS dle svých národních zvyklostí. Postupný přechod od vozidel vybavených mobilní částí dle Baseline 2 k Baseline 3 pak může tuto aktivitu podpořit a zvýšit tak výkonnost železničního systému. Otázka, která však bude muset být zodpovězena při každé změně parametru je, zda touto změnou nedojde ke snížení bezpečnosti. Ovšem podobnou otázku, zda jsou ty současné (defaultní) hodnoty jednotlivých parametrů dostatečně bezpečné, je možné si položit již nyní.

2.1.3 Dohled ETCS nad snížením rychlosti

V kapitole 2.1.2 byly analyzovány, základní principy brzdění vlaku pod dohledem ETCS a rozdílnosti oproti současným zvyklostem bez ETCS. Aby bylo možné předat odpovědnost za snížení rychlosti systému ETCS je nutné znát přesný matematicko-fyzikální popis chování všech vozidel vlaku. To může být zvláště u starších vozidel poměrně problematické, protože způsob zjišťování jejich brzdných vlastností byl poplatný době jejich uvedení do provozu. Ale pouze za těchto podmínek může bezpečnostně-kritický systém dohled vykonávat (47). Pro potřeby systému ETCS byly tyto podmínky definovány v Subsetu 026-3 (45), (46), a (48). S postupnou implementací ETCS na větším vzorku tratí dochází i v případě brzdného modelu k jeho úpravám, které zpřesňují chování modelu směrem k realitě. Každá další úprava však musí projít náročným schvalovacím procesem a průkazem bezpečnosti, tedy prokázat, že neovlivňuje schopnost systému pracovat spolehlivě a bezpečně.

⁵⁶ Tento výraz je užíván také pro „dohledové křivky“ či „kritické dohledové křivky“.

Jaké jsou tedy hlavní provozně negativní parametry, které ovlivňují činnost systému ETCS? Jedná se zejména o určení polohy vozidla. Oproti systémům CBTC, kde se aktualizace polohy děje ve velmi krátkých intervalech pomocí datové sítě, je zde aktualizace polohy vlaku zajištěna pouze pevně definovanými body na infrastruktuře. Tyto body se obecně nazývají balízové skupiny a jsou umístěny mezi kolejnicovými pásy. Každý z výrobců těchto zařízení má svou barvu či tvar, nicméně společnou mají funkční logiku uvnitř a elektromagnetickou kompatibilitu s okolním prostředím. Vlak projetím nad balízovou skupinou pomocí BTM⁵⁷ modulu indukuje proud a balízová skupina tak předá vlaku informace, které obsahuje. Balízové skupiny se rozlišují na nepřepínatelné⁵⁸ a přepínatelné⁵⁹. **Nepřepínatelná balízová skupina** zpravidla obsahuje informaci o své poloze a národní identifikátory balízové skupiny. **Přepínatelná balízová skupina** je napojena na LEU⁶⁰ a pomocí něj se na vlak dostává informace o návěstním znaku (omezení rychlosti). Zařízení LEU tak funguje jako překladač mezi národním zabezpečovacím zařízením a ETCS.

Provozně negativním vlivem určení přesnosti polohy vlaku se zabývala literatura (12). Zde byly ilustrovány rozdíly mezi nominálním brzděním, tedy tím, které je aplikováno na české železniční infrastrukturu nevybavené ETCS a mezi kritickými brzdnými křivkami, které musí dodržovat princip nejméně příznivého stavu (worst case). Nepřesnost určení polohy se může projevat dvěma způsoby. Ten první se v procesu dohledu nad snížením rychlosti vlaku velkou měrou neprojevuje. Je to přesnost zaměření jednotlivých částí v kolejišti⁶¹. Mnohem zásadnější je dynamická nepřesnost, která se mění s ujetou vzdáleností od tak zvané polohové reference. To je poslední známá poloha vozidla, která se odvíjí od LRBG⁶². Odchylka aktuální a plánované polohy vlaku se označuje jako chyba **odometrie**. Velikost této chyby je dána Subsetem 041 (45), (46) a (48) a činí $\pm (5 \text{ metrů} + 5 \% \text{ ze vzdálenosti od LRBG})$. Absolutní velikost takového intervalu pak může být $10 \text{ metrů} + 10 \% \text{ ze vzdálenosti ujeté od LRBG}$. O tuto vzdálenost může být tedy čelo vlaku uvažováno blíže k místu zastavení nebo k rychlostnímu omezení, než je doopravdy. Přesnost určení polohy vlaku, nebo chyba odometrie tak hraje důležitou roli zejména při dojíždění na kolej o užitečné délce, která se blíží délce vlaku. Její působení lze zmírnit instalací dodatečných či vložených balízových skupin. Vlak po projetí kolem takové balízové skupiny aktualizuje svou polohu a zmenší tak chybu odometrie.

⁵⁷ BTM – Balise Transmission Module

⁵⁸ Fixed Data Balise nebo Fixed Balise

⁵⁹ Transparent Data Balise, Switchable nebo Controllable Balise

⁶⁰ LEU – Lineside Electronics Unit

⁶¹ Ve stacionární části se to projevuje jako proměnná Q_LOCAC

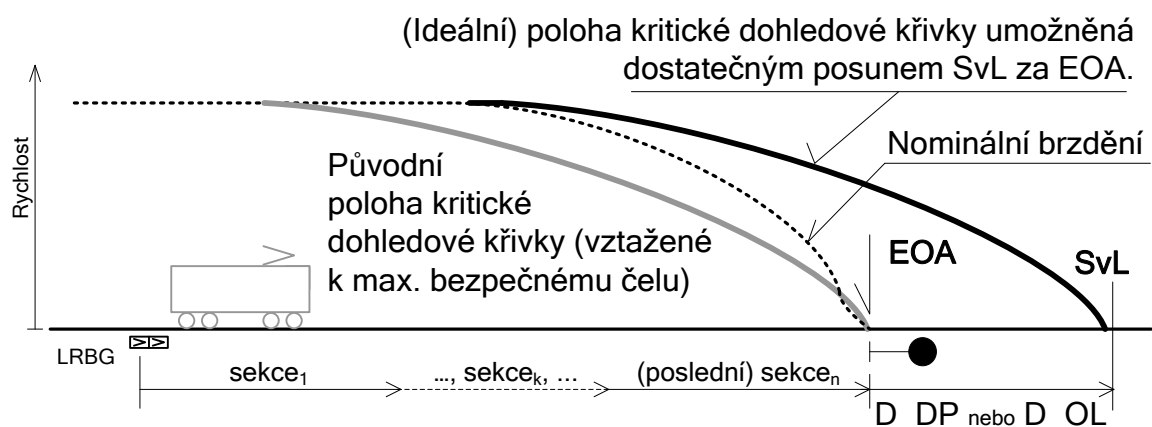
⁶² LRBG – Last Relevant Balise Group

Nevýhodou tohoto opatření je, že zvyšuje finanční náklady na systém a není aplikovatelné násobně, tedy nelze umisťovat balízy na všechny staniční koleje po 50 či 100 metrech.

2.1.4 Datová struktura informací pro dohled nad snížením rychlosti

Z pohledu datové informace a její struktury je základem pro dohled nad vozidlem MA. Tu v případě ETCS L2 vytváří jeho stacionární část, tedy radiobloková centrála (RBC)⁶³. Zásadní roli má pak MA v případě, že má vozidlo zastavit. Stejně jako ostatní části systému ETCS je i tato datová struktura popsána v Subsetu 026. Konkrétně pro MA jsou nejvíce relevantní části 3, 7 a 8. Detailně pak o nich píše literatura (45), (46) a (48).

Každé MA začíná u BG, která je v MA přímo definovaná (identifikovaná). Její konec pak označuje jako konec oprávnění k jízdě (EoA)⁶⁴. Tento bod je možné považovat za permissivní stůj, tedy je možné jej za určitých okolností či splněných podmínek překročit. Nejzazší místo, které můžeme považovat za absolutní stůj, se označuje jako hranice dohledu (SvL)⁶⁵. Polohy těchto bodů mohou, ale nemusí ležet na stejném místě. Pokud se jedná o dva rozdílné body, pak EoA leží vždy blíže k začátku MA než SvL. Posunutí SvL za EoA je umožněno pomocí bodu ohrožení (DP) nebo prokluzového úseku (OL)⁶⁶. Některé brzděné křivky se pak pro maximální čelo vlaku vypočítávají k SvL, což může pomoci s řešením některých provozně kritických situací. Graficky je to znázorněno na obrázku 13.



Obrázek 13 Brzděné křivky dohlížené k SvL a EoA

Zdroj: (44)

Z obrázku 13 je také vidět, že MA je možné rozdělit do několika úseků (sekcí). Tyto sekce mohou odpovídat kolejovým obvodům nebo mohou být tvořeny definovanými BG nad rámec současných prostorových oddílů či kolejových obvodů ve stanicích. Z pohledu dohledu

⁶³ RBC – Radio Block Centre

⁶⁴ EoA – End of Authority

⁶⁵ SvL – Supervised Location

⁶⁶ OL – Overlap distance

nad snížením rychlosti je krucální poslední úsek⁶⁷. Každé MA musí obsahovat alespoň jeden poslední úsek a každý úsek může mít pro potřeby MA definované určité parametry jako je délka sekce, doba platnosti MA nebo místo ukončení měření doby platnosti sekce (49), (50).

Zvláštní postavení pak má poslední úsek, který má větší počet volitelných parametrů. Mezi ty, jež mohou pomocí ETCS ovlivnit či lépe řečeno zmírnit dopady na propustnost infrastruktury, se řadí:

- Konkrétní místo (poloha) bodu ohrožení za EoA (označení D_DP),
- délka pojistného (prokluzového) úseku (označení D_OL),
- časovač D_OL, který určuje jeho platnost v závislosti na dalších MA či situaci na infrastruktuře,
- místo (před EoA), ve kterém dojde ke spuštění časovače platnosti D_OL,
- uvolňovací rychlost⁶⁸, která je vždy vztažena k určitému DP,
- uvolňovací rychlost, která je vztažena k D_OL.

Společným jmenovatelem užití D_OL i DP je užití **uvolňovací rychlosti**. Tato umožňuje pohyb vozidla, lépe řečeno konfidenčního intervalu jeho čela v intervalu maximálního čela do polohy SvL a minimálního čela do polohy EoA. Jedná se tedy o cílený pohyb vozidla za EoA. V případě překročení tohoto intervalu je aktivována nouzová brzda. Proces stanovení uvolňovací rychlosti může probíhat pomocí dvou algoritmů:

- uvolňovací rychlost je zadána ze stacionární části. To se děje v intencích národních hodnot (dále jen NV⁶⁹) nebo specificky pro každé MA. Velikost této uvolňovací rychlosti pak musí být volena tak, aby nebyla překročena míra rizika, které je ještě přijatelné, aby se maximální bezpečné čelo dostalo za SvL,
- druhý způsob je čistě matematický, tedy z pohledu bezpečnosti důvěryhodnější. Uvolňovací rychlost je vypočtena na základě předpokladu, který je uveden také v předchozím odstavci. Tedy že v případě, že minimální bezpečné čelo mine EoA, dokáže nouzová brzda zastavit vlak dříve, než maximální bezpečné čelo vlaku mine SvL.

Z pohledu bezpečnosti je tedy zřejmé, že druhý způsob určení uvolňovací rychlosti přináší menší riziko ohrožení bezpečnosti. Stále však platí, že tyto parametry jsou použitelné pouze v případě, že to konfigurace stávající infrastruktury umožňuje. Na novostavbách je

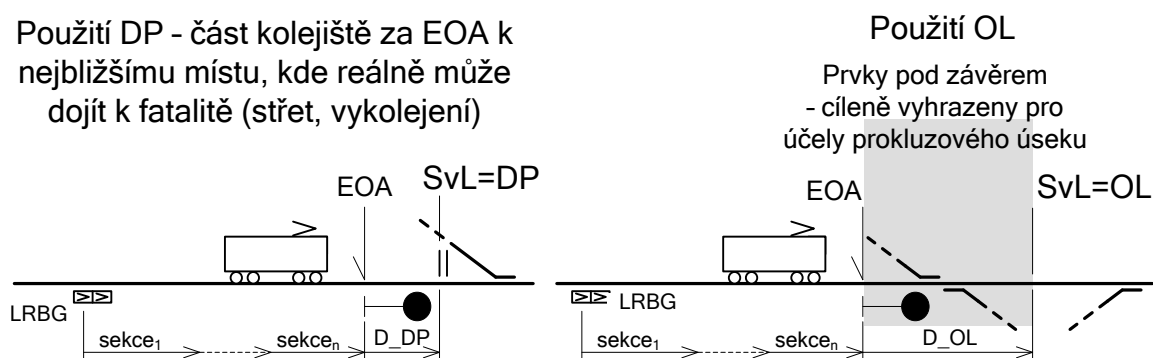
⁶⁷ Last section

⁶⁸ Release speed

⁶⁹ NV – National Values

možné všechny parametry infrastruktury nastavit v souladu s politikou implementace ETCS v dané zemi.

Další důležitý rozdíl mezi použitím DP a D_OL tkví v tom, že D_OL disponuje časovačem. Tento časovač se spustí ve chvíli, kdy maximální čelo mine polohu časovače a po jeho uplynutí je poloha SvL přesunuta do polohy EoA (případě DP). Použití DP tento časový parametr neobsahuje. To předurčuje jejich praktické využití. Zatímco DP je používán v případě, kdy se za EoA nachází místo, které je reálným zdrojem mimořádné události, například je zde postavena jiná vlaková cesta. Pokud je tedy EoA v místě odjezdového návěstidla, pak je DP umisťován do polohy námezničku výhybky přilehlé k tomuto návěstidlu. Naproti tomu D_OL se užije v případě, kdy toto ohrožení bezprostředně nehrozí a infrastruktura za EoA je volná, nicméně obsahuje prvky, které jsou z bezpečnostního hlediska relevantní. Prokluz za EoA tak nemůže způsobit reálné ohrožení jízdy jiného vlaku, posunového dílu či cestujících. Celá situace je uvedena na obrázku 14.



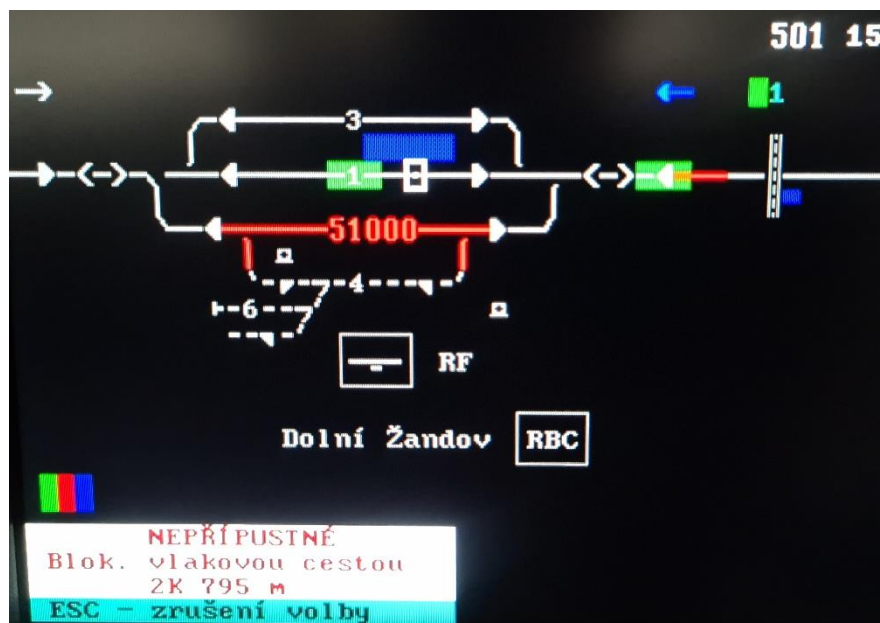
Obrázek 14 Použití danger point (vlevo) a pojistného úseku (vpravo)

Zdroj: (44)

Pokud je aktivován pojistný úsek, pak již není možné tuto rezervovanou část infrastruktury využít pro jízdu jiného vlaku. Tato vlastnost ETCS vyžaduje novou zkušenost a předvídatost také pro zaměstnance řízení provozu. Zejména při dálkovém řízení dopravy je velmi důležité se sžít s těmito DP a pojistnými úseky, protože může dojít k vyloučení některých protisměrných cest. Tento efekt se však dá pozorovat již na současné infrastruktuře při použití vlakových cest s omezením (dále jen VCO). Správné nastavení NV ETCS je tak významným prvkem v udržení současné propustnosti české železniční infrastruktury.

Autor na Dopravní fakultě Jana Pernera, Univerzity Pardubice (dále jen DFJP UPa) společně se svými kolegy v roce 2021 připravil a realizoval projekt, pomocí kterého se podařilo zřídit na katedře Technologie a řízení dopravy cvičný sál Centrálního dispečerského pracoviště (dále jen CDP Pardubice). Toto v ČR unikátní pracoviště umožňuje studentům seznámit se

s prací úsekových a traťových dispečerů. Součástí CDP Pardubice jsou také další provozní aplikace jako graficko-technologická nástavba (GTN) nebo automatické stavění vlakových cest (ASVC). Ze zkušeností z výuky studentů na DFJP UPa v CDP Pardubice vyplývá, že studenti mají v prvních hodinách velké potíže se znalostí VCO, což se dá připodobnit k pojistným úsekům. Ilustrační fotografie užití VCO z CDP Pardubice je na obrázku 15. Studenti se tak již během výuky mohou seznamovat s principy pojistných úseků, což jim poskytuje výhodu v následné praxi.



Obrázek 15 Nemožnost postavení vlakové cesty z důvodu boční ochrany

Zdroj: foto autor v cvičeném sále CDP Pardubice

Z obrázku 12 (na straně 39) je vidět přístup různých manažerů infrastruktury ke stanovení tohoto pojistného úseku. Na konferenci v Olomouci⁷⁰ byl však v roce 2021 představen nový přístup ÖBB k problematice pojistných vzdáleností. Bylo diskutováno využití kaskádovité uvolňovací rychlosti, která pomocí SW řešení snižuje velikost uvolňovací rychlosti v závislosti na aktuální rychlosti vozidla a tím také zkracuje délku pojistného úseku. Toto řešení může mít výrazně pozitivní vliv na propustnosti zhlaví na odjezdové straně (51) a zároveň snížit bezpečnostní riziko z užití uvolňovací rychlosti, která opět předává část odpovědnosti ze systému ETCS na strojvedoucího.

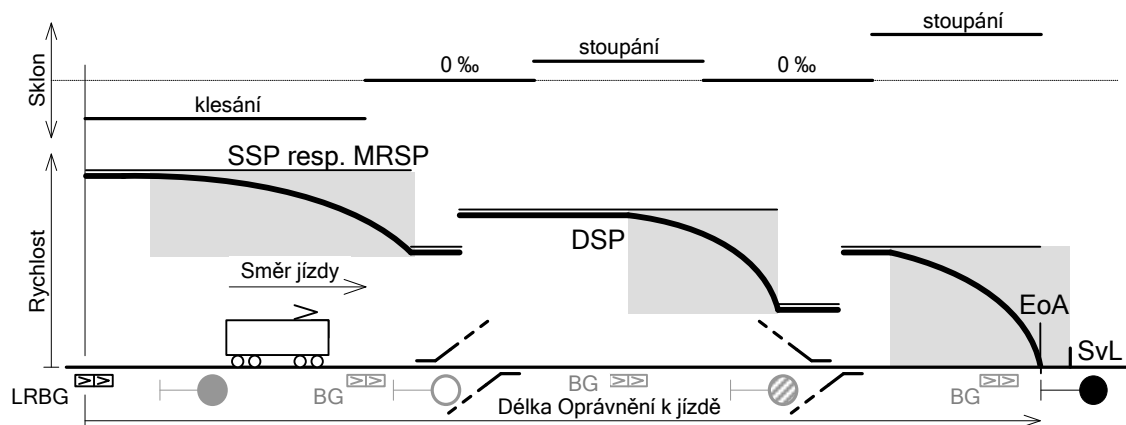
Dalším významným vstupem pro výpočet dohledových limitů jsou NV. Tento soubor hodnot je uveden v příloze Subsetu 026-3 a uvádí rozmezí konkrétních proměnných, které může každý manažer infrastruktury nastavit podle svého. Také tyto hodnoty mohou přispět k úpravě brzdných křivek ETCS. Je ovšem nutné poznamenat, že jakákoliv úprava NV směrem

⁷⁰Konference sdělovací a zabezpečovací techniky, 4.–6. října 2021, Clarion Congress Hotel, Olomouc

k rozvolnění dohledu může být zároveň chápána jako bezpečnostní riziko a schvalovací orgán, kterým je Posuzovatel bezpečnosti⁷¹ může požadovat průkaz, že daná úprava neznamená systémové bezpečnostní riziko. Je třeba poznamenat, že samotné defaultní hodnoty NV tímto průkazem bezpečnosti neprošly, resp. spoléhá se na jejich obecnou platnost. Změna NV může ovlivnit tvar dohledových křivek, což může ve svém důsledku také působit pozitivně na provozní charakteristiky celého systému (52).

2.1.5 Dílčí závěr

Problematika nastavení brzdných křivek ETCS L2 je velmi složitá, i když značná část je matematicky daná a tedy zobecnitelná. Dohled nad vozidlem je ve své podstatě řešen pomocí oprávnění k jízdě (MA), které je předáno mobilní části ETCS. Toto MA je tvořeno mnoha packety včetně délky oprávnění k jízdě, uvolňovací rychlosti, statický rychlostní profil (SSP)⁷² včetně lokálních (časově i místně) omezení a sklonové poměry (24). Všechny tyto informace jsou vztaženy k balizovým skupinám (BG)⁷³ a pomocí všech relevantních rychlostních profilů (49) je vytvořen nejvíce omezující rychlostní profil (MRSP)⁷⁴, což ilustruje obrázek 16.



Obrázek 16 Rychlostní profily ETCS

Zdroj: (53)

Výsledný rychlostní profil MRSP, sklonové poměry a také parametry vlaku jsou vstupními proměnnými pro mobilní část ETCS do výpočtu dynamického rychlostního profilu (DSP)⁷⁵. Mobilní část pak na základě DSP dohlíží na jízdu vlaku a vypočítává si brzdné křivky, resp. dohledové limity pro každou změnu rychlosti směrem dolů (oblast dohledových limitů je

⁷¹ AsBo – Assessment Body – posuzovatel bezpečnosti dle nařízení 402/2013/EU

⁷² SSP – Static Speed Profile

⁷³ BG – Balise Group

⁷⁴ MRSP – Most Restrictive Speed Profile

⁷⁵ DSP – Dynamic Speed Profile

na obrázku 13 vyznačena šedou barvou). O těchto křivkách pojednává kapitola 2.2 habilitační práce.

2.2 Možnosti úpravy brzdné křivky

Z kapitoly 2.1 vyplynulo že aby nedošlo k narušení bezpečnosti a ETCS mělo plnou odpovědnost za nížení rychlosti či zastavení vlaku, bude nutné přijmout fakt, že kritická křivka brzdění bude vždy přísnější než křivka nominální, tedy za normálního běžného stavu (brzd, kolejnic atp.). A tato kritická křivka bude tím přísnější, čím méně budou stálé (predikovatelné) vstupní hodnoty (stav brzd, adheze, povětrnostní vlivy, ...). Proto je také nejvíce úspěšných aplikací GoA 4 zatím v oblasti drah speciálních, kde je možné stálost těchto podmínek zajistit. Graficky je to vidět na obrázku 17.



Obrázek 17 Srovnání nominálního a kritického brzdění

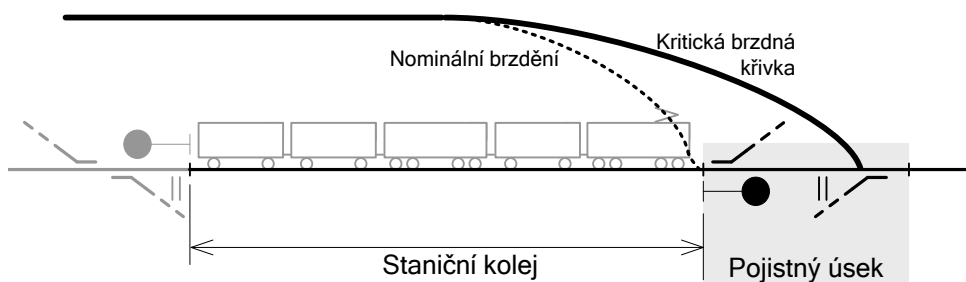
Zdroj: (30)

Z toho také vyplývá, že po zavedení ETCS dojde k negativnímu ovlivnění výkonnostních parametrů železničního systému. Doposud není znám případ aplikace takového systému, který by nesnížil výkonnost železničního provozu. Obecně (historicky) byl totiž železniční systém dimenzován na nominální stav, nikoliv na kritický. Řešení této situace je několik:

- Začít dimenzovat železniční provoz na kritický stav. To je možné u nově budované infrastruktury, kdy budou délky staničních kolejí prodlužovány na délku potřebnou pro tento kritický přístup. Tento způsob však přichází v úvahu pouze u novostaveb a rekonstrukcí většího rozsahu, kdy se podstatně mění i topologie kolejiště. Evidentní jsou větší nároky na dostupný prostor na úkor jeho jiného využití. U současné infrastruktury je to možné také, a to zřizováním OL (obrázek 18) nebo umělým zkrácením užitečné délky koleje (obrázek 19). V případech, kdy je délka staniční koleje větší o 50 a více metrů než nejdelší soupravy, je pak provozní dopad kritických dohledových křivek na vyklizení zadního zhlaví a na využití délky staniční koleje minimální výrazně menší (53).
- Snižit nároky na systém ETCS a odklonit se od principu úplné kontroly rychlosti. To je realizováno pomocí uvolňovací rychlosti, pod níž již nedochází k dohledu aktuální

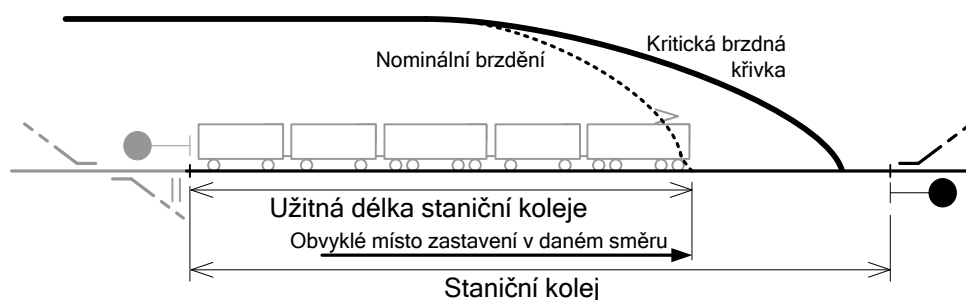
rychlosti a je dohlížena pouze poloha minimálního a maximálního čela vlaku (54). Odpovědnost je tak přenesena opět na obsluhu vozidla (obrázek 20).

- Třetí možností je kombinace obou přístupů.
- Zcela zvláštní možností, která se nicméně také uplatňuje na evropské úrovni, je změna specifikací, která probíhá podle tzv. požadavku na změnu⁷⁶. Tyto požadavky jsou řešeny na úrovni pracovních skupin UNISIG⁷⁷ či EUG⁷⁸. Samotná ERA pak tento proces zastřešuje a v případě schválení implementuje do specifikací.



Obrázek 18 Pojistný úsek

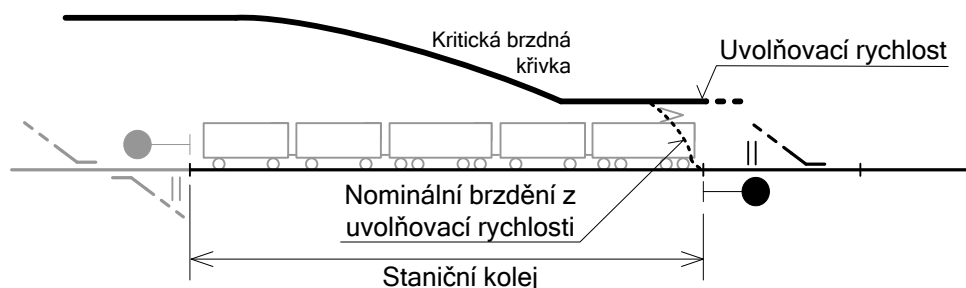
Zdroj: (30)



Obrázek 19 Umělé zkrácení užitečné délky koleje

Zdroj: (30)

Nutno poznamenat, že použití těchto opatření je plně v kompetenci manažera infrastruktury a liší se v různých zemích, či dokonce na různých projektech v rámci jedné země.



Obrázek 20 Princip užití uvolňovací rychlosti

Zdroj: (30)

⁷⁶ CRs – Change requests

⁷⁷ UNISIG – Union Industry of Signalling

⁷⁸ EUG – ERTMS Users Group

Jako zcela zásadní se možnost využití uvolňovací rychlosti jeví u bodových vlakových zabezpečovačů (např. ETCS L1), kde je komunikace mezi vozidlovou a traťovou částí omezena pouze na vybraná místa sítě. Toto je umožněno pomocí RIU⁷⁹.

2.3 Výpočet brzdné křivky

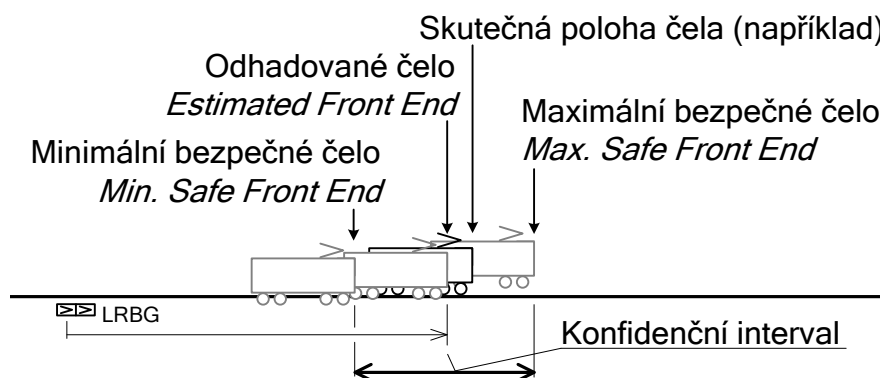
Výpočet brzdné křivky ETCS se v podmínkách Baseline 3 řídí velmi precizním matematickým aparátem, obsaženým v Subsetu 026-3. Myšlenky vyjádřené v tomto Subsetu vychází z kodexu UIC 544-1 a také z předchozích výzkumů (55), které byly založeny na brzdných zkouškách německého výzkumného ústavu v Mindenu. Při samotném výpočtu brzdných křivek jsou nejdůležitějšími parametry délka vlaku, brzdící procento, maximální rychlost a režim brzdění. Z těchto hodnot je vypočteno odrychlení vlaku v závislosti na jeho rychlosti. K určité simulaci nebo spíše vizualizaci tohoto postupu vznikl také nástroj, který je popsán v literatuře (47), (56) a (57). Zde je možné po zadání základních charakteristik vlaku vypočítat brzdnou dráhu a odrychlení v každém okamžiku brzdění. Pro větší přesnost je také možné zadat údaje o dopravní infrastruktuře (sklonové poměry, prokluz, místa bez trakce, snížená adheze, aj.). Dále je možné zadat polohy balíz ETCS pro přesnost odometrie. Výsledkem je vygenerovaná brzdná křivka a řada dalších pomocných křivek, které slouží k lepší orientaci strojvedoucího. Samotné dohlížení zastavení nebo snižování rychlosti zásadně souvisí s přesností, s jakou jsme schopni určit přesnou polohu vozidla na infrastruktuře, protože právě tato poloha je porovnávána s místem omezení rychlosti, místem zastavení apod. Přesnost pak závisí na následujících faktorech a jejich kombinaci:

- Místem, kde dochází k **odečtení přesné polohy vozidla**, jsou průjezdy kolem balízových skupin⁸⁰. Od tohoto místa dochází k tvorbě chyby v určení polohy vozidla, která se označuje jako chyba odometrie a její velikost je dána jako $\pm (5 \text{ metrů} + 5 \%)$ vzdálenosti od LRBG. Tím vzniká u každého vlaku tzv. maximální čelo a minimální čelo. Toto je znázorněno na obrázku 18. U delších úseků bez balízy může tato chyba odometrie nabývat hodnoty až desítek metrů (1 000 metrů odpovídá minimálnímu čelu ve vzdálenosti 945 metrů a maximálnímu 1 055 metrů. Konfidenční interval tak je 110 metrů. Tato vlastnost systému souvisí také s obrázkem 18, protože všechny kritické křivky jsou dohlíženy k maximálnímu čelu vlaku. Vlak se však dle obrázku 21 může nacházet také v poloze minimálního čela. Celý interval tak může být v neprospěch

⁷⁹ RIU – Radio in-fill unit

⁸⁰ BG – balise group

provozních vlastností železničního systému. Částečně lze tento nedostatek vyřešit pomocí násobné balízové skupiny⁸¹, která v průběhu snižování rychlosti vlaku aktualizuje informaci o poloze vlaku a zmenší tím konfidenční interval. Toto řešení však není uplatnitelné obecně, protože vlaky s různou vstupní rychlostí by potřebovaly umístit tuto aktualizaci balízu na různých místech.



Obrázek 21 Chyba odometrie

Zdroj: (30)

Na vědecké úrovni se tomuto tématu věnuje literatura (35), která se dívá na problematiku určení polohy vlaku v podmínkách polské železnice, kde by mělo ETCS nahradit národní zabezpečovač SHP⁸². Relativní podobnost polských podmínek poskytuje možnost využití tohoto výzkumu také v podmínkách ČR. Nicméně zde jsou násobné balízy spíše nástrojem zvýšení kapacity a snížení následného mezidobí. Zvýšení přesnosti určení polohy je tak spíše průvodním jevem.

- Menším, ale nezanedbatelným faktorem může být také **přesnost detekce referenční balízy**, která v sobě skrývá informaci o konkrétní poloze místa na trati. To ale nepředstavuje oproti předchozí odrážce zásadní riziko či omezení.
- **Přesnost zaměření balízové skupiny** v kolejišti souvisí s určením přesné polohy místa na trati v porovnání s reálnou polohou. Zde již ale moderní prostředky umožňují toto zaměření s vysokou přesností. Tento problém pak může mít také vliv na určení vzájemné polohy míst v kolejišti.

Při výpočtu brzdných křivek se užívají dvě základní brzdné křivky – provozní a nouzová. Tyto křivky jsou označovány jako SBD⁸³ a EBD⁸⁴. Křivka SBD se vygeneruje v případě, že NV v dané zemi umožňují ETCS zasáhnout do provozního brzdění. V opačném případě se generuje pouze EBD. Obě křivky se od sebe liší použitou velikostí odrychlení,

⁸¹ tento systém se již v praxi osvědčil

⁸² SHP – Samoczynne hamowanie pociągu - Automatic Train Braking System

⁸³ SBD – Service brake deceleration – křivka provozního brzdění

⁸⁴ EBD – Emergency brake deceleration – křivka nouzového brzdění

protože zatímco u EBD je použita hodnota (λ_0) na základě skutečných brzdících procent (λ), kde, $\lambda_0 = \lambda$, tak pro SBD se použije hodnota $\lambda_0 = \min(\lambda; 135)$. To je z důvodu snížení brzdného účinku pro dobře brzděné vlaky při provozním brzdění. U vlaků do 135 brzdících procent jsou obě křivky totožné, u vlaků nad 135 brzdících procent se použije pro EBD hodnota λ a pro SBD hodnota 135 %. Výsledná funkce brzdného odrychlení je dána vztahem 3 a zobrazena na obrázku 22. Konkrétní hodnoty koeficientů a_{mn} jsou uvedeny v literatuře (41).

$$a_d = a_{3n} \cdot \lambda^3 + a_{2n} \cdot \lambda^2 + a_{1n} \cdot \lambda + a_{0n} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3)$$

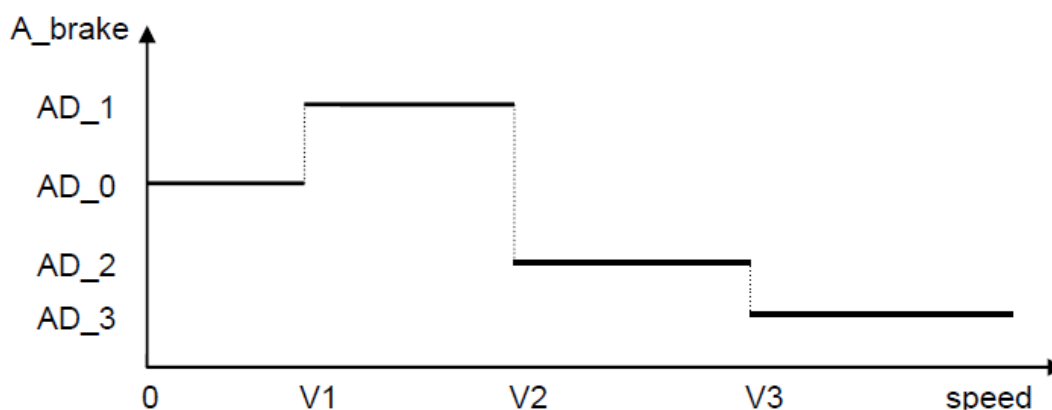
Kde:

a_d výsledná hodnota odrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

$a_{1n}, a_{2n}, a_{3n}, a_{0n}$ koeficienty odrychlení dle literatury (41) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

λ brzdící procento [%].

Hodnota a_d se dle vztahu 1 vypočítá zvlášť pro každý interval definovaný v Subsetu 026-3. Jako mezní hodnoty intervalu jsou rychlosti 100, 120, 150 a 180 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.



Obrázek 22 Obecná funkce odrychlení

Zdroj: (41)

Kromě uvedených intervalů se v prvním kroku vypočítá V_{lim} , což je hodnota rychlosti v intervalu $(0; V_{lim})$, kde je hodnota odrychlení konstantní a vypočítá se dle vztahu 4.

$$a_0 = 0,0075 \cdot \lambda_0 + 0,076 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (4)$$

Kde:

a_0 odrychlení pro V_{lim} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

λ_0 brzdící procento stanovené jako $\min(\lambda; 135)$ [%].

Všechny intervaly, které jsou menší nebo rovny V_{lim} se nepoužijí. Z takto vypočítaných hodnot odrychlení pak vznikne výsledná funkce, která popisuje závislost rychlosti na vzdálenosti od EoA či SvL⁸⁵. Takto lze poměrně rychle vypočítat brzdnou křivku každého potenciálního vlaku. Výhodou tohoto výpočtu je, že se dá poměrně dobře a snadno simulovat

⁸⁵ SvL – Supervision Limit – hranice dohledu

v různých softwarových produktech. Lze také úspěšně porovnávat nominální brzdění reálných strojvedoucích a brzděné křivky ETCS, která bude po přechodu na výhradní provoz dohlížet na strojvedoucího. Z praktických zkoušek se zatím jeví, že reálný strojvedoucí brzdí intenzivněji, tedy že dosáhne zastavení vlaku na kratší dráze, než očekává brzdný model. To může v praxi znamenat prodloužení jízdních dob. Na druhou stranu zavedení ETCS má především bezpečnostní aspekt, a tak je možné, že zvýšení bezpečnosti bude mít za následek zhoršení provozních vlastností systému. Na tomto místě je vhodné připomenout definici z literatury (12), kde je uvedeno, že *z principu je smyslem zabezpečovacích systémů obecně omezovat chování, resp. povely obsluhy na takovou jejich podmnožinu a sekvenci, která je v aktuálním provozním kontextu přípustná, tj. nepředstavuje přímé ohrožení bezpečnosti. Z tohoto pohledu je zcela přirozené, že zavedení dohledových funkcí technickým zařízením může vést k omezení provozní flexibility, pokud tato doposud závisela čistě jen na (byla dosažena díky) šikovnosti, zručnosti a zodpovědnosti obsluhujícího zaměstnance.*

V červnu 2021 byla situace okolo SBD a EBD taková, že zatímco u první trati Břeclav – Kolín bylo použití provozního brzdění povoleno, u dalších projektů s ní nebylo počítáno. Finální rozhodnutí v roce 2022 však bylo takové, že ETCS má dovoleno intervenovat také provozní brzdou. Harmonizace těchto podmínek je pro správné nastavení systému klíčová. Zákaz užívat provozní brzdu je spojen především s důvody, které jsou součástí této kapitoly, tedy zhoršení provozních vlastností železničního systému. Každopádně opět je to kombinace pohledu provozního a bezpečnostního, protože jak je uvedeno v literatuře (12): *„V případě vlakových zabezpečovačů – konkrétně vlakových zabezpečovačů s úplnou kontrolou rychlosti, je v jejich plné zodpovědnosti snížení rychlosti, resp. zastavení před definovaným místem. Musí být tedy schopny sledovat a vynutit včasné odrychlení vozidla (soupravy, jednotky), tak aby v daném místě vozidlo nepřekračovalo mezní rychlost, resp. aby nejpozději v daném místě zastavilo. Na základě dostupných informací, kterými vlakový zabezpečovač jak v „online“ (aktuální provozní a technická data) tak v „offline“ (konfigurační parametry) podobě disponuje, musí být k dohlížení odrychlení vozidla z hlediska Fail-safe principů uvažovány nejméně příznivé podmínky (pravidlo „worst case“). Tedy, pokud nějakou informací ovlivňující brzdění vozidla vlakový zabezpečovač nedisponuje vůbec, nebo jí disponuje jen s omezenou přesností, musí předpokládat, nejen že její charakter, resp. skutečná hodnota nebude lepší, ale ani že nebude průměrná, tedy musí předpokládat, že bude horší, tzn., že brzdný účinek, obecně odrychlení, bude nižší, resp. že celková dráha na snížení rychlosti bude delší. Exaktně vzato lze toto demonstrovat skrze rozdělení pravděpodobnosti, s nějakou jeho střední hodnotou (tedy průměrem) a dalšími určujícími parametry, kdy střední hodnota není rozhodně korektním*

reprezentantem hodnoty parametru z hlediska bezpečnosti, přičemž volba „dostatečně bezpečné“ odchylky od střední hodnoty závisí na míře ještě akceptovatelného rizika, že brzdná dráha bude (může být – tedy s nějakou četností bude) delší a o kolik“.

Kromě dvou základních brzdnic křivek SBD a EBD jsou součástí konverzního modelu také další „odvozené“ křivky, které jsou založeny na těch základních a přidávají k nim vždy nějakou rezervu. První odvozené křivky, které je dobré zmínit, jsou křivky vyznačující místo, kde dochází k inicializaci provozní či nouzové brzdy. Jsou to tedy křivky intervenční a označují se SBI⁸⁶ a EBI⁸⁷. Jedná se tedy o okamžik, ve kterém dojde k aktivaci příslušné brzdy a tato křivka je přesazena oproti SBD či EBD o náběh příslušné brzdy.

Křivka EBI je přesazena před EBD o hodnotu D_{bec} , která označuje dráhu, kterou vozidlo ujede při vypínání trakce hnacích vozidel a náběhu nouzové brzdy. Je tak opět použit princip „worst case“, kde je předpokládáno, že strojvedoucí ve chvíli dosažení EBI najede na plný výkon. Doba náběhu nouzové brzdy je opět vypočtena podle kvadratické funkce ze vztahu 5.

$$T_{eb} = a + b \cdot \frac{L}{100} + c \cdot \left(\frac{L}{100}\right)^2 \quad [s] \quad (5)$$

Kde:

a, b, ckonstanty dle Subsetu 026-3, které jsou závislé na druhu vlaku, délce a způsobu brzdění [-],

L.....délka vlaku stanovená jako $\max(L; 400)$ [m].

Pro běžný vlak osobní dopravy je možné vztah 5 vyjádřit jako vztah 5-1.

$$T_{eb} = 2,3 + 0 \cdot \frac{L}{100} + 0,17 \cdot \left(\frac{L}{100}\right)^2 = 2,3 + 0,17 \cdot \left(\frac{L}{100}\right)^2 \quad [s] \quad (5-1)$$

Z legendy vztahu 5 vyplývá další omezení výpočtu T_{eb} , a to, že pro všechny vlaky do 400 metrů se uvažuje hodnota délky jako by měly právě 400 metrů. Lze tedy říci, že pro všechny vlaky osobní dopravy bude hodnota T_{eb} rovna 5,02 sekund, což se při $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ rovná 167 metrům. Posledním korekčním faktorem při výpočtu času potřebného na náběh brzdy je ten, který pro vlaky, které nebrzdí do cílové rychlosti $0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ prodlužuje čas T_{eb} o 1,16 u nákladních vlaků v režimu G a o 1,20 u osobních vlaků a nákladních vlaků v režimu P. Výsledná délka náběhu brzdy je tak pro vlaky osobní dopravy 6,024 sekundy. To odpovídá při rychlosti $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ délce 200 metrů.

Křivka SBI má dvě varianty, které jsou označovány jako SBI1 a SBI2. Každá z nich vychází z jiné křivky a to tak, že SBI1 je vypočtena z SBD a SBI2 z EBI. Rozdíl je roven dráze,

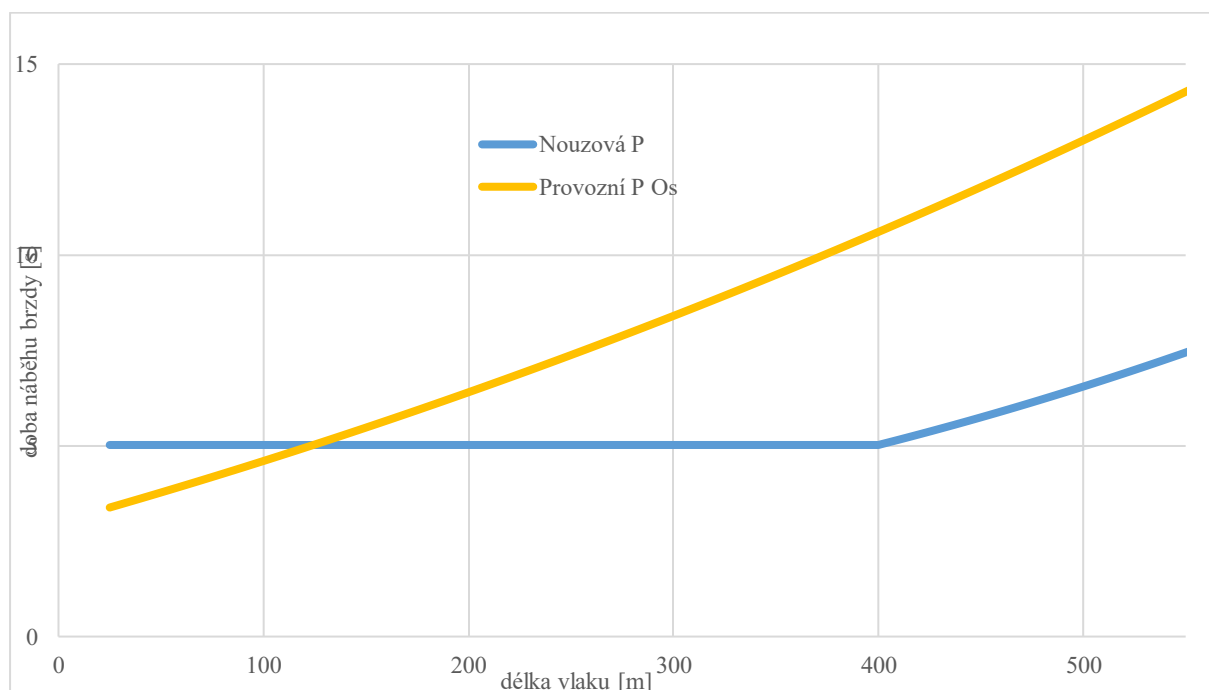
⁸⁶ SBI – Service Brake Intervention

⁸⁷ EBI – Emergency Brake Intervention

kteřou vlak urazí při náběhu brzdy, tedy na podkladě vztahu 5, je pro náběh provozní brzdy osobního vlaku užit vztah 6.

$$T_{sb} = 3,00 + 1,5 \cdot \frac{L}{100} + 0,10 \cdot \left(\frac{L}{100}\right)^2 \quad [\text{s}] \quad (6)$$

U výpočtu dle vztahu 6 ovšem neplatí omezení jako v předchozím případě ohledně délky vlaku a tato hodnota se počítá pro každou délku vlaku. Na obrázku 23 je tento problém dobře patrný. **Oranžová čára** je náběh provozní brzdy, **modrá čára** pak brzdy nouzové. U vlaků do 124 metrů délky tak pro výpočet brzdných křivek nabíhá provozní brzda rychleji než nouzová. I zde je při brzdění do nenulové rychlosti použit korekční faktor jako v případě EBI.



Obrázek 23 Doba náběhu brzdy v závislosti na délce vlaku

Zdroj: autor

Posledním specifickým případem je stav, kdy má OBU od provozní brzdy zpětnou vazbu o tom, v jakém se nachází stavu. V případě, že je tato brzda zabrzděna, tedy vozidlo prokazatelně snížilo tlak v brzdovém potrubí a snižuje rychlost, může se hodnota náběhu brzdy zkrátit na konstantu 2 sekundy.

Křivka Warning (dále jen W) je křivka, která upozorňuje strojvedoucího na skutečnost, že se blíží k dohledovým limitům a je tedy potřeba začít snižovat rychlost. V opačném případě dojde k zásahu provozní či nouzové brzdy. Časová hodnota $T_{warning}$ je stanovena jako fixní hodnota na 2 sekundy. Její poloha se vypočítá pro SBI1 i SBI2 a v praxi se užije ta, která nastane při jízdě vlaku dříve. Zároveň se indikace W křivky zobrazí, pokud se aktuální rychlost liší oproti nejvýše dovolené v tom místě o 4 až 5 km·h⁻¹.

Křivka Permitted (dále jen P) je křivka, která určuje optimální bezpečnou brzdnu křivku tak, aby nebylo dosaženo křivky W či dalších omezujících křivek. Její časová vzdálenost od SBI1 či SBI2 je opět stanovena fixní hodnotou T_{driver} na 4 sekundy.

2.4 Další prostředky zvýšení bezpečnosti

Železniční nehody z let 2020 a 2021 jasně ukázaly, že není možné čekat ve všech případech na zavedení ETCS, ale je třeba hledat taková řešení, která jsou rychlá, levná, spolehlivá, a která svým zavedením nebudou v rozporu s železničními balíčky a implementací TSI. Takovým prostředkem je dnes již používaný systém výstrahy při nedovoleném projetí návěsti (dále jen VNPN). Tato funkce je spolehlivým prostředkem, který detekuje, že vozidlo minulo návěst zakazující jízdu a vstoupilo do kolejového úseku, který už nepříslušel jeho jízdni cestě. Systém automaticky reaguje aktivací generálního stopu pomocí TRS, který aktivuje nouzové brzdění pro všechna vozidla, která se nachází v jeho oblasti. Po zavedení ETCS tuto funkci převezme OBU vozidla, které při aplikaci uvolňovací rychlosti vyhodnocuje vzdálenost mezi minimálním bezpečným čelem a EoA.

Nicméně i v případě zavedení ETCS neztrácí tento systém smysl, protože může být dále využíván jako národní doplněk systému ETCS v případech, kdy z nějakého relevantního důvodu nemá ETCS plný dohled nad zastavením vlaku. Mezi tyto situace lze zařadit volbu funkce Override EoA⁸⁸, kdy vozidlo přechází do módu odpovědnosti strojvedoucího⁸⁹ nebo při posunu⁹⁰.

Vzhledem k dlouhodobým pozitivním zkušenostem na síti Správy železnic, s. o. lze za vhodný prostředek pro dohled nad rychlostí označit také systém Automatického vedení vlaku (dále jen AVV). Tento systém svými funkcemi a chováním konverguje k zabezpečovacím systémům s úplnou kontrolou rychlosti nicméně z pohledu bezpečnosti (58) je na něj třeba nahlížet jako na systém spolehlivý, nikoliv bezpečný. Patří tedy do kategorie ATO, a jeho hlavním posláním je optimalizace průběhu jízdy, dodržování JŘ a optimalizace spotřeby energie (59) a (60). Systém AVV tedy nelze chápat jako systém ATP, nicméně délka jeho užívání a zkušenosti s jeho spolehlivým provozem mohou představovat významnou databázi provozních situací, které mohou sloužit jako podklad pro správné nastavení brzdných křivek ETCS tak, aby se co nejvíce přiblížily nominálnímu brzdění a zároveň byly stále bezpečné z pohledu zabezpečovacího zařízení s úplnou kontrolou rychlosti (61).

⁸⁸ Override EOA – Potlačení konce oprávnění k jízdě

⁸⁹ SR – Staff Responsible

⁹⁰ SH – Shunting

3 PROPUSTNOST A KAPACITA TRATÍ VE VZTAHU K ETCS

Pojmy kapacita a propustnost tratí jsou velmi často zaměňované výrazy, které zdánlivě znamenají totéž⁹¹. Realita je ovšem taková, že tyto hodnoty vyjadřují každá něco jiného. Propustnost je možno chápat jako výkonnost určité části železniční infrastruktury bez ohledu na to, jaké jsou konkrétní nebo požadované časové polohy vlaků (zejména osobní dopravy). Jako vhodný příklad je možné uvést situaci, kdy následné mezidobí má hodnotu 6 minut. Pak je možné daným mezistaničním úsekem provézt 10 vlaků za hodinu. Propustnost (ať už maximální nebo praktická) je tedy $10 \text{ vlaků} \cdot \text{h}^{-1}$. Pokud ale objednatel požaduje po dopravci interval vlaků 10 minut, pak není možné mezi takové dvě trasy vložit žádnou další a využití infrastruktury klesne na 6 vlaků za hodinu. Kapacita takové trati je tedy $6 \text{ vlaků} \cdot \text{h}^{-1}$. Toto omezení je spojeno zejména s integrovanými taktovými jízdami řady, které se využívají v integrovaných dopravních systémech a v dálkové dopravě i na národní úrovni. **V dalším textu habilitační práce tak bude řešen vliv ETCS na kapacitu tratí.** Další rozměr také přináší vnímání kvality, kdy různá úroveň kvality odpovídá různé kapacitě. Zcela zásadní literatura v této oblasti je (62) obsahující kompletní popis vědeckého stavu poznání v oblasti kapacity a propustnosti železniční infrastruktury. Jsou v ní obsaženy, jak metodiky Správy železnic, s. o., tak UIC. Pokud budou zohledněny i nové směrnice Správy železnic, s. o. (63) a (64), pokryje se tato problematika poměrně důsledně. Autor po prostudování těchto materiálů předpokládá, že po zavedení výhradního provozu ETCS, nebude nutné tyto směrnice měnit, a to až do okamžiku instalace ETCS L3. Do dílčích částí výpočtu se budou pouze dosazovat jiné hodnoty. Na samotném principu výpočtu a jeho matematickém vyjádření se nic nezmění. Pro další části habilitační práce je tak možné tyto zdroje považovat za platné a využít jich pro stanovení kapacity tratí po zavedení výhradního provozu pod dohledem ETCS.

Mezi vědecké otázky, které jsou řešeny jak v evropském kontextu, tak v podmínkách ČR, patří interakce mezi zavedením ETCS a kapacitou tratí. V předchozím textu již bylo uvedeno, jaké jsou vlastnosti systému ETCS a jaký matematický aparát stojí za kontrolou bezpečnosti tohoto systému. V této části se autor zaměřuje na vědecké články, které řeší interakci ETCS a kapacity tratí, protože pozitiva i negativa tohoto systému vnímají všechny

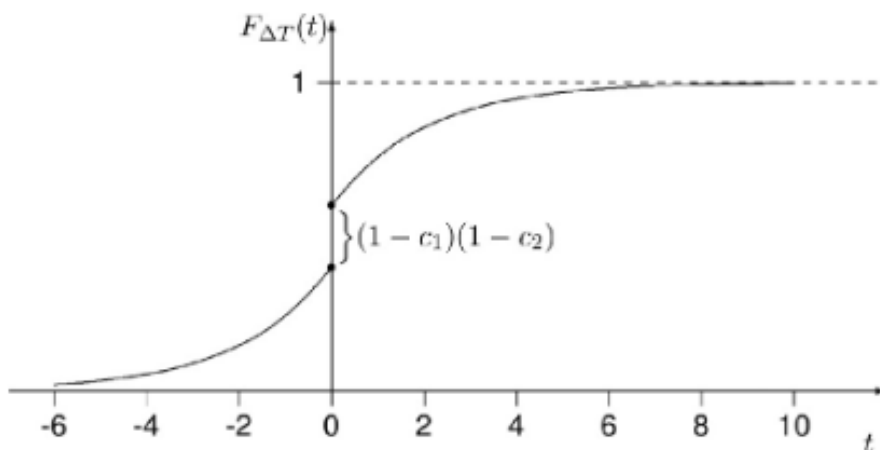
⁹¹ To bylo historicky dáno tím, že naše předpisy pojem kapacita neznaly a pracovaly pouze s propustností. Až s příchodem Směrnice a nařízení EK se přidal pojem kapacita, z anglického „capacity“. Například prof. RNDr. Jan Černý, DrSc., dr. h. c. ve svých přednáškách označoval kapacitu jako statický pojem, který označuje určité maximum a propustnost jako pojem dynamický označující naplnění kapacity v průběhu času.

výzkumné instituce a přeneseně jsou také distribuovány k manažerům infrastruktury. Nejčastěji jsou řešeny otázky délky oddílů a stanovení následných mezidobí pomocí simulačních SW. Mezi nejnovější články patří (65), kde je pomocí simulace řešena velikost následného mezidobí na dánské infrastruktuře pro různé kombinace vlaků (osobní – nákladní) a různé zastavovací politiky. Cílem článku bylo vytvořit metodiku pro stanovení délky oddílů na trati vybavené ETCS L2. Z matematického popisu výsledku této studie však vyplývá pouze to, že tato délka je závislá na konfiguraci zhlaví a rychlosti v odbočné větvi. Optimalizace velikosti následného mezidobí je tak možná pouze při změně konfigurace dopravní infrastruktury. To je v případě stávající infrastruktury ekonomicky nevhodné.

Pomocí teorie fronty se na kapacitu dívá článek (66). Opět je zde snaha o co nejlepší využití kapacity železniční tratě s přihlédnutím ke vstupnímu zpoždění⁹² a ke zpoždění, které vzniklo na trati⁹³. Vstupní zpoždění je za všech okolností větší nebo rovno 0 a má normální rozdělení pravděpodobnosti, což lze vyjádřit vztahem 7, kde a a λ jsou konstanty.

$$F_{vstupni} = 1 - a \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad [s] \quad (7)$$

To, zda dojde v ovlivnění vlaků mezi sebou je pak dáno vstupními zpožděními obou vlaků a mezerou⁹⁴ mezi nimi. Matematicky je to možné vyjádřit pomocí Riemann-Stieltjesova integrálu, který je na obrázku 24.



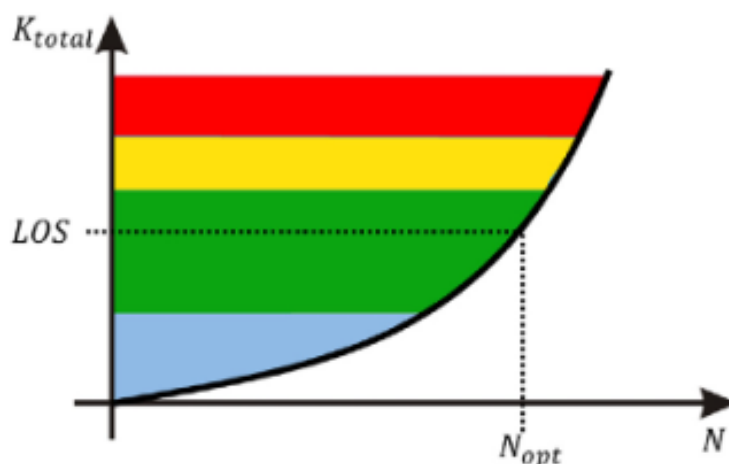
Obrázek 24 Riemann-Stieltjesův integrál

Zdroj: (66)

Další závislost mezi počtem vlaků a kvalitou služby lze nalézt na obrázku 25. Autoři literatury (66) zde matematicky dokazují, jaká hodnota mezery je potřebná z hlediska zajištění

⁹² Primary delay
⁹³ Knock-on delay
⁹⁴ Buffer time

provozní spolehlivosti a udržení dostatečné propustnosti. Výsledkem je pak obrázek 25, kde je vidět vztah mezi počtem vlaků (osa X) a kvalitou služby⁹⁵ (osa Y).



Obrázek 25 Vztah mezi kvalitou služby a počtem vlaků

Zdroj: (66)

Pomocí sběru dat a dalšího šetření autoři zjistili, že existuje logaritmická korelace mezi maximálním počtem vlaků a podílem vlaků osobní dopravy (p_{od}), který má při dodržení zadané úrovně kvality tvar dle vztahu 8.

$$N_{celkem} = 370 \cdot e^{-1,3 \cdot p_{od}} \quad [\text{počet vlaků}] \quad (8)$$

Kde:

N_{celkem} celkový počet vlaků [počet vlaků],

p_{od} podíl vlaků osobní dopravy [-].

V tomto výzkumu se však nezohledňuje zavedení ETCS na těchto tratích ani jiná úprava systému ETCS.

3.1 Pozitivní efekty zavedení ETCS

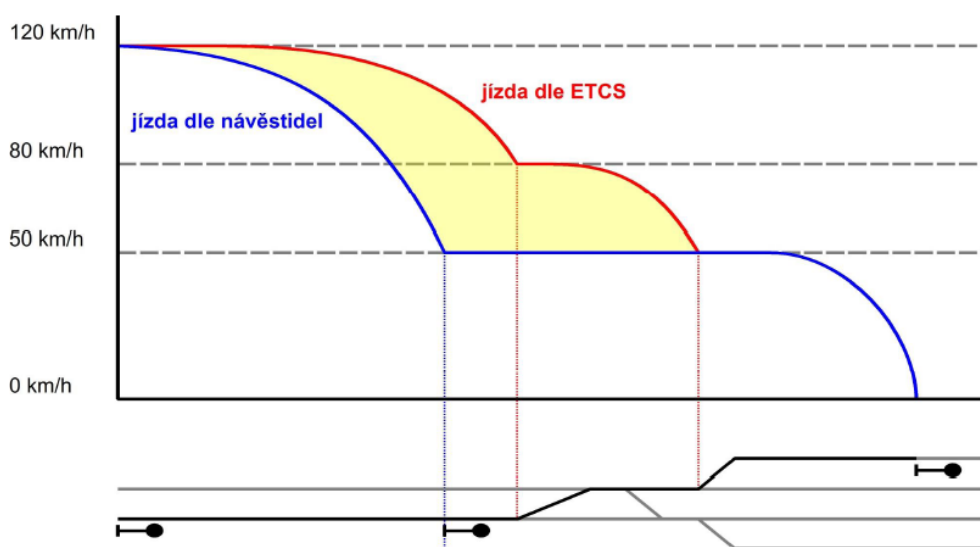
Mimo pozitivní efekty v oblasti bezpečnosti se jako jeden z dalších pozitivních efektů uvádí také zvýšení propustnosti tratí. Tento efekt vychází z předpokladu, že pod dohledem ETCS je možné definovat rychlostní profil obecně, tedy bez vazby na rychlostní návěstní soustavu. Změna rychlosti pak může být definována v libovolném místě, tedy nejen v místě hlavního návěstidla. Také brzdění vozidel pod dohledem ETCS dozná značné změny, protože zábrzdňá vzdálenost nebude definována škálou rychlostí, ale pro každý vlak zvlášť dle jeho parametrů. Tím lze také na stávající infrastruktuře (pokud to stavebně umožňuje) zvýšit traťovou rychlost nad $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, neboť zábrzdňá vzdálenost již nebude limitující faktor. Vlak je v takovém případě limitován pouze vypočtenou brzdňou křivkou, která zajišťuje bezpečnost

⁹⁵ LoS – Level of Service

spolehlivěji než strojvedoucí. První zkušební úsek je Ejpvický tunel (67), kde je maximální rychlost $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Z hlediska provozních intervalů je na současné infrastruktuře často problém se zajištěním boční ochrany, což je provázáno nutností snížení rychlosti předjíždějících vlaků pomocí vlakové cesty s omezením (dále jen VCO). Použití ETCS tak zajistí, že i v případě nepřítomnosti odvrtné výhybky nebude potřeba VCO. Z pohledu předjížděného vlaku lze nalézt pozitivum v tom, že může dojít k rozdělení současných prostorových oddílů na menší části, což pomůže zkrátit následné mezidobí při kombinaci stejně rychlých vlaků či kombinaci rychlý-pomalý.

Také při vjezdu vlaku do stanice lze najít možné časové úspory oproti současnému stavu. Pod dohledem ETCS nebude z pohledu dohledu snížení rychlosti rozhodující hlavní návěstidlo, ale až rozhodná výhybka nebo jejich posloupnost. Dle předpisů platných v roce 2022 je návěstěná rychlost platná v obvodu výhybek přilehlých k hlavnímu návěstidlu. Pod dohledem ETCS bude nahrazena jízdou sníženou rychlostí pouze v obvodu výhybek pojížděných během jízdy vlaku na předjízdnu kolej sníženou rychlostí. Celá situace je přehledně zachycena na obrázku 26.

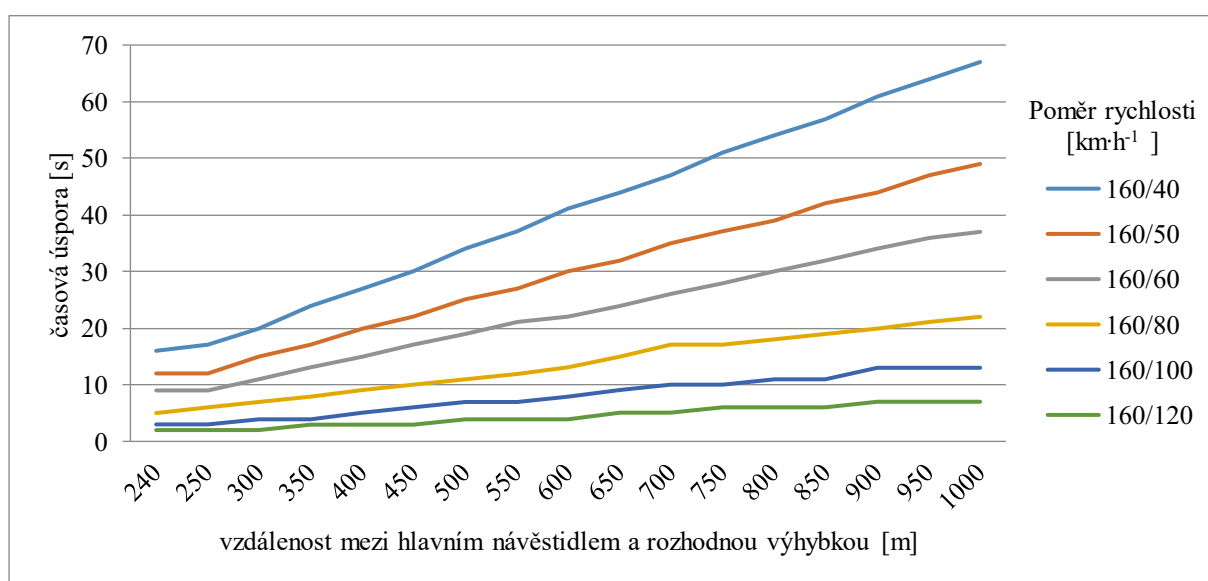


Obrázek 26 Časová úspora při jízdě odbočkou

Zdroj: (42)

V tomto případě lze kvantifikovat přínosy zavedení ETCS na provozních intervalech, době obsazení či samotné jízdě. Klíčem k tomuto výpočtu pak je vzdálenost mezi hlavním návěstidlem a rozhodnou výhybkou a také rychlost v přímé a odbočné větvi výhybky. Čím vyšší bude vzdálenost obou míst a čím větší bude rozdíl obou rychlostí, tím větší bude výsledný efekt. Hluběji se autor se spoluautory touto problematikou zabýval roku 2015 v literatuře (42) a dospěli k závěrům, které lze interpretovat na obrázku 27. Analýzou jízdního

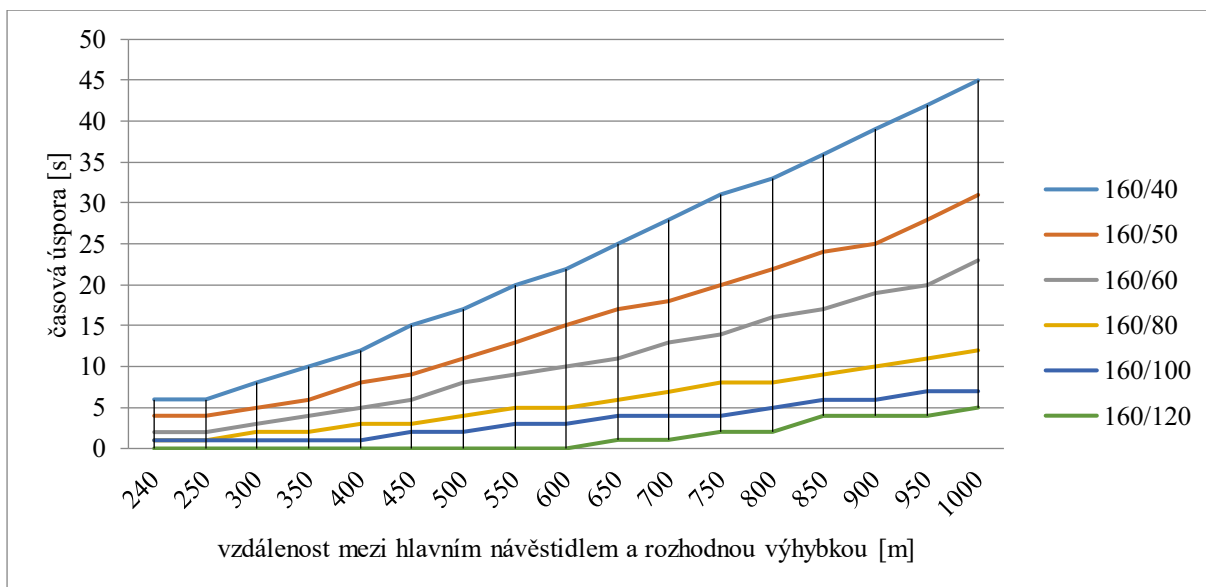
řádu na tratích, kde se počítá se zavedením systému ETCS bylo zjištěno, že vzdálenost mezi hlavním návěstidlem a rozhodnou výhybkou je nejkratší v Hranicích na Moravě, a to 245 metrů. Nejdelší je pak tato vzdálenost v Rájci-Jestřebí 843 metrů (42). V tomto intervalu na ose X lze tedy hledat hodnoty časové úspory ze zavedení ETCS na ose Y. Pro variantu rychlostí 160/60 se jedná o interval 9 až 32 sekund. Pro variantu 160/50 je to 12 až 42 sekund a pro variantu 160/40 pak 17 až 57 sekund. Časový přínos tedy u žádné z variant nepřekračuje jednu minutu. To neznamená, že přínos tohoto efektu je nulový. Naopak může mít vliv na jízdní dobu i provozní intervaly, a to jak v rovině sestavy jízdního řádu, tak v rovině operativního řízení, stability jízdního řádu a snižování zpoždění.



Obrázek 27: Úspora jízdní doby

Zdroj: (42)

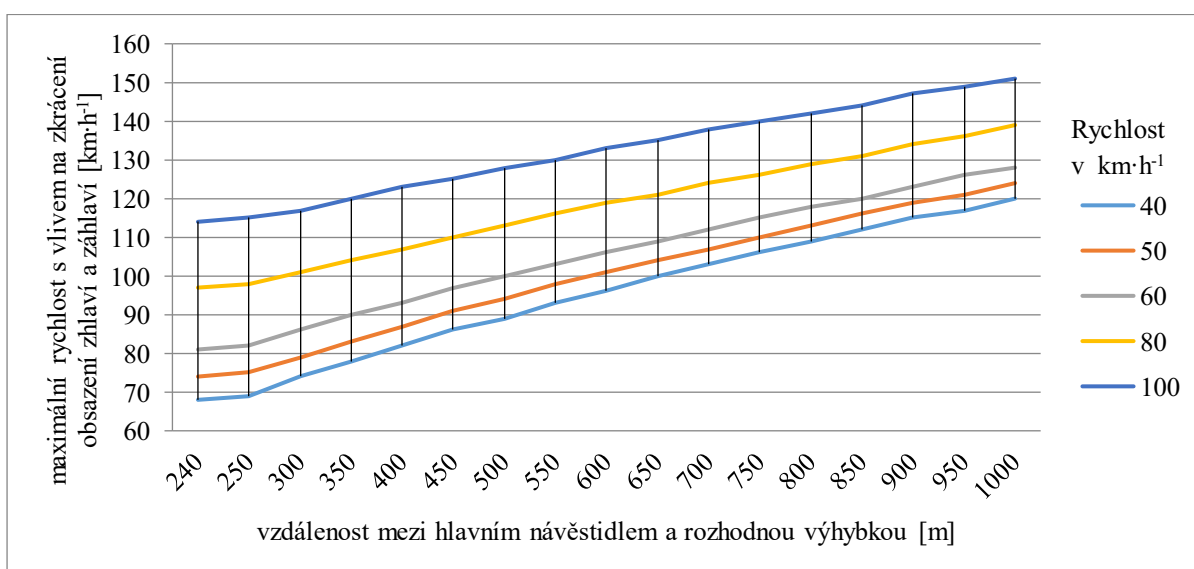
Kromě úseku mezi hlavním návěstidlem a rozhodnou výhybkou je z pohledu kapacity železniční sítě vhodné sledovat také úsporu v obsazení záhlaví a zhlaví. To lze matematicky vyjádřit jako podmnožinu hodnot z obrázku 28 a tvoří zhruba polovinu až dvě třetiny celkové úspory. Také tato úspora může znamenat lepší využití současné dopravní infrastruktury.



Obrázek 28: Úspora v obsazení záhlaví a zhlaví

Zdroj: (42)

Na obrázcích 27 a 28 jsou zachyceny maximální možné časové úspory. To, zda je jich ale možné dosáhnout záleží také na brzdných vlastnostech soupravy a na vzdálenosti mezi rozhodnou výhybkou a hlavním návěstidlem. Pokud bude tato vzdálenost nižší, než je brzdná dráha potřebná na snížení rychlosti z traťové na „odbočnou“, tak by se od této rychlosti stala úspora konstantní a dále by nerostla, protože nelze projet okolo hlavního návěstidla (tedy jeho polohy) vyšší rychlostí, než stanovují brzdné křivky ETCS. Časová úspora tak roste pouze do dosažení této limity. Na obrázku 29 je závislost vzdálenosti mezi hlavním návěstidlem a rozhodnou výhybkou a maximální rychlostí, kterou může mít vlak v místě polohy hlavního návěstidla. Pořadí křivek je zde logicky obrácené než u předchozích obrázků, tedy čím vyšší rychlost v odbočné větvi, tím vyšší rychlost v poloze hlavního návěstidla.



Obrázek 29: Hraníční hodnoty rychlosti pro maximální zkrácení obsazení zhlaví a záhlaví

Zdroj: (42)

Jako zatím nedořešená otázka se jeví případ, kdy je v jízdě na zhlaví stanice přejezdové zabezpečovací zařízení. Nastavení přibližovacího úseku totiž může znemožnit plné využití tohoto opatření. Je vždy na individuálním posouzení přibližovacího úseku, zda bude možné využít výhody ze zavedení ETCS. Na úrovni kvalifikační práce vznikla na podporu odstranění tohoto problému diplomová práce (68). Autor zde analyzuje, za jakých podmínek by bylo možné použít proměnlivou dobou výstrahy přejezdového zabezpečovacího zařízení. V současné době je to tak, že doba uzavření přejezdu je počítána na nejrychlejší vlak. To přináší negativní důsledek v tom, že doba uzavření přejezdu pro všechny pomalejší vlaky je delší, než by z bezpečnostního hlediska musela být.

Tabulka 4 Délky přibližovacích úseků [m]

	Rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]					
	60	80	100	120	140	160
1 kolej	717	956	1 196	1 435	1 674	1 913
2 koleje	765	1 020	1 276	1 531	1 786	2 041
3 koleje	949	1 084	1 356	1 627	1 898	2 169

Zdroj: (68)

Uměle je tak snížena kapacita pozemní komunikace. V současnosti je v paketu 88 Subsetu 7, systému ETCS uvedena možnost, jakou se vozidlo dovídá o přejezdu v poruše a projíždí kolem něj sníženou rychlostí $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. V tomto paketu je definována hranice přejezdu a podle délky vlaku je pak definována délka úseku se sníženou rychlostí. Česká legislativa pak ještě navíc nařizuje zvětšit délku tohoto úseku o 60 metrů před přejezd. Pro ilustraci jsou v tabulce 4 uvedeny délky přibližovacích úseků pro různé rychlosti a různé počty traťových kolejí.

Porovnáním hodnot z tabulky 4 pro běžný případ na českých tranzitních koridorech, tedy 2 koleje a vlaky expresního segmentu $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, rychlé nákladní vlaky $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a ostatní pak $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, lze dojít k závěru, že závory jsou při průjezdu rychlého nákladního vlaku zavřené o 27,5 sekundy déle, než je z bezpečnostního hlediska potřeba. U pomalého nákladního vlaku je tento rozdíl 36,8 sekundy.

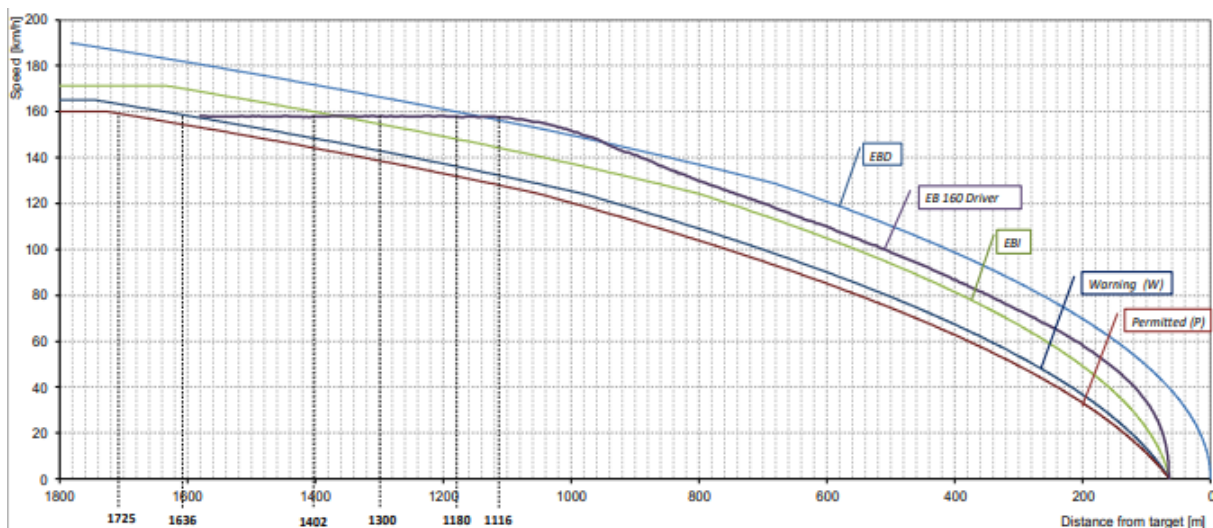
Přibližovací úsek přejezdu na staničním zhlaví tak může být omezením pro využití systému ETCS (svůj význam také ztratí výhybky s vyšší rychlostí jízdy do odbočné větve) i pro propustnost pozemní komunikace. Autor literatury (68) provedl měření na dopravně zatížených železničních přejezdech a počet ovlivněných silničních vozidel zpravidla klesl v řádu nižších jednotek za hodinu a celková doba čekání všech silničních vozidel klesla v rozmezí 20 až 30 %.

Využití adaptivní délky uzavření přejezdu je tak výzvou nejen pro železniční dopravu, ale i pro tu silniční.

Obecně lze všechny tyto efekty využít jako přírůstek kapacity nebo zvýšení stability jízdniho řádu nebo jako nástroj snížení energetické náročnosti, kdy dopravce při různých provozních situacích může pracovat s výběhem vozidla.

3.2 Negativní efekty zavedení ETCS

V září 2021 schválila vláda ČR plán implementace ETCS v ČR pod názvem Plán moderního zabezpečení české železnice (69). V tomto plánu jsou uvedeny konkrétní termíny zavedení na jednotlivých tratích a také očekávaná finanční náročnost. Velkým posunem oproti předchozím plánům implementace ETCS je konkrétní podpora pro dopravce na obnovu vozového parku a na vybavení vozidel palubní částí. V plánu MD ČR a Správy železnic, s o. se také uvádí zvýšení kapacity tratí. Jak však ovlivní ETCS kapacitu nebo spíše propustnost našich tratí, dosud nebylo spolehlivě kvantifikováno, a provozní zkušenosti z ověřovacího provozu a testovacích jízd prokazují opak. Mezi odborníky se diskutuje, jaké efekty (pozitivní či negativní) bude mít zavedení ETCS na našich tratích. Mezi ty pozitivní se nejčastěji řadí zvýšení bezpečnosti, protože úplný dohled nad brzděním vlaku dokáže zabránit řadě mimořádných událostí, kde došlo k projetí návěstidla zakazujícího jízdu. Velmi významným a tragickým případem z poslední doby je nehoda u Milavče ze srpna 2021. Mezi těmi negativními efekty se nejčastěji objevuje snížení kapacity staničních kolejí a zhlaví, protože vlaky (zejména ty, jejichž délka se blíží užitečné délce koleje) budou dojíždět k návěstidlu pomaleji a svou jízdou tím prodlouží obsazení zhlaví (70). Autor si dal za cíl tento efekt demonstrovat. Jako vstupy použil data z rychloměrů a porovnával současné brzdění strojvedoucího s tím, jak by OBU spočítalo brzdnou křivku dle ETCS. Obdobný přístup zvolili autoři také v Polsku. Na obrázku 30 je graf z literatury (35), který ukazuje modelovou situaci brzdění strojvedoucího na polské infrastruktuře proloženou brzdnými křivkami ETCS.



Obrázek 30 Brzdná křivka polského strojvedoucího a brzdných křivek ETCS

Zdroj: (35)

Z obrázku 30 je patrné, že strojvedoucí (fialová křivka) bezpečně zastavil na určeném místě. Průběh jeho brzdění je však ve všech místech nad křivkami P, W i EBI. V prvních momentech snižování rychlosti je dokonce nad křivkou EBD. Tento příklad dokazuje, že strojvedoucí je schopen brzditi efektivněji, tedy na kratší dráze, než mu v budoucnu umožní ETCS. Na druhou stranu je potřeba poukázat na to, že ETCS bude přímo odpovědné za bezpečnost, tedy musí zabrzdit před koncem MA za všech okolností, tedy nejen za těch nominálních. Z tohoto pohledu je tedy největším problémem to, že ETCS nelze nastavovat podle aktuálních provozních podmínek, zejména pak počasí, které ovlivňuje adhezi a také že nezná stav brzdové soustavy konkrétní soupravy.

Pro ověření této problematiky měl autor k dispozici čtyři sady dat:

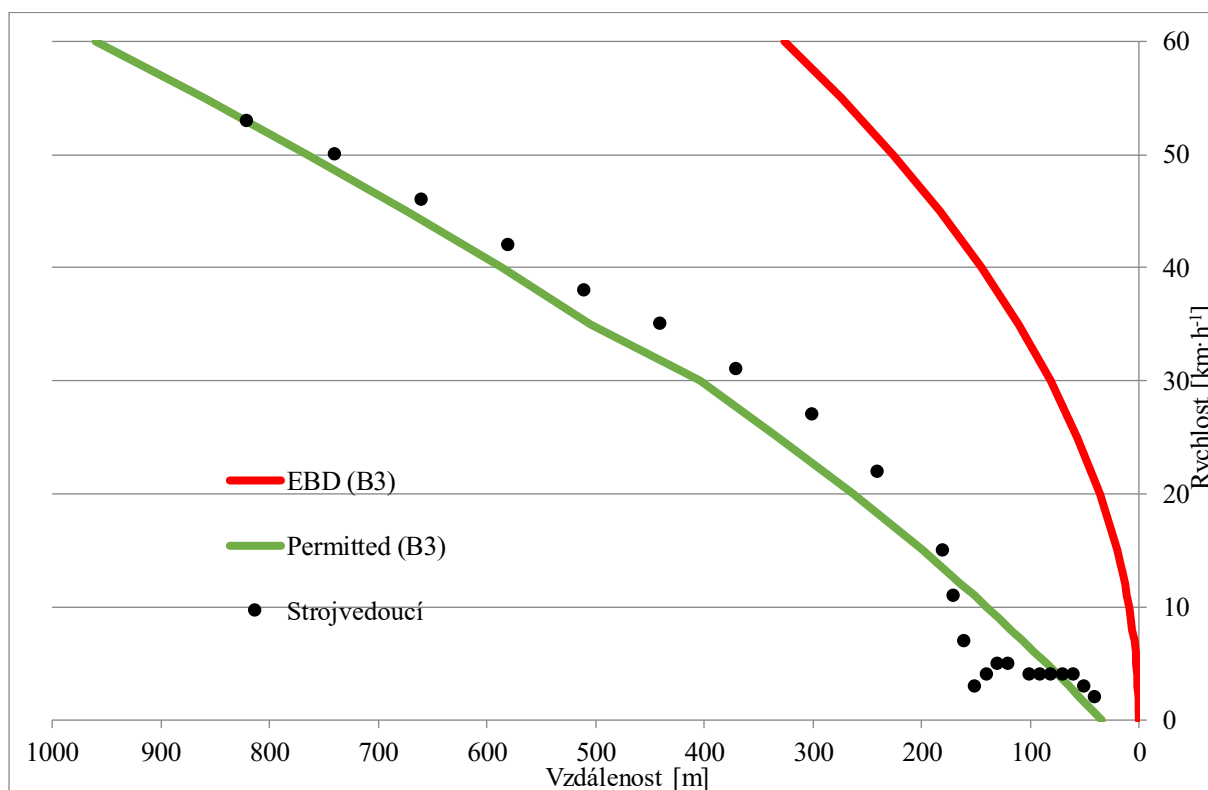
- z lokomotivy TRAXX společnosti METRANS Rail,
- z vlaku expresního segmentu ČD, a.s,
- z vlaku kategorie Os společnosti ČD, a.s.
- a také soubor dat od společnosti METRANS Rail ve formátu jejich SW EVA2.

Tato data autor podrobně analyzoval, zpracoval a vytvořil z nich grafy. Tyto grafy následně porovnal a proložil průběhy brzdění dle zásad Subsetů ETCS. Z jejich porovnání pak stanovil pozitivní a negativní důsledky zavedení systému ETCS.

Lokomotiva TRAXX

Při testovacích jízdách na vozidle společnosti METRANS Rail, byly opakovaně prováděny zkoušky, kdy měl strojvedoucí za úkol brzditi k danému cíli a následně byly tyto křivky proloženy brzdnými křivkami ETCS. Rozdíl oproti polskému výzkumu byl však v tom, že v podmínkách ČR byl vlak veden pod dohledem ETCS, tedy přetažení brzdné křivky za EBI

nebylo možné⁹⁶. Barevné schéma všech grafů brzdění vlaku je totožné – **červená barva** je křivka EBD, **zelená barva** je křivka P a **černé body** vyznačují brzdění strojvedoucího, které bylo snímáno kamerou a následně převáděno do tabulky.



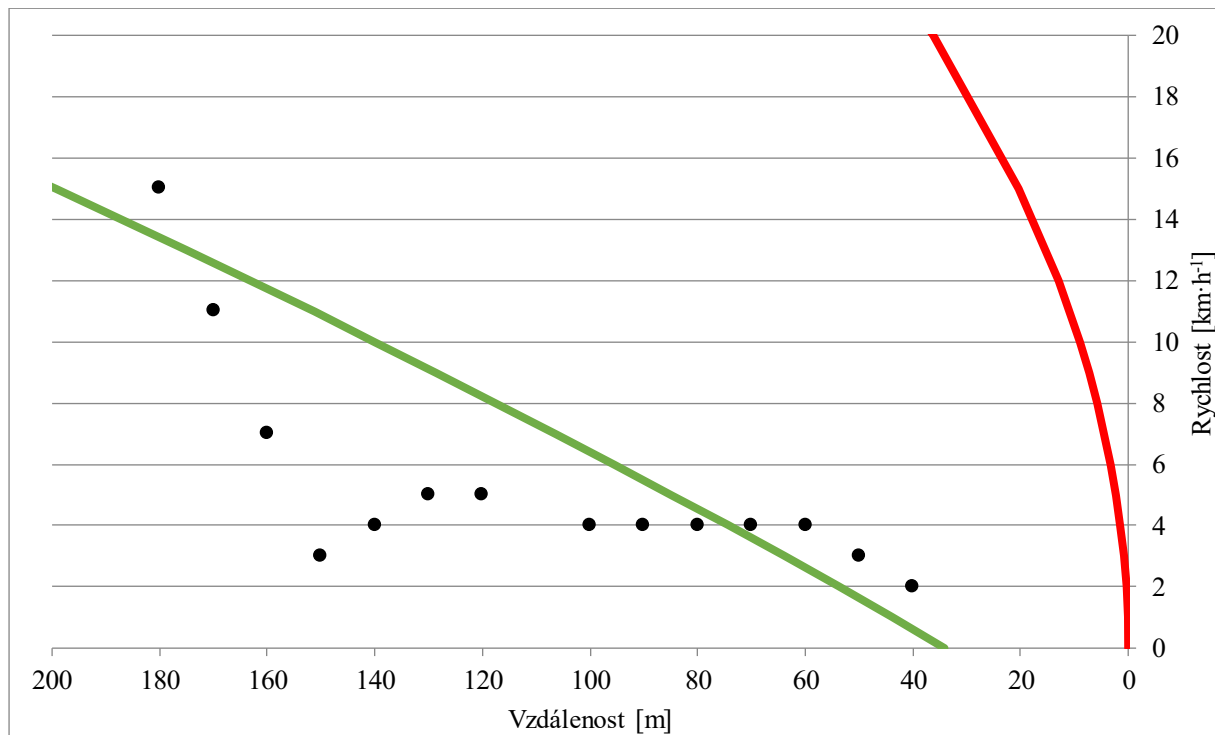
Obrázek 31 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění českého strojvedoucího a křivek ETCS (měření 1)

Zdroj: autor

Obrázek 31 ukazuje brzdění strojvedoucího nákladního kontejnerového vlaku společnosti METRANS. Je patrné, že ve vzdálenosti mezi 900 a 300 metry se rychlost vlaku nesnižuje dostatečně rychle, což má v další fázi za následek další snížení tlaku v potrubí a skokové zpomalení hluboko pod křivku P. Tento efekt se dá očekávat u většiny nákladních vlaků, protože tyto vlaky nejsou schopné regulovat brzdění vzduchovou brzdou dostatečně pružně. Z principu jejich fungování proto trvá, než tato brzda začne účinkovat a také, než účinkovat přestane. Pomalé dojíždění k návěstidlu, tak není pro nákladní vlaky možné. Při detailním pohledu (obrázek 32) na oblast pod 20 km·h⁻¹ je zřetelné, že pokud by měl vlak striktně dodržovat křivku P musel by zastavit cca 35 metrů před místem ohrožení a dalších zhruba 50 metrů před zastavením jet nejvýše 5 km·h⁻¹ a 60 metrů nejvýše 10 km·h⁻¹. Přitom křivka EBD je v tuto chvíli poměrně daleko. Řešením je opět uvolňovací rychlost, která by

⁹⁶ Nebo by vedlo k aktivaci nouzové brzdy

způsobila to, že by se na obrázku 32 pod uvolňovací rychlostí⁹⁷ nedohlížela a strojvedoucí by byl omezen pouze křivkou EBD či lépe řešeno EBI.

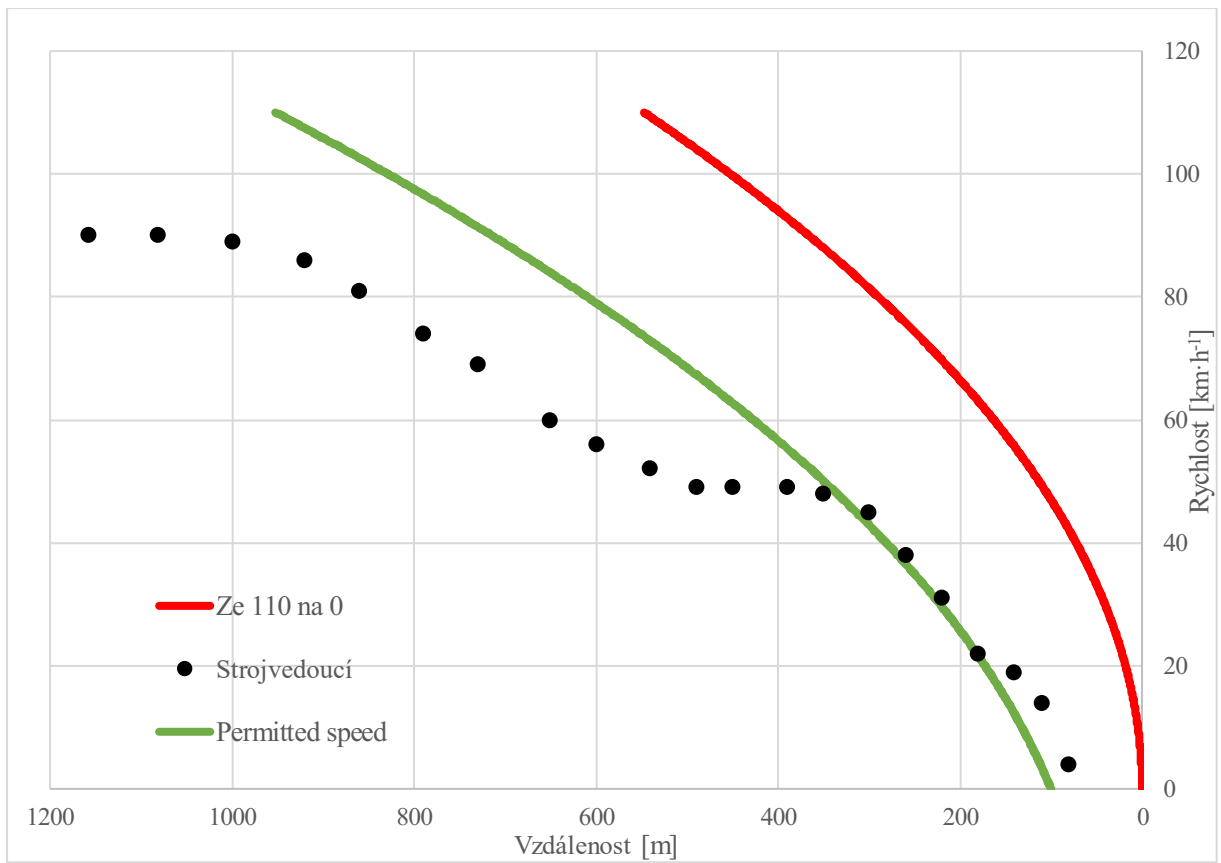


Obrázek 32 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání – detail měření 1

Zdroj: autor

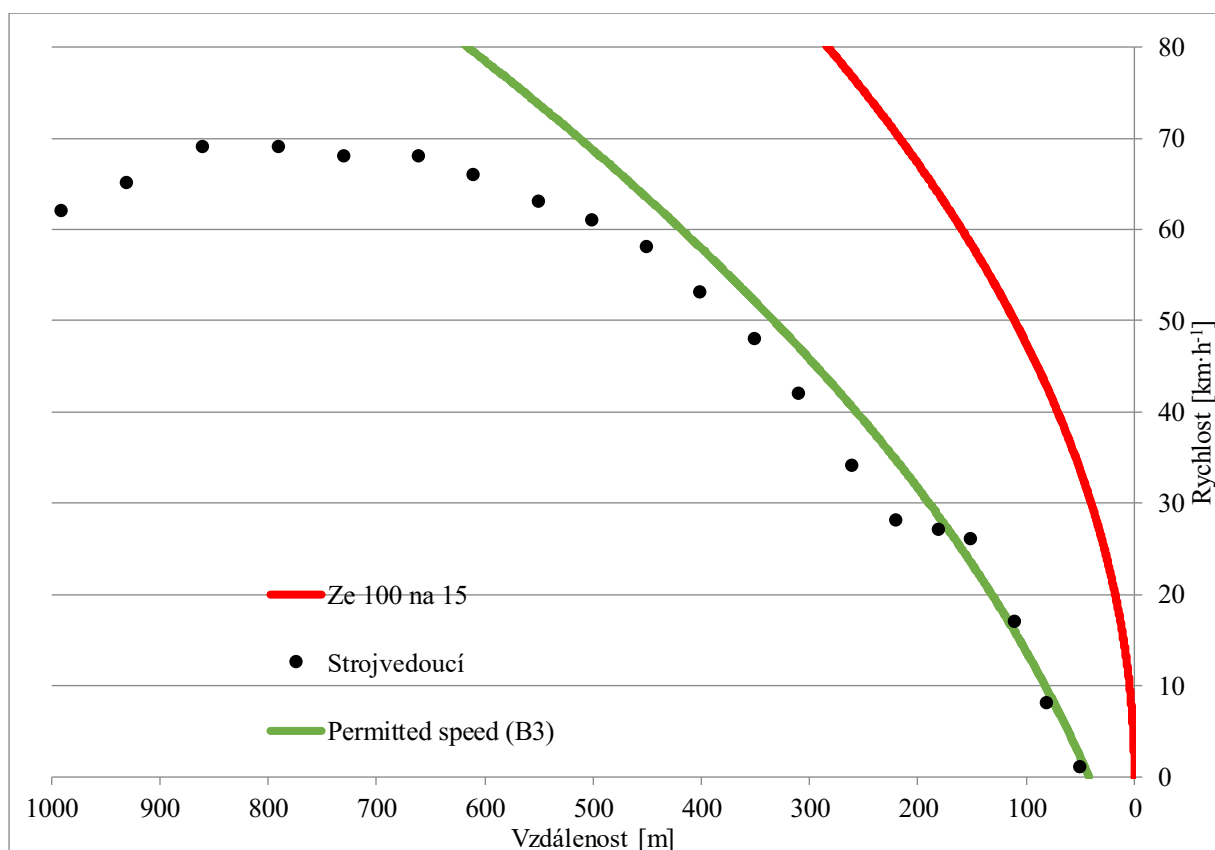
Na obrázku 33 a 34 jsou pak další měření, kde již strojvedoucí dokázal lépe kopírovat křivku *P*. Nicméně její sledování vyžadovalo od strojvedoucího mnohem vyšší pozornost a sledování DMI, méně se tedy věnoval situaci před sebou.

⁹⁷ Tuto rychlost stanovuje manažer infrastruktury jako součást národních hodnot – zpravidla není vyšší než 30 km·h⁻¹.



Obrázek 33 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění českého strojvedoucího a křivek ETCS (měření 2)

Zdroj: autor



Obrázek 34 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění českého strojvedoucího a křivek ETCS (měření 3)

Zdroj: autor

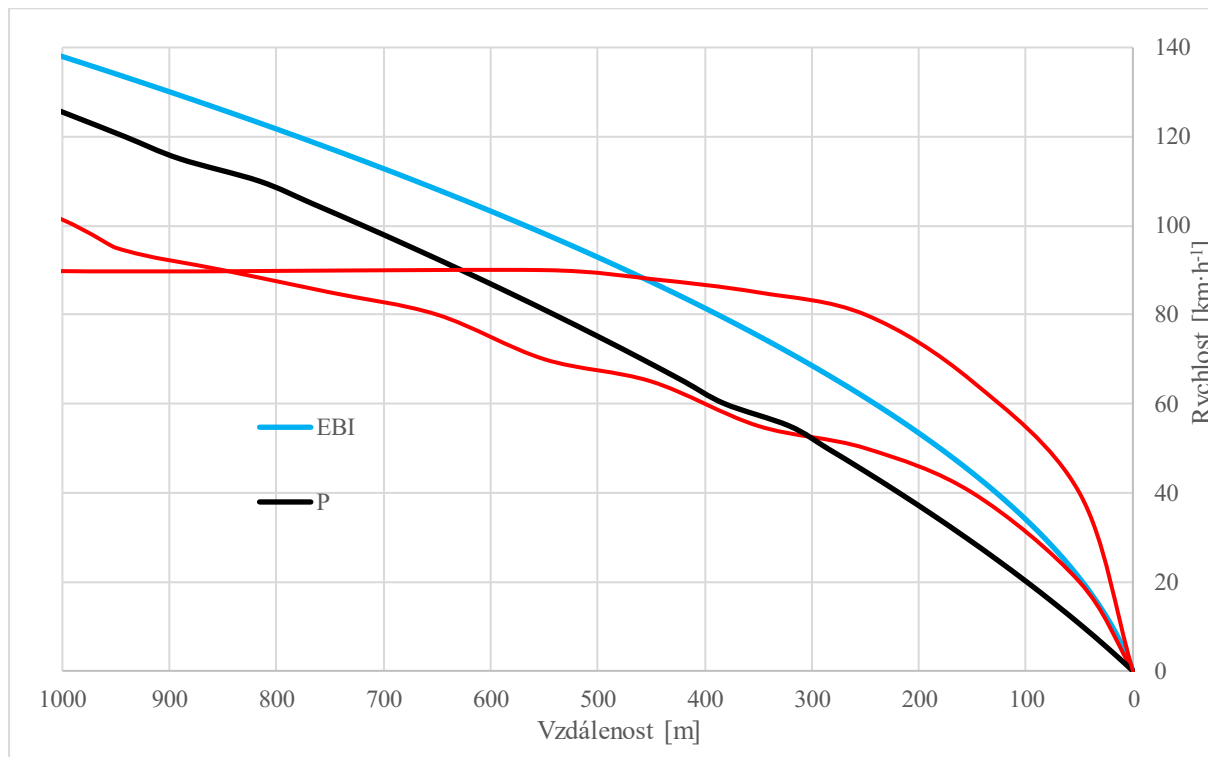
Závěr z tohoto měření je tedy takový, že strojvedoucí se dokáže adaptovat na nové podmínky a požadavky brzdění pod dohledem ETCS, ale je nucen více sledovat palubní jednotku a méně okolní prostředí.

Expresní vlak společnosti ČD

Další sadou dat byly údaje z rychloměrů o jízdě vlaku Ex 145 Landek⁹⁸. Rozdíl oproti předchozímu měření, byl zejména v tom, že zde se jedná o retrospektivní analýzu. Z dat z rychloměrů byl vyhodnocován proces brzdění strojvedoucího bez omezení ETCS a následně byly k tomuto brzdění namodelovány brzdné křivky dle ERA tool. Jako vzorek sloužily dva průběhy brzdění vlaku Ex 145 Landek (187 brzdících procent, 523 tun). Na obrázku 35 je zachycen průběh brzdění pro Ex 145 Landek (**červené křivky**) a brzdných křivek ETCS (**Permitted speed** a **Emergency brake intervention**). Z těchto průběhů je patrné, jak výrazně jsou oba reálné průběhy brzdění nad těmi, které povoluje ETCS. Je třeba si uvědomit, že pod dohledem ETCS bude strojvedoucí sledovat a dodržovat P křivku, tedy jeho zastavování bude

⁹⁸ Tento vlak byl zvolen jako typický zástupce hnacího vozidla (stejnoseměrná lokomotiva rok výroby cca 1978 bez ETCS) a osobních vozů běžné stavby s kotoučovými brzdami používaných v dálkové osobní dopravě.

časově mnohem delší než v současnosti. Z pohledu bezpečnosti však bude za celý proces brzdění zodpovědný systém ETCS.

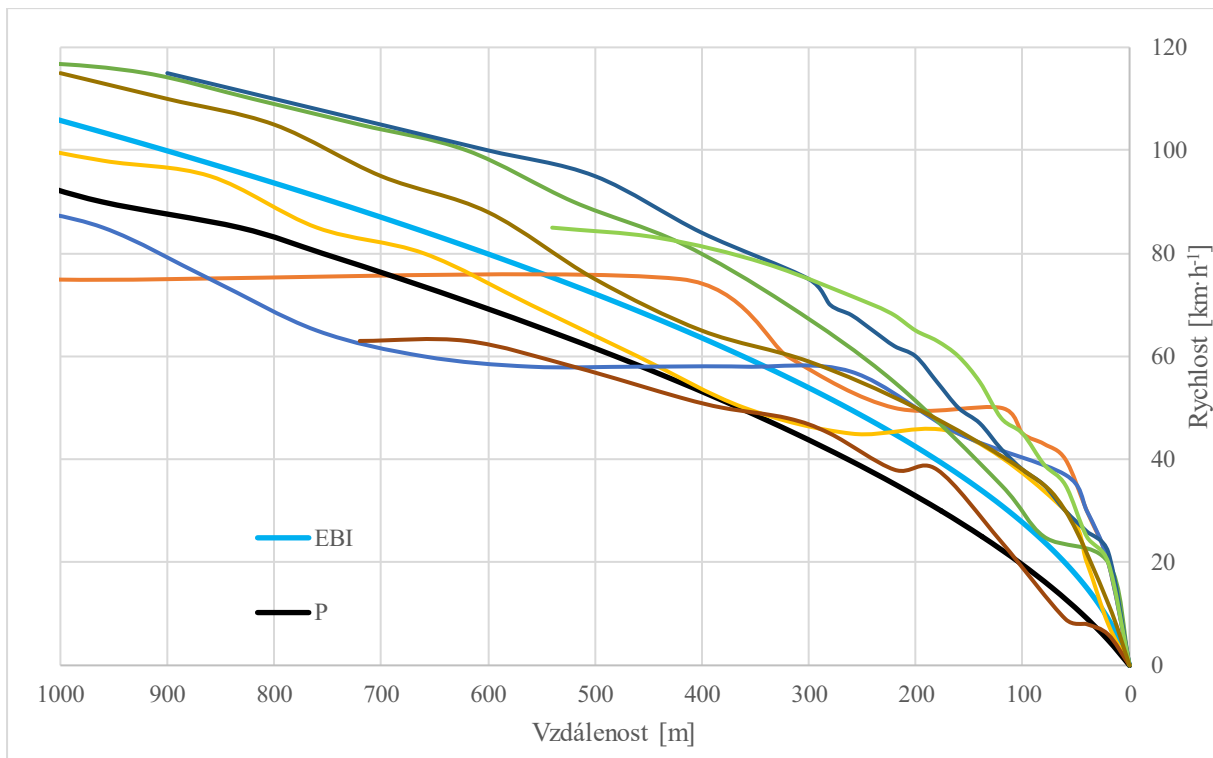


Obrázek 35 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění Ex 145 Landek a křivek ETCS
Zdroj: autor na podkladě dat ČD, a.s. a (47)

Osobní vlak společnosti ČD

Podobně jako u vlaku expresního segmentu byl vypracován průběh brzdění také pro vzorek dat z oblasti segmentu osobní příměstské dopravy. Konkrétně pak vlak Os 5010 (99 brzdících procent, 229 tun)⁹⁹. Zde bylo k dispozici 8 měření a také zde byly reálné průběhy brzdění konfrontovány s brzdou křivkou ETCS dle ERA tool. Srovnání je zaznamenáno na obrázku 36.

⁹⁹ Tento vlak byl zvolen jako typický zástupce hnacího vozidla (stejnoseměrná lokomotiva rok výroby cca 1991 bez ETCS) a osobních vozů běžné stavby s kotoučovými brzdami používaných v příměstské osobní dopravě.



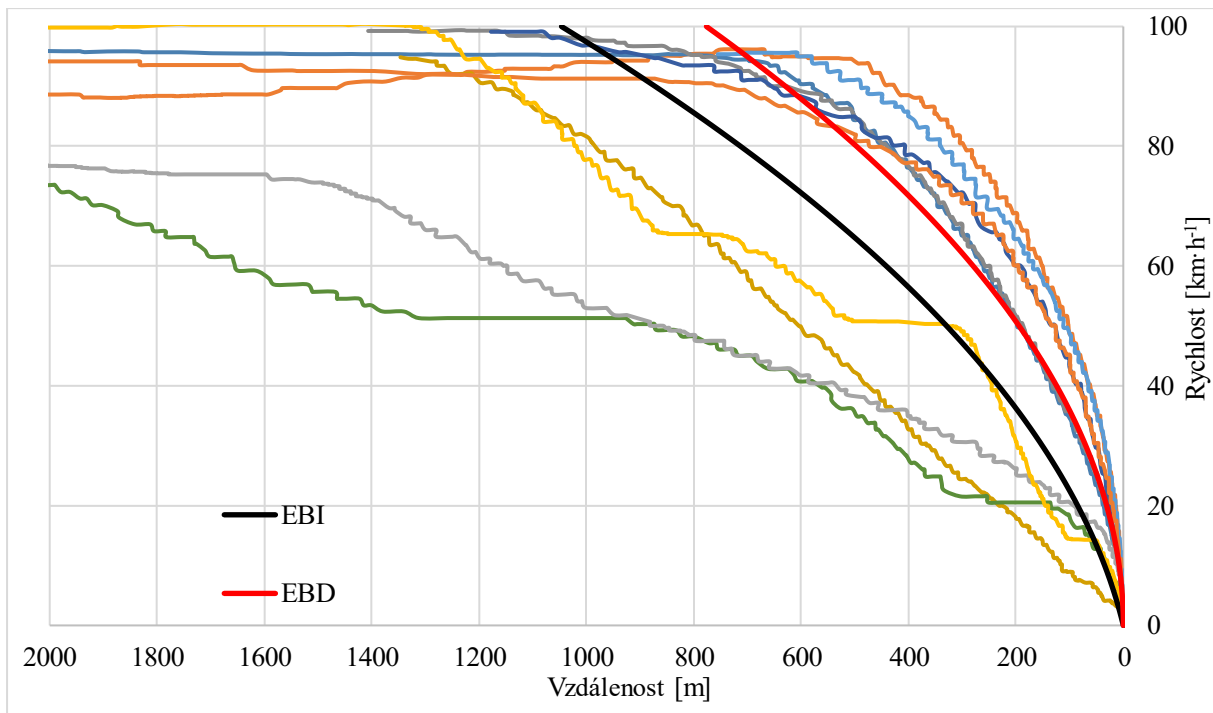
Obrázek 36 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění Os 5010 a křivek ETCS

Zdroj: autor na podkladě dat ČD, a.s. a (47)

Také z obrázku 36 je prokazatelně vidět, že brzdění reálného strojvedoucího je zejména v oblasti do 200 metrů od hlavního návěstidla nad oběma křivkami ETCS. V praxi to opět bude znamenat delší čas, který bude potřebný na zastavení vlaku, což může negativně ovlivnit provozní intervaly a snížit tak kapacitu nástupištních hran či zhlaví stanic.

Data ze SW EVA2 společnosti METRANS Rail

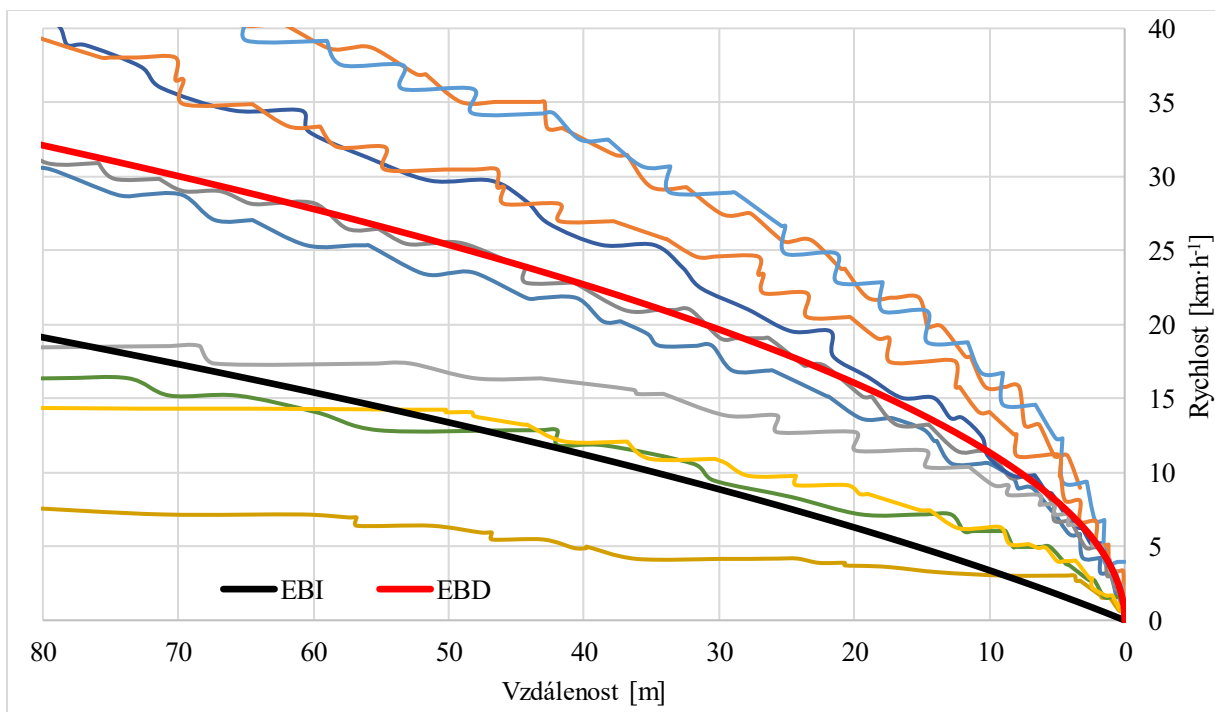
Společnost METRANS Rail poskytla autorovi obsáhlou sadu dat z provozu jejich hnacích vozidel řady 186 a 386. Zároveň byl k dispozici také vyhodnocovací SW EVA2, který slouží jako zobrazovač naměřených dat a umožňuje export těchto dat do tabulkového editoru MS Excel. Cílem analýzy těchto dat bylo srovnání brzdění vlaku v běžném provozu bez ETCS a jeho následné proložení křivkami *EBD* a *EBI* pro ETCS. Byl vybrán vzorek 10 měření, která zahrnují různé typy brzdění – běžné provozní, s výběhem, s jízdou odbočkou. Z obrázku 37 je vidět, že v případě, kdy strojvedoucí dojížděl k hlavnímu návěstidlu bez předchozí jízdy odbočkou nebo výrazným výběhem se ve všech případech dostal svou jízdou za křivku *EBI* i za křivku *EBD*. V praxi to bude znamenat tolik, že strojvedoucí bude muset dodržovat limity omezené černou křivkou a výrazně se tak prodlouží jeho proces zastavování s negativním vlivem na provozní intervaly či mezidobí. Pro potřeby habilitační práce si autor vytvořil model v prostředí MS Excel, který dokáže simulovat tvorbu brzdných křivek. Tyto křivky (*EBD*, *EBI*, *SBI*, *W* a *P*) jsou pak vloženy do obrázků k datům zjištěným z praxe.



Obrázek 37 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění vlaků METRANS a křivek ETCS

Zdroj: autor na podkladě dat METRANS a (47)

Na obrázku 38 je pak detail obrázku 37, ze kterého lze vyčíst, že zhruba 80 metrů před návěstidlem bude muset strojvedoucí dodržet rychlost nejvýše asi 20 km·h⁻¹. V současné době má tuto rychlost na rychloměru přibližně 15 až 30 metrů před návěstidlem.

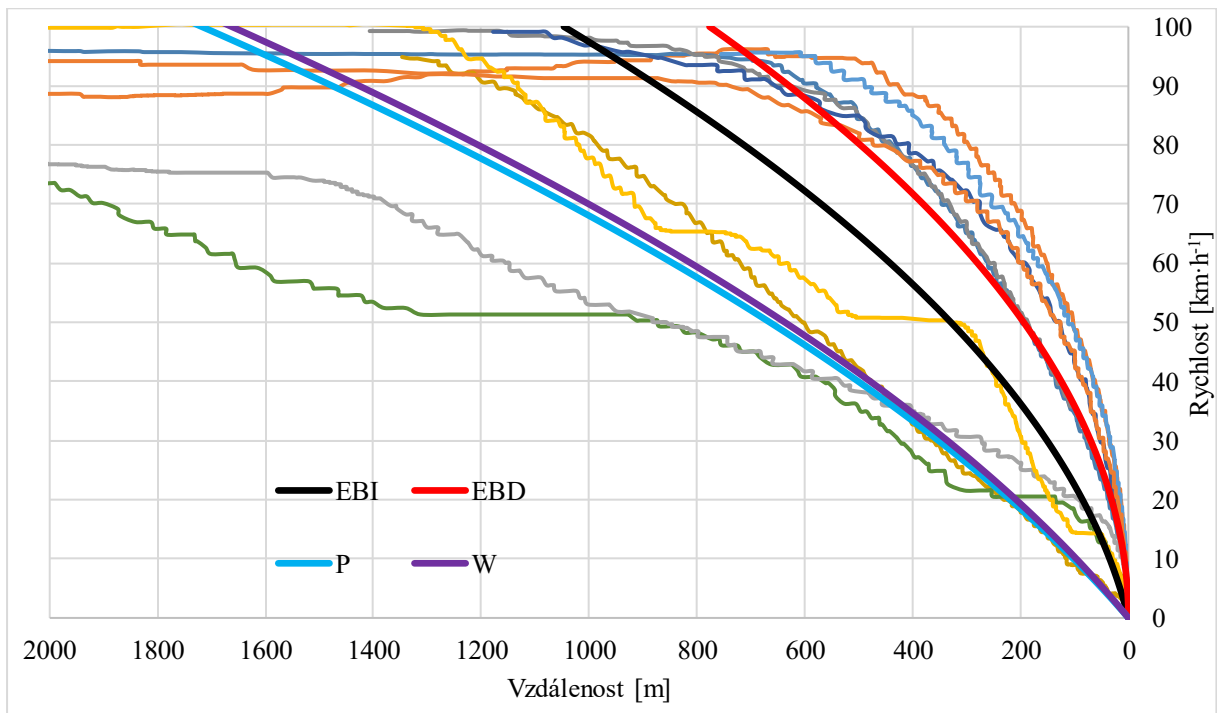


Obrázek 38 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění vlaků METRANS a křivek ETCS – detail pro přiblížení k návěstidlu

Zdroj: autor na podkladě dat METRANS a (47)

Kromě křivek *EBD* a *EBI* je ale pro bezpečnost provozu mnohem důležitější křivka *P*, která se zobrazuje na DMI a navádí strojvedoucího k bezpečnému snížení rychlosti. Právě tato

křivka tvoří rozhraní mezi bezpečným vedením vlaku a možnou mimořádnou událostí. Křivky P , W a EBI tak slouží jako mantinely, ve kterých se má strojvedoucí pohybovat v rámci bezpečnostní rezervy pro provedení všech úkonů potřebných k zahájení brzdění. Pro ideální srovnání limitních křivek ETCS a práce současného strojvedoucího je tak lépe použít ke srovnání právě křivky P , W a EBI . Na obrázku 39 je toto srovnání pro stejná brzdění v vlaku, jako je tomu na obrázku 34, pouze byly navíc přidány křivky P a W . Pro lepší přehlednost byl tento graf zařazen do samostatné přílohy D.



Obrázek 39 Úprava obrázku 37 pro křivky P a W

Zdroj: autor na podkladě dat METRANS a (47)

Ze srovnání obrázků 37 až 39 vyplývá, že křivka EBD se v řadě případů přibližuje způsobu brzdění strojvedoucího. Hlavní omezení z využití systému ETCS, ale pochází z přepočtu EBD na EBI a také v úpravě $a_{brake_emergency}$ na a_{brake_safe} . Je tedy potřeba si položit otázku: **Není možné upravit odvozené křivky ETCS (zejména P a EBI) a snížit tak negativní efekt pro provozní charakteristiku železničního subsystému?** Odpověď na tuto otázku se snaží hledat tým pod vedením Ing. Jakuba Marka, Ph.D. ze společnosti AŽD Praha, s.r.o. (71). Jeho tým na základě svých výzkumů docílil otevření této otázky na úrovni UNISIG Braking curves, kde pomocí CR's pracují na změně výpočtu odvozených křivek. Hlavním předpokladem, který logika a matematika výpočtu brzdných křivek ETCS nezohledňuje je fakt, že vozidlo již brzdí, tedy, že strojvedoucí zahájil úkony potřebné ke snížení rychlosti či zastavení vlaku. Své poznatky shrnuli v literatuře (14) a (72). Z jejich výzkumu vyplývaly

možné úpravy bezpečného odrychlení (a_{brake_safe}) pro výpočet brzdné křivky. V současnosti se používá vzorec pro výpočet a_{brake_safe} , dle literatury (41) jako vztah 9.

$$a_{brake_safe} = K_{v_int}(V) \cdot K_{r_int}(L_TRAIN) \cdot a_{brake_emergency} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (9)$$

Kde:

a_{brake_safe}bezpečné odrychlení [$m \cdot s^{-2}$],

$a_{brake_emergency}$nouzové odrychlení [$m \cdot s^{-2}$],

$K_{v_int}(V)$korekční faktor závislý na rychlosti [-],

$K_{r_int}(L_TRAIN)$korekční faktor závislý na délce vlaku [-].

Proměnné s počátečním písmenem K ve vztahu 9 jsou korekční faktory závislé na rychlosti a délce vlaku, a je možné je upravovat v mezích stanovených Subsetem jako součást národních hodnot. V základním (defaultním) nastavení jsou tyto faktory nastaveny na $K_{v_int} = 0,7$ a $K_{r_int} = 0,9$. Po dosazení do vztahu 9, tak vychází vztah 10.

$$a_{brake_safe} = 0,7 \cdot 0,9 \cdot a_{brake_emergency} = 0,63 \cdot a_{brake_emergency} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (10)$$

Je tak vidět, že z pohledu ETCS je bezpečné odrychlení to, které nedosahuje ani dvou třetin odrychlení, jež lze vypočítat na základě znalosti brzdících procent. V literatuře (14) tak autor stanovil (na základě praktických výpočtů, výzkumu a provozních zkušeností) novou hodnotu korekčního faktoru $K_{v_int_JaM}$ a to pro nákladní vlaky na hodnotu 1,32. Po dosazení do vztahu 9 tak lze nově vytvořit vztah 11.

$$a_{brake_safe_JaM} = 0,7 \cdot 1,32 \cdot a_{brake_emergency} = 0,924 \cdot a_{brake_emergency} [m \cdot s^{-2}] \quad (11)$$

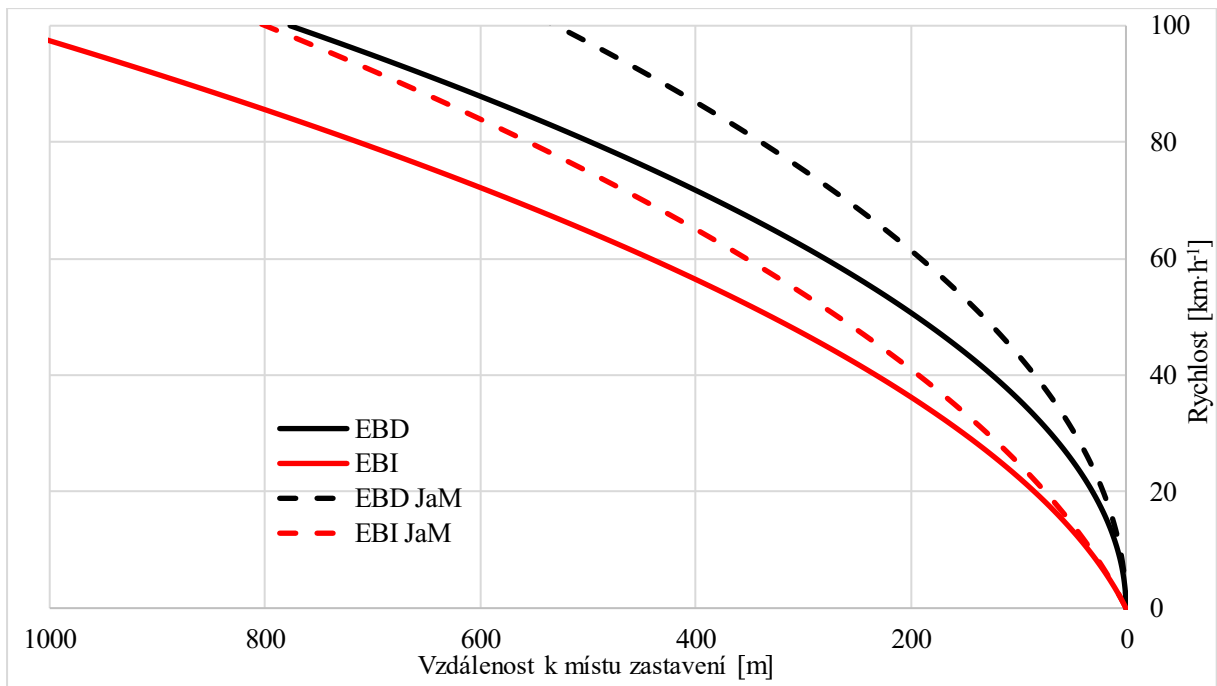
Kde:

$a_{brake_safe_JaM}$bezpečné odrychlení dle literatury (14) [$m \cdot s^{-2}$],

$a_{brake_emergency}$nouzové odrychlení [$m \cdot s^{-2}$].

Hodnota bezpečného odrychlení se tak zvýšila o cca 20 %. Aplikací tohoto postupu na data z rychloměrů společnosti METRANS a dosazením $a_{brake_emergency}$ pro konkrétní případ¹⁰⁰ ($a_{brake_emergency} = 0,7885 m \cdot s^{-2}$) do vztahu 11, vyjde hodnota nového a_{brake_safe} . Hodnota upraveného bezpečného odrychlení $a_{brake_safe_JaM}$ je tak $0,7286 m \cdot s^{-2}$ a na obrázku 40 je zachycen posun původní křivky EBD (černá) do nové polohy EBD_{JaM} (černá čárkovaná). Stejně tak je zobrazena původní a nová křivka EBI_{JaM} (červená). Tímto způsobem bude moci strojvedoucí dojíždět ke konci MA vyšší rychlostí. Správné nastavení NV ETCS je tak významným prvkem v udržení současné propustnosti české železniční infrastruktury.

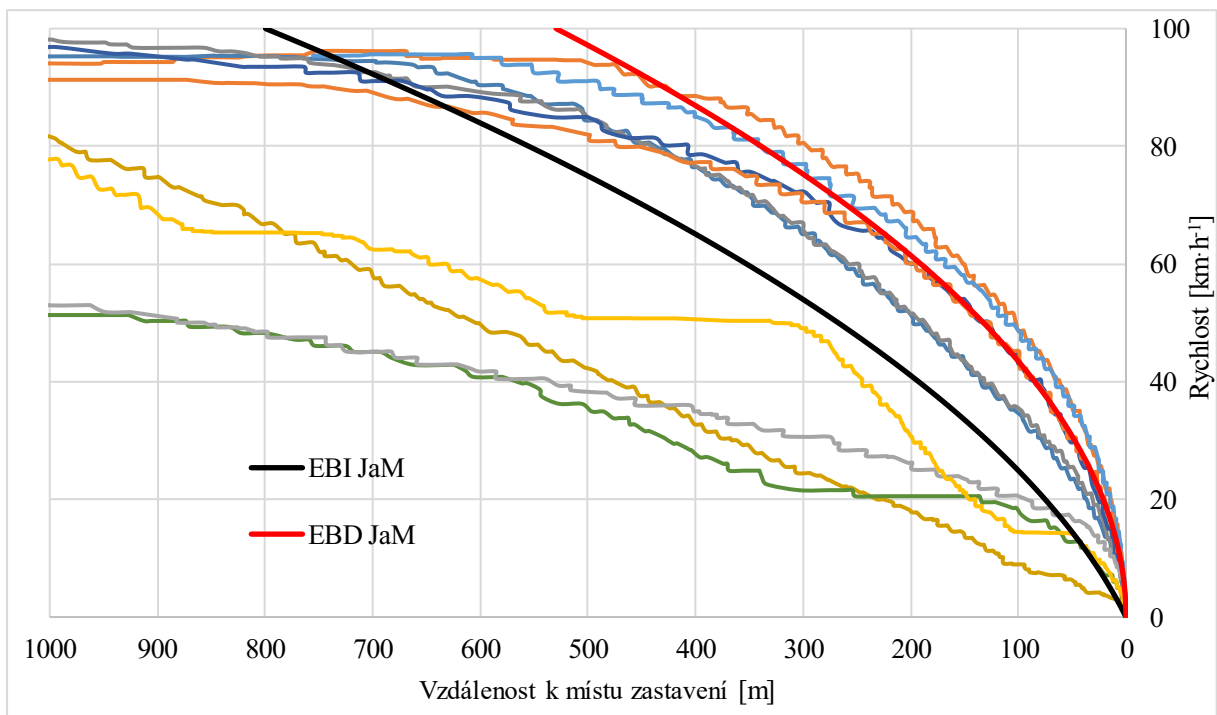
¹⁰⁰ Vlak společnosti METRANS – 95 brzdících procent, L = 620 metrů, nákladní vlak s brzdou v poloze P



Obrázek 40 Srovnání původní křivky EBI (černá) a EBD (červená) po úpravě dle (14)

Zdroj: autor na podkladě dat METRANS a (47)

Při pohledu na obrázek 40 je zřetelné, že rozdíl obou křivek se zvětšuje s rostoucí rychlostí a pozitivní efekt se vytrácí pod hranicí 20 km·h⁻¹, což je zároveň uvažovaná hladina při využití uvolňovací rychlosti. Porovnání těchto upravených křivek s reálnými brzdnými křivkami vlaků je zachyceno na obrázku 41.

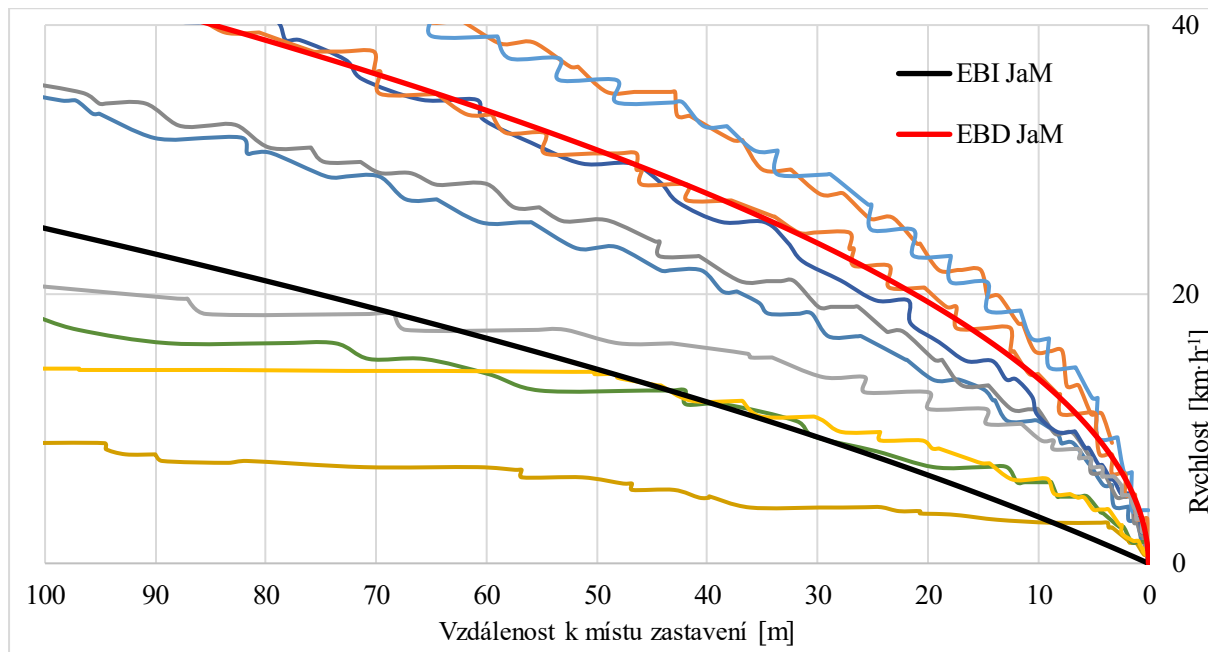


Obrázek 41 Srovnání nové křivky EBI_{JM} (modrá) s daty od společnosti METRANS

Zdroj: autor na podkladě dat METRANS a (47)

Úprava odrychlení $a_{brake_safe_JaM}$ na 0,7286 m·s⁻² posunula křivku EBD_{JaM} více do středu hodnot z měření od společnosti METRANS, ale stále je zde velká skupina měření, která jsou od

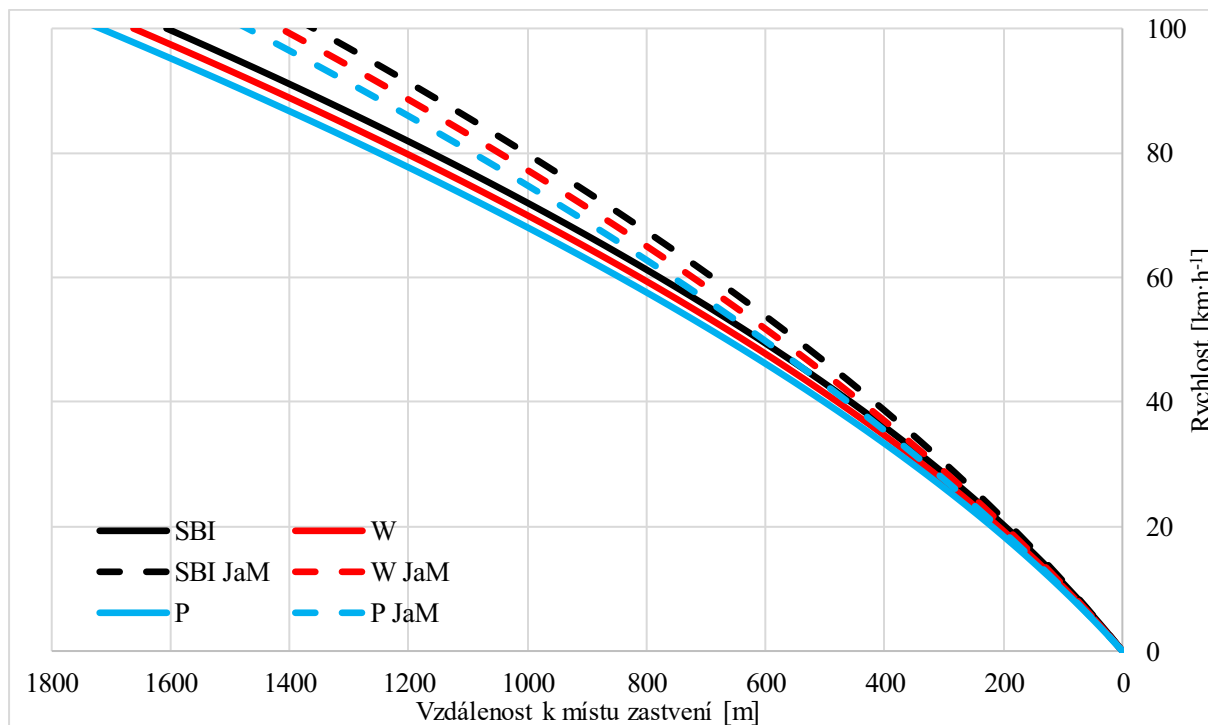
této křivky napravo a tyto vlaky tak dosahovaly konce MA rychleji, potažmo efektivněji. Nejlépe je to vidět v detailu na obrázku 42.



Obrázek 42 Detail srovnání křivek z obrázku 38

Zdroj: autor na podkladě dat METTRANS a (47)

Na obrázku 42 je srovnání původních křivek *SBI*, *W* a *P* a pomocí Markovy metody. Pro větší přehlednost je tento obrázek v příloze E.

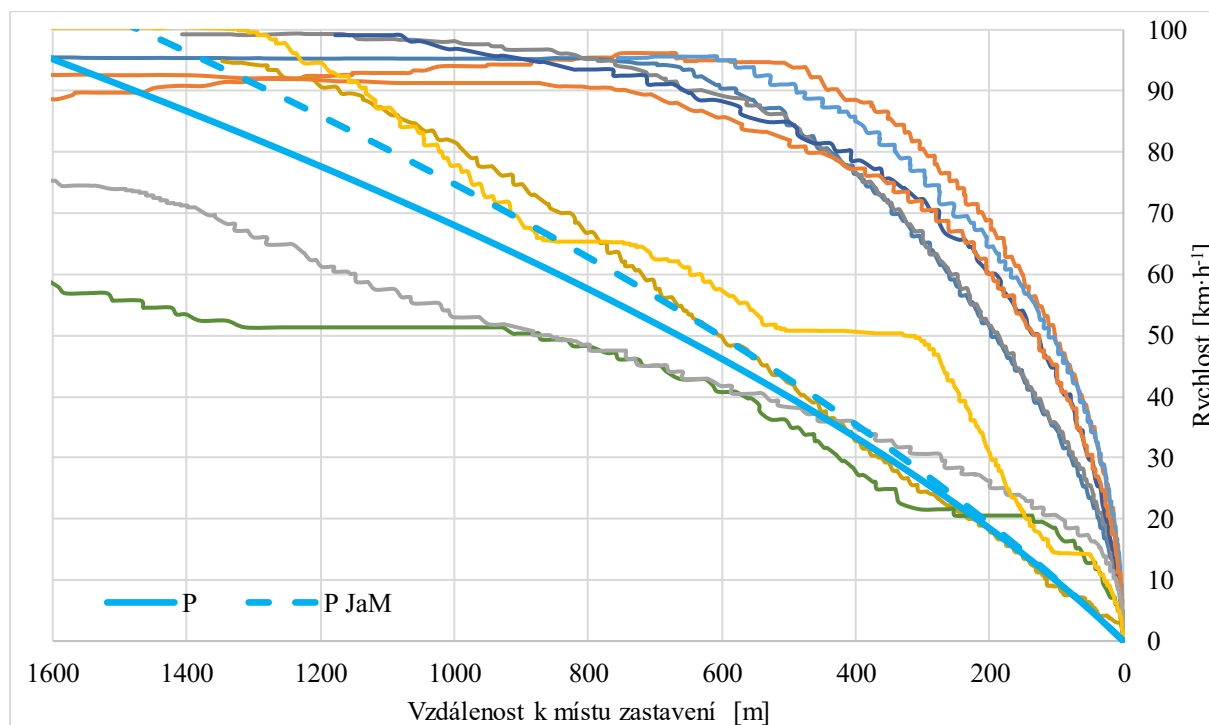


Obrázek 43 Srovnání původních křivek *SBI*, *W* a *P* a křivek dle JaM

Zdroj: autor

Z obrázku 43 je patrné, že zejména ve vyšších rychlostech je rozdíl mezi současným stavem a metodou JaM poměrně značný. U rychlosti $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ je to přibližně 200 metrů. Další

relevantní srovnání je pak na obrázku 44, kde jsou původní data od společnosti METRANS proložena křivka P a P_{JaM} , Srovnání všech brzdných křivek je v příloze F.



Obrázek 44 Srovnání brzdění vlaků společnosti METRANS a původní křivky P a upravené P_{JaM}
Zdroj: autor na podkladě dat METRANS

Tato úprava brzdného modelu dle Marka, tedy výrazně zlepšuje tvar brzdné křivky zejména ve vyšších rychlostech, což zkracuje především celkovou dobu brzdění. V oblasti rychlostí pod $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ je však tento efekt již minimální. Jedním z možných řešení je tak aplikace release speed. Další bezpečnostně relevantní úpravy brzdných křivek jsou možné pouze změnami, které musí být podloženy průkazem bezpečnosti. Jednou z diskutovaných možností je také změna pohledu na dobu náběhu brzdy.

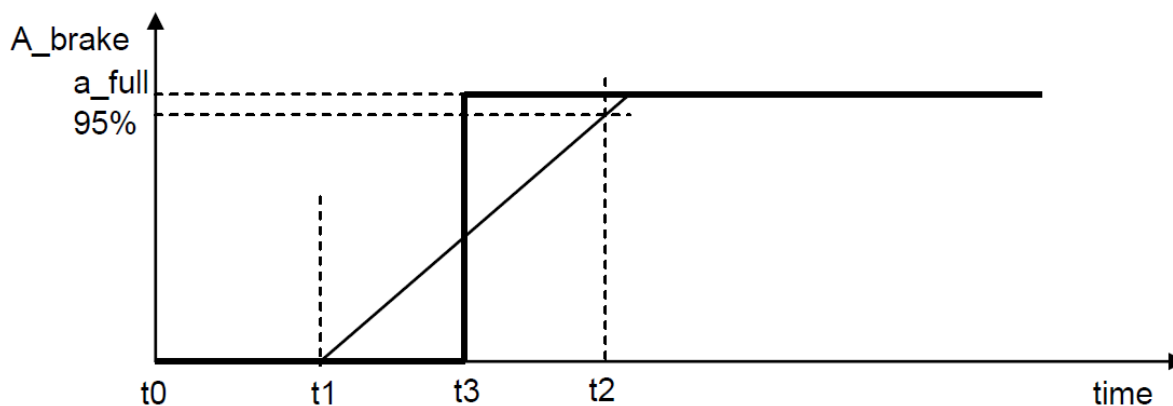
3.3 Náběh brzdného účinku

Brzdění vozidel je vždy závislé na velikosti brzdného účinku, ale také na rychlosti, s jakou je tento brzdný účinek vyvinut a na vstupní rychlosti, ze které se začíná brzdit. Nejlépe o této problematice pojednává literatura (73). Tato kniha je sice již 50 let stará, avšak velmi cenná popisem matematické zákonitosti brzdění vlaků při použití špalíkových a kotoučových brzd. Ve svých výpočtech se opírá o provedené praktické zkoušky, na základě, kterých byly stanoveny vzorce pro výpočet brzdného účinku či doby náběhu brzdy. I v této oblasti totiž existují výrazné rozdíly mezi praxí a matematickým vyjádřením náběhu brzdy pod dohledem ETCS. V literatuře (73) jsou jednotlivé fáze brzdění ohraničeny:

- Přestavením brzdíče do brzdící polohy až po přilehnutí zdrží prvního vozidla,
- Fází postupného přiléhání brzd ostatních vozidel vlaku,

- Od okamžiku kdy přítlak zdrží prvního vozidla dosáhl maxima, až po zastavení vlaku.

Oproti tomu v případě ETCS se celý proces matematicky řídí Subsetem 026-3, kde je uveden obrázek 45.

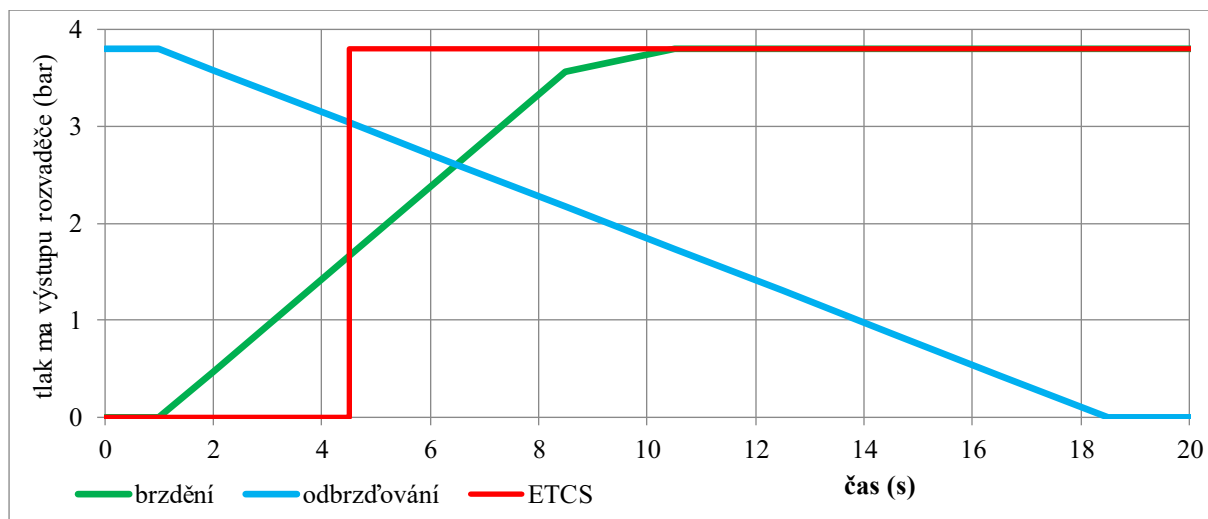


Obrázek 45 Doba náběhu brzdy dle Subsetu 026-3

Zdroj: (41)

První a třetí fáze jsou tedy stejné, ale u druhé fáze dochází v případě ETCS k výraznému zjednodušení – nedochází k postupnému nárůstu brzdového účinku, ale vlak polovinu času náběhu brzdy (snižování tlaku v brzdovém válci) nebrzdí vůbec a druhou polovinu času brzdí plným účinkem. Toto zjednodušení je matematicky opodstatnitelné, ale z pohledu praktické realizace působí značné rozdíly v očekávaném (dle ETCS) a reálném chování systému.

Velikost tohoto rozdílu je dána především způsobem brzdění vlaku. Pro ilustraci je uveden pouze rozdíl mezi I. a II způsobem brzdění, konkrétně pak režimy *P* a *G*. Hlavní rozdíly jsou pochopitelně v době plně ní a vyprazdňování brzdových válců. Zatímco brzda v režimu *G* plní brzdový válec v rozmezí 18 a 30 sekund, režim *P* plní brzdový válec 6 až 10 sekund. Obdobné je to u vyprazdňování, kde dosahuje režim *G* hodnot 45 až 60 sekund, zatímco režim *P* pouze 15 až 20 sekund. Reálný průběh plnění a vyprazdňování brzdového válce v režimu brzdy *P* je znázorněn na obrázku 43. Při srovnání obrázků 45 a 46 je patrný značný rozdíl v dynamické charakteristice obou náběhů brzd. Do obrázku 46 byla pro lepší orientaci vložena také červená křivka náběhu brzdy dle ETCS. Obdobná situace je u brzdy v režimu *G*. Tam je ale pochopitelně náběh brzdy nepoměrně delší.



Obrázek 46 Dynamická charakteristika rozvaděče v režimu P

Zdroj: autor na podkladě konzultací s Ing. Pohlem

Jaký je však důsledek toho rozdílu ve tvaru obou křivek? Předně je třeba uvést, že z pohledu bezpečnosti je spíše restriktivnější. Na druhou stranu se odklání od reality brzdění vlaku, což může způsobovat provozní problémy. Pro lepší pochopení celé problematiky byla sestavena tabulka 5, kde jsou uvedeny rychlosti, jaké má vlak s postupně nabíhající brzdou ve chvíli, kdy uplyne doba t_0 až t_2 a také t_0 až t_3 z obrázku 45. Tedy jakou rychlost má vlak v okamžiku, kdy začne dle ETCS účinkovat provozní brzda. V tabulce 5 jsou porovnány dva nejběžnější způsoby brzdění P a G.

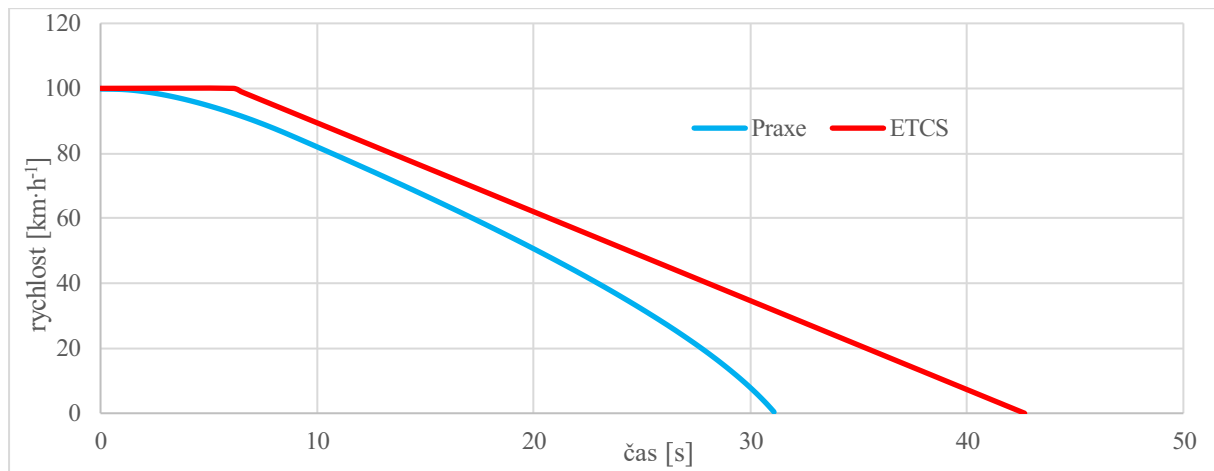
Tabulka 5 Srovnání různých způsobů náběhu brzdy

Vstupní rychlost [km·h ⁻¹]	Brzda v režimu P		Brzda v režimu G	
	Rychlost v čase t_2 [km·h ⁻¹]	Rychlost v čase t_3 [km·h ⁻¹]	Rychlost v čase t_2 [km·h ⁻¹]	Rychlost v čase t_3 [km·h ⁻¹]
20	6,6	17,0	vlak stojí	vlak stojí
40	30,2	37,3	vlak stojí	21,2
60	58	58,0	vlak stojí	44,4
80	78,1	72,4	30,0	65,9
100	98,1	98,1	55,6	86,8

Zdroj: autor na podkladě konzultací s Ing. Pohlem

Z uvedené tabulky 5 vyplývá, že zejména u režimu brzdění G je rozdíl mezi realitou a přístupem dle ETCS velký, a to pak výrazně více u brzdění z nižších rychlostí, typicky u brzdění po jízdě odbočkou z rychlosti 40 km·h⁻¹, kdy už vlak prokázal schopnost brzdít. Brzdění strojvedoucím takového vlaku je zatíženo tím, že pokud strojvedoucí začne snižovat tlak v hlavním potrubí a plnit brzdový válec dle instrukce ETCS, tak ve chvíli, kdy ETCS předpokládá, že začíná plně účinkovat provozní brzda, má již v reálu vlak poloviční rychlost.

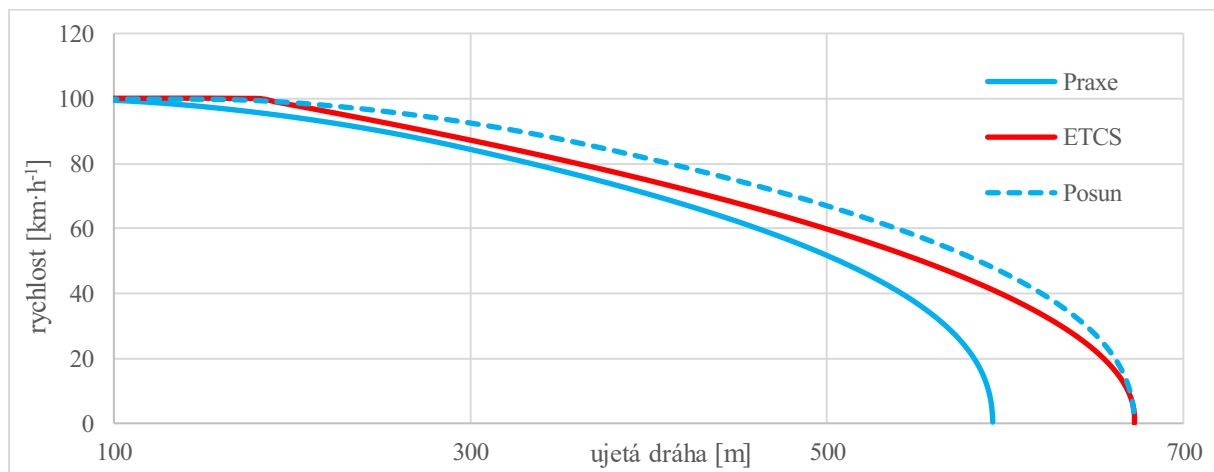
To neovlivňuje pouze dráhu, ale také čas, který potřebuje vozidlo k zastavení (uvolnění zadního zhlaví atp.). Rozdíl v obou přístupech je dobře patrný na následujícím příkladu pro brzdu v režimu *P*. Na obrázcích 47 a 48 jsou závislosti rychlosti na čase, resp. dráze. Modrou barvou je průběh vytvořený na základě současné praxe náběhu brzdy a brzdění. Červeně pak model dle ETCS.



Obrázek 47 Závislosti rychlosti na čase pro reálný model a ETCS

Zdroj: autor na podkladě konzultací s Ing. Pohlem

Doba zastavení je v současnosti rovna 31,10 sekundy. U ETCS je tento čas 42,67 sekundy, z čehož 6,12 sekundy tvoří vlastní náběh brzdy, tedy čas od vydání povelu do začátku brzdícího účinku. Také dráha se u obou přístupů liší (obrázek 48). Zatímco u současného přístupu je brzdící dráha rovna 593 metrům, tak v případě ETCS je to 676 metrů.



Obrázek 48 Závislosti rychlosti na ujeté dráze pro reálný model a ETCS

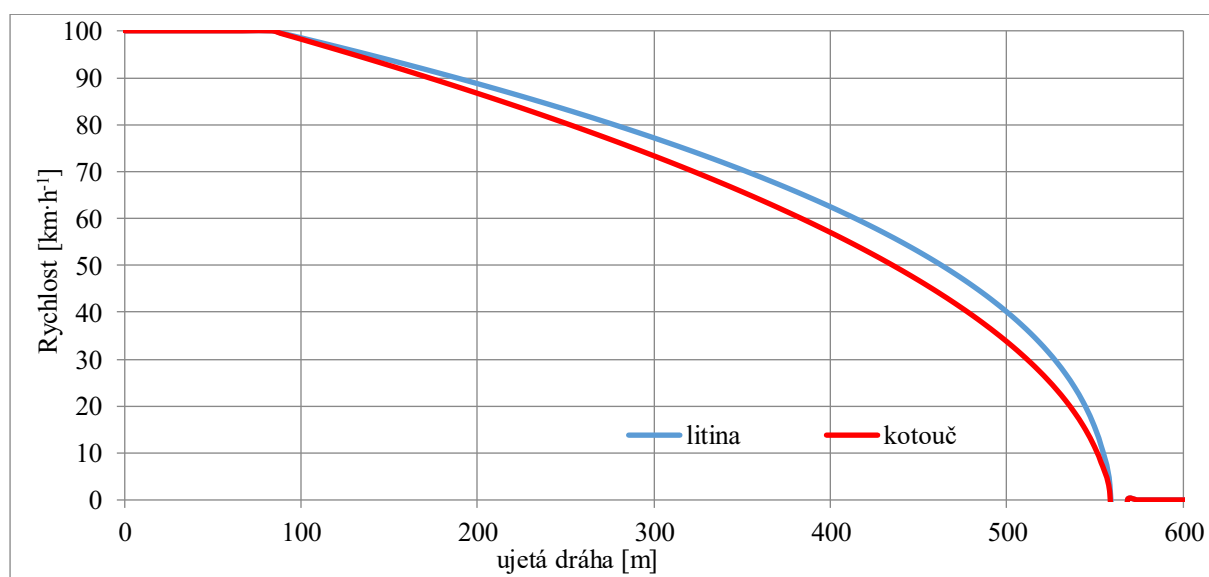
Zdroj: autor na podkladě konzultací s Ing. Pohlem

Do obrázku 48 byla ještě přidána čárkovaná křivka modré barvy, která znázorňuje posunutí modré křivky do místa, kde se červená křivka dotýká osy X. Rozdíl mezi těmito křivkami pak můžeme chápat jako omezení brzdění pod dohledem ETCS.

3.4 Průběh brzdného účinku

Kromě doby náběhu brzdy je pro správné určení průběhu brzdění také důležité, o jaký typ brzdy se jedná, zda špalíkovou nebo kotoučovou a také z jakého materiálu jsou brzdové špalíky vyrobeny. To vše má přímý vliv na průběh brzdění vlaku, tedy tvar a délku brzdné křivky. Žádný z těchto parametrů však literatura (41) nezohledňuje.

Z pohledu Subsetů ETCS lze konstatovat, že s využitím špalíkové brzdy se příliš neuvažuje, a to zejména pokud je brzda v režimu P, tedy bez možnosti zvýšení přitlaku brzdových špalíků na kola. Důvodem je, že se jedná spíše o vozidla starší, u kterých se nepředpokládá masivní provoz pod dohledem ETCS, dále pak hraje roli plnění hlukových norem dle TSI NOI či TSI WAG. Rozdílný je zejména průběh odrychlení špalíkové a kotoučové brzdy. Obecně se tedy příliš neliší brzdná dráha jako taková, ale liší se průběh brzdného účinku, tedy tvar brzdné křivky. Nejlépe je to patrné na obrázku 49, kde je zachycen graf závislosti dráhy na rychlosti pro srovnání litinového špalíku (modrá křivka) a kotoučové brzdy (červená křivka).



Obrázek 49 Závislosti okamžité rychlosti na dráze pro litinový špalík a kotouč

Zdroj: autor na podkladě (73)

Pokud je tedy dráha stejná a průběh jiný je jasné, že v průběhu brzdění musí na obě brzdy působit rozdílné tlaky (přítlak) a tím je pak rozdílný také součinitel tření. Součinitel tření je přímo závislý na rychlosti vlaku a také na přitlaku na zdrž. Tyto vztahy byly stanoveny empiricky pro různé kombinace materiálů špalík-kolo. Vztah 12 je závislost třecí síly f na rychlosti V a přitlaku na zdrž N pro šedou litinu a ocelové kolo. Nevýhodou tohoto vyjádření je absence zohlednění teploty špalíku, neboť jinak bude při stejné rychlosti brzdit vlak se studeným špalíkem a jinak se špalíkem zahřátým předchozím brzděním.

$$f = 0,6 \cdot \frac{16 \cdot N + 100}{80 \cdot N + 100} \cdot \frac{V + 100}{5 \cdot V + 100} \quad [-] \quad (12)$$

Kde:

fvelikost třecí síly [-],

Npřítlak špalíku na zdrž [Mp],

Vrychlost vlaku [km·h⁻¹].

Kromě součinitele tření se pomocí experimentu zjišťovala také velikost součinitele adheze. Určení velikosti součinitele adheze v konkrétních podmínkách a v konkrétním místě na trati je stále velmi složité a pro systém jako je ETCS je zhora nemožné počítat aktuální velikost součinitele adheze nebo jej dokonce predikovat. Zůstávají tak v platnosti závěry, které jsou uvedeny v literatuře (73). Tedy že velikost součinitele adheze závisí zejména na:

- konstrukci vozidla,
- nápravovém tlaku,
- povrchu kolejnice a stavu jízdny plochy kola,
- rychlosti jízdy a
- povětrnostních podmínkách.

Měření různých výzkumných skupin vedlo ke stanovení empirických vzorců pro výpočet součinitele adheze μ . Známé jsou zejména Curtius-Kniffler (vztah 13) a Kother (vztah 14). Porovnání hodnot součinitele adheze pro oba způsoby výpočtu je v tabulce 6 a také na obrázku 49.

$$\mu = \frac{7500}{V+44} + 161 \quad [N \cdot kN^{-1}] \quad (13)$$

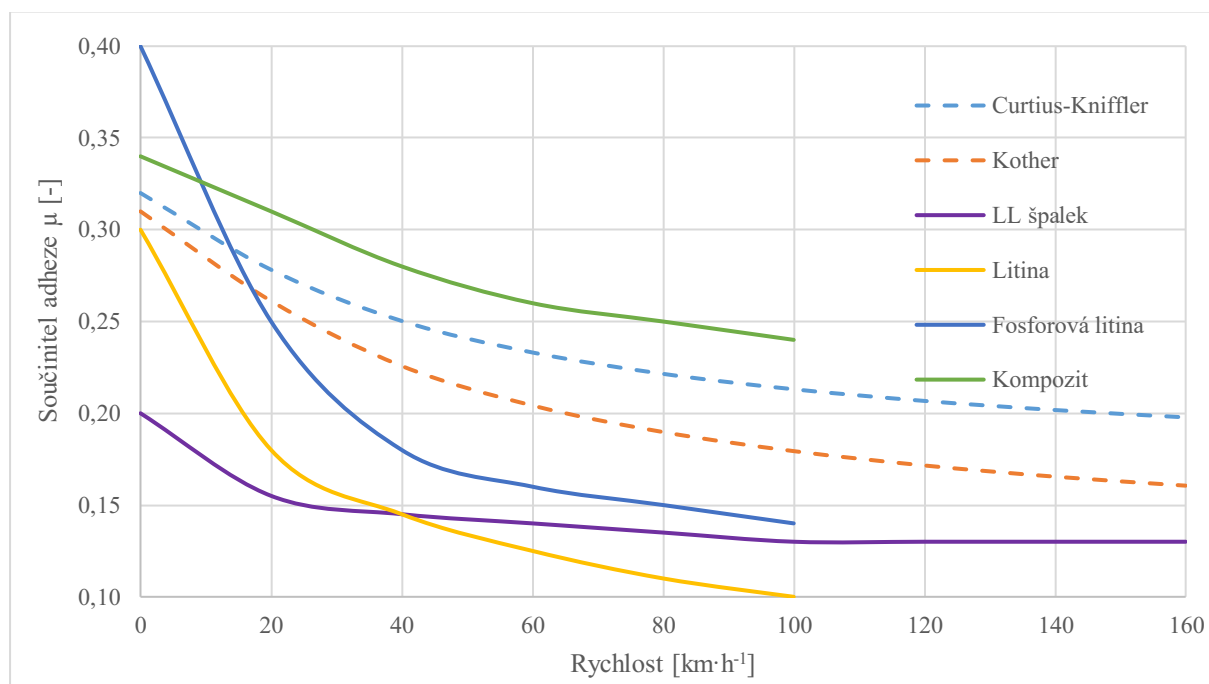
$$\mu = \frac{9000}{V+42} + 116 \quad [N \cdot kN^{-1}] \quad (14)$$

Tabulka 6 Srovnání součinitelů adheze

Rychlost [km·h ⁻¹]	Součinitel adheze μ [-]	
	Curtius-Kniffler	Kother
20	0,278	0,261
40	0,250	0,226
60	0,233	0,204
80	0,221	0,190
100	0,213	0,179
120	0,207	0,172
140	0,202	0,165
160	0,198	0,161

Zdroj: autor na podkladě (73)

K součinitelům adheze je pak dobré přidat ještě součinitele tření pro různé druhy materiálů, ze kterých jsou třecí plochy brzd vyrobeny. Společně jsou na obrázku 50.



Obrázek 50 Součinitel adheze a tření

Zdroj: autor na podkladě (73)

Vlivem zavádění TSI se na evropských železnicích začaly používat nekovové špalky typu LL. Jejich značnou výhodou je nižší hlučnost, nevýhodou pak mnohem vyšší měrná cena¹⁰¹ a také výrazně horší adhezní charakteristika (fialová křivka). Již v roce 2013 byla vydána příručka UIC (74), ve které se uvádí, že je nutné respektovat chování LL špalků, a to ve vztahu k nízkým vstupním rychlostem (brzdění z rychlosti nižší než 50 km·h⁻¹) a také v zimním období. Provozní zkušenosti totiž odhalily, že brzdné schopnosti těchto špalků výrazně klesají při nižší teplotě, tedy v zimě či při brzdění neohřátým špalkem (z nižší rychlosti). Taková dvojkolí potom měla tendenci se přebrzdňovat a smýkat se, což mnohdy vedlo k poškození ploch dvojkolí nebo vylamování částí špalků. Podobně o tomto problému hovořilo v roce 2016 opatření vydané společností ČD Cargo, a.s. (75). Zde byl uveden také graf, který zachycoval průběh součinitele adheze pro LL špalky. Na obrázku 49 je vidět jeho rozdílnost oproti špalkům kompozitovým. Bohužel však zatím neexistuje dostatek bezpečnostně relevantních provozních zkoušek, které by tuto skutečnost prokázaly, a tak tato opatření vychází především z provozních zkušeností dopravců. Z osobních konzultací autora

¹⁰¹ dle kalkulace Ing. Pohla vychází měrná cena za litinový špalek přibližně 0,032 Kč·vzkm⁻¹. U LL špalku pak cca 0,097 Kč·vzkm⁻¹.

vyplývá, že **fialová křivka** na obrázku 50 začíná v oblasti nižších rychlostí (méně než 50 km·h⁻¹) prudce stoupat a způsobuje výše zmíněné problémy.

Řešením je, jak již bylo uvedeno, širší užívání γ (gama) modelu brzdných charakteristik. Výhodou gama přístupu oproti λ (lambda) výpočtu je v tom, že se do palubní jednotky nezadáva pouze brzdící procento, ale celý průběh závislosti odrychlení na okamžité rychlosti vozidla. Zároveň by se při zjišťování gamma charakteristiky provedl průkaz přesných brzdných vlastností LL špalků.

3.5 Změna Subsetů

V kapitole 3.4 je zmíněn výzkum Jakuba Marka z AŽD Praha, s.r.o., který v literatuře (72) uvádí, že je možné upravit brzdný model na generické úrovni, tak aby lépe odpovídal reálnému brzdění vlaku. Výsledky tohoto výzkumu byly v kapitole 3.4 komparovány s reálnými daty a lze tak kvantifikovat účinek tohoto opatření. Další návrhy však již vyžadují úpravu Subsetů a také TSI. Na základě CR, které vycházejí z literatury (72) byla při UNISIG zřízena speciální skupina, kladoucí si za cíl dořešit tyto CR až do podoby změny Subsetů.

První ze zmiňovaných CR má číslo CR1385 a právě zde byla rozvíjena myšlenka z literatury (29), že dohledové limity je možné upravit podle reálného snižování rychlosti vlaku. Tedy pokud strojvedoucí reaguje na pokyny ETCS, tak není nutné jej upozorňovat varovnými zvuky ani barevnou indikací. Je to částečně i otázkou psychologie, ale postupné posouvání indikační značky až k místu konce MA je podstatným krokem k tomu, aby strojvedoucí jezdili blíže ke křivce P , než by tomu bylo v současné situaci. Na DMI se pak snižuje maximální rychlost dle Guidance křivky. Největší přínos tohoto přístupu je v oblasti malých rychlostí, kde se k sobě přibližují křivky I , P , SBI či EBI a kromě varování, se často zobrazuje již i upozornění na zásah nouzové brzdy. Při aplikaci tohoto přístupu by k tomuto nedocházelo, neboť systém by věděl, že vlak snižuje svou rychlost dostatečně a zastaví před koncem MA. Porovnání obou přístupů je na obrázku 51.

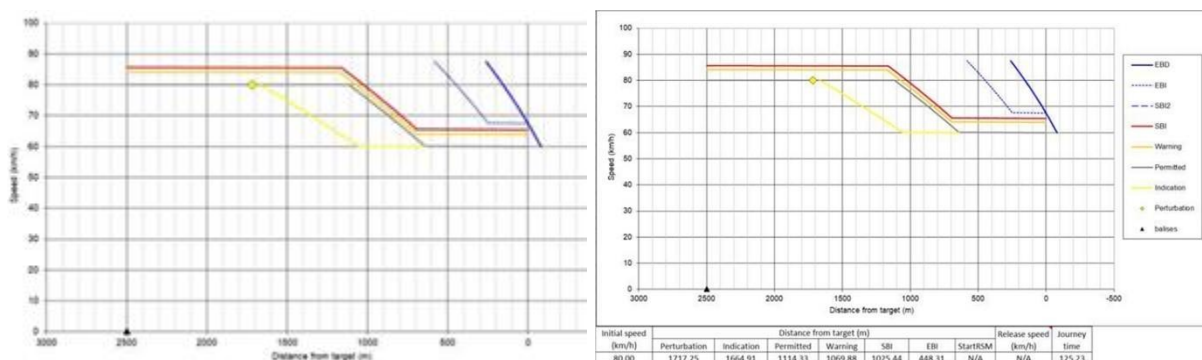


Obrázek 51 Porovnání současného stavu (vlevo) a po aplikaci CR1385 (vpravo)

Zdroj: (76)

Technicky se jedná o stejnou situaci, pouze na pravém obrázku již ETCS ví, že vlak brzdí a dopočítal si, že zastaví před koncem MA. Není tak potřeba zatěžovat strojvedoucího indikací žluté či červené barvy.

Druhým je CR1344, který pojednává o zkracování doby náběhu brzdy zprava, tedy mezi intervenční křivkou a křivkou *P*. Současné nastavení chování ETCS je takové, že si v každém okamžiku nechává rezervu pro náběh brzdného účinku. To však nereflktuje reálný stav, protože vlak, který již brzdí (naběhl mu brzdný účinek) nepotřebuje takovou rezervu mezi intervenční křivkou a indikací. V praxi to vytváří takovou situaci, že vlak, který má snížit svou rychlost, je nucen jet touto rychlostí již několik set metrů před začátkem omezení. To pak smazává nebo dokonce převrací do negativních hodnot jinou výhodu ETCS L2 a sice, že sníženou rychlostí je možné jet až od rozhodné výhybky, a nikoliv od návěstidla. V praxi (ERA tool) je tento rozdíl vidět na obrázku 52 a pro lepší přehled také v Příloze G.



Obrázek 52 Úprava doby náběhu brzdy zprava – současný stav (vlevo), aplikace CR1344 (vpravo)

Zdroj: podklady od Dr. Marka

Tento ilustrativní příklad od UNISIG ukazuje, že v návrhovém stavu bude nutné mít požadovanou rychlost cca 80 metrů od omezení rychlosti. Přínos tohoto opatření je shrnut v tabulce 7.

Tabulka 7 Srovnání dohledových limitů pro CR1344

	Současný stav	Návrh	Rozdíl
P [m]	1 114,33	984,94	129,39
W [m]	1 069,88	940,50	129,38
SBI [m]	1 025,44	896,06	129,38
EBI [m]	448,31	448,31	0,00
Doba jízdy [s]	125,23	121,68	3,55

Zdroj: emailová komunikace s Dr. Markem

Tabulka 7 ukazuje výraznou úsporu ve vzdálenosti dohledových limitů. V případě *SBI* je to 14,4 %. Nezanedbatelná je také úspora času. V tomto konkrétním případě se jedná o 3,55 s, což se při zohlednění toho, že se jedná o snížení rychlosti pouze o 20 km·h⁻¹ jeví jako významná hodnota.

3.6 Dílčí závěr

Odstranění očekávaných negativních efektů je možné spatřovat v úpravě brzdných křivek ETCS. Taková změna může být provedena buď úpravou parametrů brzdných křivek (viz. kapitola 2.2) pomocí CR, tedy změnou specifikací ETCS nebo změnou národních hodnot, tedy parametrů stanovených v Příloze A 3.1 Subsetu 026-3 v mezích, které tato příloha stanovuje. Každá taková změna národních hodnot je v kompetenci manažera infrastruktury a její odsouhlasení vyžaduje schválení AsBo. Oba tyto způsoby přinášejí vysoká očekávání, nicméně k jejich naplnění je třeba důsledné a úplné analýzy výpočtu brzdných křivek a dohledu nad zastavením vlaku. Významně se této otázce věnuje literatura (52). Jedná se tedy o hledání takových úprav, které povedou k vyššímu stupni zachování současných parametrů infrastruktury a nepovedou naopak ke kritickému snížení bezpečnosti. Změna národních hodnot je administrativně jednodušší, nicméně pokud nepovede ke kýženému efektu, bude třeba jít cestou CR. V průběhu let 2021 a 2022 se aplikovaly oba postupy současně. Bohužel chybí vyšší podpora ověření brzdných vlastností kolejových vozidel či ověřování úprav brzdných křivek, které jsou nutnými podmínkami pro jakoukoliv změnu v nastavení brzdných křivek.

Systém ETCS je totiž ve svém důsledku pouze vlakovým zabezpečovačem, jež dokáže zajistit dohled pouze na základě informací, které jsou mu poskytnuty (strojvedoucím, RBC, balízou, ...). Naproti tomu je tento systém vystaven působení dlouholetých zvyklostí a aspektů jednotlivých evropských manažerů infrastruktury, tudíž musí být dostatečně flexibilní, aby je dokázal všechny pojmout. Celkově se tak jedná o velmi složitý systém s násobnými rozhodovacími bloky a tyto všechny musí být pevně zakotveny v logice systému ETCS (interoperabilní vlastnosti, přenášené informace mezi mobilní a stacionární částí, ...). Mobilní

část systému pak musí dokázat zpracovat násobně vyšší počet parametrů, než je tomu u národních zabezpečovačů, a to vše v mnohem vyšším počtu pracovních stavů (módů). Vyjádřeno čistě matematicky se jedná zhruba o 16^2 přechodů mezi různými stavy systému. Praktické využití má přibližně polovina těchto přechodů¹⁰² (41), (46). Tyto předpoklady předurčily složitost systému ETCS už v jeho zárodku. Z pohledu systémového přístupu pak nelze zanedbat ani možnosti vzájemné kompatibility různých systémových verzí (22), (77).

¹⁰² Zajímavostí je, že pouze jeden z těchto stavů představuje samotné přenesení plné zodpovědnosti na systém ETCS. Ostatní slouží k přechodu mezi úrovněmi dohledu, uvolněním z dohledu, nastartováním systému, jízdou s omezenou zodpovědností či nestandardním stavem. Právě tyto stavy pak mají velmi často svá národní specifika.

4 PŘÍPRAVA NOVÝCH STAVEB A VYUŽITÍ SIMULACE

V kapitole 3 byly představeny pozitivní i negativní důsledky zavádění vlakového zabezpečovače ETCS do podmínek ČR. Zkušeností s jeho provozními aspekty se projevují nejen při plánování nových staveb na současné infrastruktuře, ale zejména při budování nových úseků, obzvláště pak vysokorychlostních tratí. Stavba na zelené louce umožňuje plně využít potenciál tohoto systému a zároveň minimalizovat negativní zkušenosti z konvenční železnice. Jako podpůrný prostředek bývá velmi často využívána simulace, která poskytuje možnost, jak v laboratorních podmínkách testovat různé provozní koncepty a scénáře. Důležitá je také stabilita navrženého grafikonu a jeho schopnost vyrovnat se se vstupním zpožděním.

4.1 Vliv ETCS na nové stavby

Významným krokem v této oblasti se stal metodický pokyn Správy železnic (78), a ve kterém jsou obsaženy základní pilíře, jež je nutné respektovat při přípravě a budování dalších staveb ETCS. V cílovém stavu je tak uvažováno pouze s výhradním provozem ETCS, dále mají být virtuální prostorové oddíly ETCS budovány v intervalu 400 až 1 000 metrů, aby bylo možné dosáhnout špičkového intervalu následné jízdy 90 sekund. Ve výhradním provozu je požadována minimalizace znalosti traťových poměrů vlakovým doprovodem nebo úprava předpisů tak, aby návěsní znaky byly zcela odlišné od těch na konvenční železnici. Další velký problém nastává se zaústěním přípojných tratí bez ETCS a provozem nevybavených vozidel na těchto tratích. Aby nebylo nutné i tyto tratě a vozidla vybavovat ETCS je doporučováno toto realizovat pomocí odvratných kolejí.

Také do zadávacích dokumentací veřejných zakázek se dostaly určité zásady pro kolejová řešení dopraven ve vazbě na ETCS, které vycházejí z Metodického pokynu (78) a jsou konkretizovány pro každou stavbu (79). V tomto seznamu je 18 obecných zásad, které se vzájemně doplňují, případně vylučují. Celkově je však tento seznam použitelný zejména pro úpravu stávající infrastruktury. Při budování nových úseků je lépe využívat maximálně parametrů ETCS a minimalizovat počet odchýlných a prostorově specifických řešení. Takto jsou například připravovány všechny úseky budoucí sítě VRT tratí (80). Důležitým aspektem budování VRT tratí je také správná organizace provozu na nich včetně dopravního modelu zastavování vlaků. I na VRT tratích mohou jezdit linky různých segmentů národní i mezinárodní dopravy a správná zastavovací politika může zvýšit atraktivitu celého systému (81). V praxi tedy mohou fungovat principy revenue managementu, a to v podobě nabídnutí správného vlaku, se správnou jízdou dobou, za správnou cenu cestujícím. Více se tento efekt projevuje u větších územních celků, než je Česká republika, ale v přeneseném významu lze tyto

postupy aplikovat také u nás. Obecně platí, že hlavním konkurentem VRT dopravy je letecká a individuální automobilová doprava. V rámci ČR se tento problém zužuje pouze na automobily. Nicméně po dokončení celého páteřního systému bude síť VRT konkurovat také letecké dopravě pro trasy typu Berlín/Drážďany/Praha – Vídeň/Bratislava/Budapešť nebo Praha/Vídeň/Bratislava/Budapešť – Varšava. Již předchozí projekty VRT ve světě potvrdily, že k převodu cestujících k VRT železnici dochází především z letecké, individuální automobilové a konvenční železniční dopravy. U konvenční železniční dopravy je převod cestujících přímo úměrný vzdálenosti mezi sídly. U letecké dopravy je to nepřímá úměrnost a u individuální automobilové dopravy existuje značná závislost na místních podmínkách a nelze vysledovat žádný konkrétní vzorec (82). Přehledně je vše vidět v tabulce 8.

Tabulka 8 Snížení objemu přepravených cestujících po zavedení VRT [%]

Linka		Vzdálenost [km]	Konvenční železnice	Letecká doprava	Individuální automobilová doprava
Z	Do				
Taipei	Taichung	160	-18	-100	-100
Řím	Neapol	222	-30	----	-1
Taipei	Jiayi	246	-21	-100	-17
Taipei	Tainan	308	-45	-84	-18
Taipei	Kaohsiung	345	-63	-80	-17
Madrid	Sevilla	470	-94	-57	-57
Paříž	Brusel	310	-10	-1	-20
Paříž	Lyon	410	-15	-7	-11

Zdroj: (82)

Literatura (82) také potvrzuje fakt, že vysokorychlostní doprava¹⁰³ konkuruje letecké dopravě v rámci Číny do cestovního času 6 hodin. V evropském kontextu je situace odlišná a vysokorychlostní doprava je konkurenceschopná do cestovního času 5 hodin (83).

4.2 Využití simulace

Jedním z prostředků, který se již etabloval při plánování rozvoje železničního subsystému, je simulace. Na modelu reálné infrastruktury si může manažer infrastruktury ověřit, jaké vlastnosti bude mít navržená infrastruktura při aplikaci očekávaného nebo jinak řečeno výhledového dopravního modelu. Tím je umožněno provádět úpravy v projektové dokumentaci dříve, než dojde k samotné realizaci stavby. Zároveň je také možné studovat a testovat stabilitu jízdního řádu při simulaci různých poruch (zpoždění, změna parametrů

¹⁰³ $v_{\max} = 300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

soupravy, adhezní podmínky atp.). Všechny tyto kroky pomáhají maximalizovat užitek z optimalizace dopravní infrastruktury či při výstavbě zcela nových úseků.

Dnešní trh disponuje širokou paletou simulačních software. Z těch běžně užívaných SW jsou to například OpenTrack (Švýcarsko), SMA+ (Švýcarsko), (MultiRail (USA), RAIL-SIM (USA), SIMONE (Holandsko), RailSys (Německo), DEMIURGE (Francie), RAILCAP (Belgie) nebo CMS (Velká Británie). Z těch, které jsou československé výroby je potřeba jmenovat SimuT a Villon. Hlavním požadavkem, který je na takový SW kladen, je použitelnost nebo nastavitelnost pro užití na konkrétní infrastrukturu s národními specifiky. Autor společně se svými kolegy používá již mnoho let SW OpenTrack, který byl vyvinut na ETH Zürich. U tohoto SW byla pomocí vědeckých i praktických projektů prokázána jeho využitelnost pro simulaci provozu na české železniční infrastrukturu. Veřejně je například dostupná studie (84), obsahující dvě sady dat. Jedna představuje obecný model infrastruktury a druhá mikroskopický model kodaňského metra. Oba tyto modely jsou po stažení přímo importovatelné do OpenTracku. Velmi malá velikost datového souboru pomáhá jeho snadné přenositelnosti. Mezi úlohy, které je možné pomocí tohoto SW řešit, patří také CBTC, ATP, ATO či všechny varianty ETCS. Využívání simulačních modelů v režimu „co se stane, když“ bylo využíváno již v 90. letech 20. století (85).

Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, je nezbytně nutné před využitím simulačního SW prokázat, že tento SW pracuje stejně jako reálný svět, tedy že výsledky, které poskytuje, jsou shodné s postupy, metodami a výsledky užívanými manažerem infrastruktury. Autor při své práci využívá SW pro mikrosimulaci OpenTrack. Tento SW byl použit i díky podpoře projektu POSITRANS¹⁰⁴ řešeného na DFJP UPa v letech 2018 až 2022. Autor byl součástí minitýmu, který zkoumal možnosti zvýšení kapacity tratí pomocí prodloužení staničních zhlaví. V rámci práce na projektu však autor zároveň pracoval (společně s Ing. Tischerem) na posouzení využití tohoto SW pro simulaci kapacity tratí v ČR a dále pro simulaci různých aplikačních úrovní ETCS. Jako hlavní parametr, který je jedním z nejběžnějších ukazatelů využívaných při tvorbě jízdního řádu, je následné mezidobí. To v praxi určuje nejmenší časový rozestup mezi vlaky stejného směru. Jeho velikost je závislá na rychlosti prvního vlaku, uspořádání a počtu traťových oddílů v mezistaničním úseku a také na typu staničního a traťového zabezpečovacího zařízení. Srovnáním výpočtu následného mezidobí dle národních směrnic *SŽDC Sm 124 – Zjišťování kapacity dráhy* (64) a *SŽDC Sm 104 – Provozní intervaly*

¹⁰⁴ Cooperation in Applied Research between the University of Pardubice and companies in the Field of Positioning, Detection and Simulation Technology for Transport Systems (PosiTrans)” project, registration No.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008394.

a následná mezidobí (63), a SW OpenTrack se zabývala literatura (86). Zde bylo na základě srovnání analytických výpočtů a provedené simulace prokázáno, že odchylka měření pomocí simulace (M^{OT}) je oproti oficiální směrnici provozovatele dráhy (M^{104}) méně než 2 %. Srovnání obou metodik bylo provedeno dle vzorce 13 a vyjádřeno v sekundách a procentech.

$$\Delta M = M^{OT} - M^{104} \quad [\text{s}] \quad (13)$$

Každá z hodnot následného mezidobí byla vypočítána dle samostatného vzorce. Pro M^{OT} platí vztah 14 a pro M^{104} vztah 15.

$$M^{OT} = \max(M_z^{OT}; M_p^{OT}) + d_{z1} \quad [\text{s}] \quad (14)$$

$$M^{104} = \max(M_z^{104}; M_p^{104}; M_{T_i}^{104}), \text{ kde } M_i^{104} = j_1 + r + p + j_2 + d \quad [\text{s}] \quad (15)$$

Proměnné v těchto vztazích zachovávají stejný význam jako v literatuře (63). Při práci na simulačním modelu bylo zjištěno, že SW OpenTrack není schopen respektovat (připočítat) k následnému mezidobí dohlednost návěstidel a výpravu druhého vlaku. Tato hodnota (d_{zi}) musí být připočítávána manuálně. Výsledkem pak je tabulka 9, ze které vyplývá, že maximální velikost odchylky byla cca 7 %, což představovalo 7 sekund.

Tabulka 9 Srovnání velikosti následného mezidobí dle směrnice Správy železnic a SW OpenTrack [s]

Úsek	První vlak	Druhý vlak	M^{OT}	M^{104}	ΔM [%]
A–B	Nex	Nex	96	98	–2,04 %
A–B	Pn	Nex	254	255	–0,39 %
B–A	Pn	Pn	114	113	0,88 %
B–A	Os	Pn	130	122	6,56 %
B–C	Os	Os	155	154	0,65 %
B–C	R	Os	105	98	7,14 %
C–B	R	R	123	122	0,82 %
C–B	R	Ex	203	197	3,05 %
C–A	Ex	Ex	88	89	–1,12 %
C–A	Nex	Ex	239	241	–0,83 %
A–C	Os	R	173	165	4,85 %
A–C	Pn	Ex	307	307	0,00 %
Průměrný rozdíl následného mezidobí					1,33 %

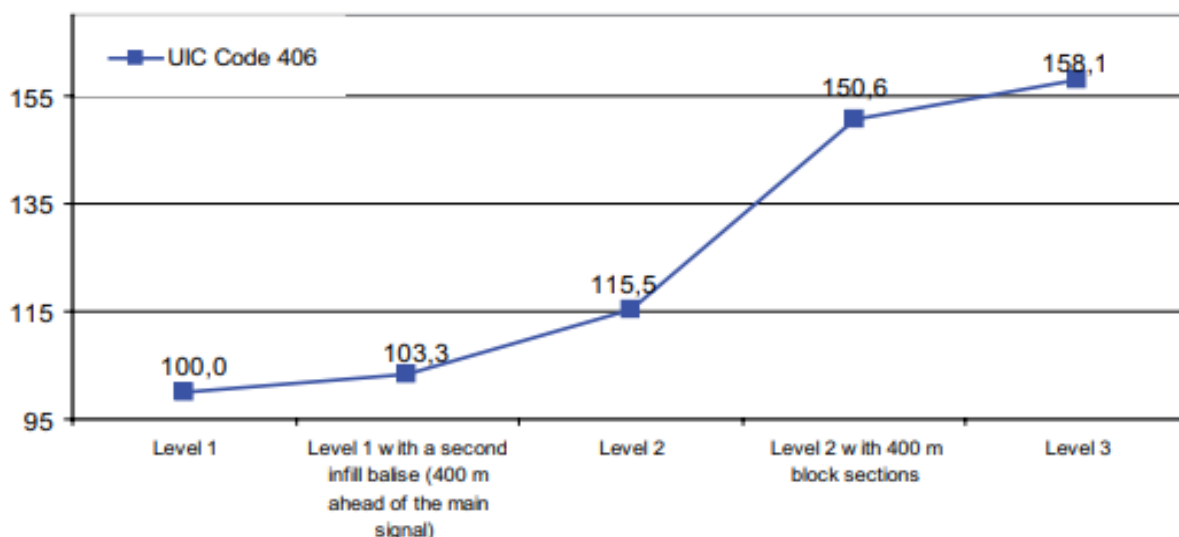
Zdroj: (86)

Zavedení systému ETCS bude mít na tyto výpočty pozitivní vliv do té míry, že se:

- může zkrátit jízdní doba v posledním oddíle vlivem nutnosti jízdy sníženou rychlostí až od první výhybky pojížděné do odbočky,
- může dojít ke změně počtu a velikosti oddílů, tedy i ke zkrácení následného mezidobí,

- zavedením ETCS bude možné zvýšit maximální rychlost vlaku.

V létě 2022 pracoval autor společně se svými spolupracovníky na další části výzkumu, která bude navazovat na literaturu (79) a do již kalibrovaného modelu vloží využití ETCS a oddílů o délce 400 metrů (78). Výsledky tohoto výzkumu pomohou odpovědět na otázku, jak dokáže zavedení kratších prostorových oddílů zvýšit efektivitu současné infrastruktury v podmínkách ČR. Dalším krokem pak může být simulace pohyblivých prostorových oddílů ETCS L3 a také ověření jejich vlivu na výkonnost infrastruktury. Tento výzkum by měl potvrdit nebo upravit závěry, které učinil tým Technické vysoké školy Aachen (87). Zde byla prezentována srovnání výpočtů kapacity tratí pro STRELE metodu, UIC metodu a různé možnosti implementace systému ETCS. Předpokládaný efekt zavedení ETCS dle studie (87) je na obrázku 53. Výpočty vycházejí z kodexu UIC 406.



Obrázek 53 Porovnání propustnosti tratí dle úrovně ETCS v %

Zdroj: (87)

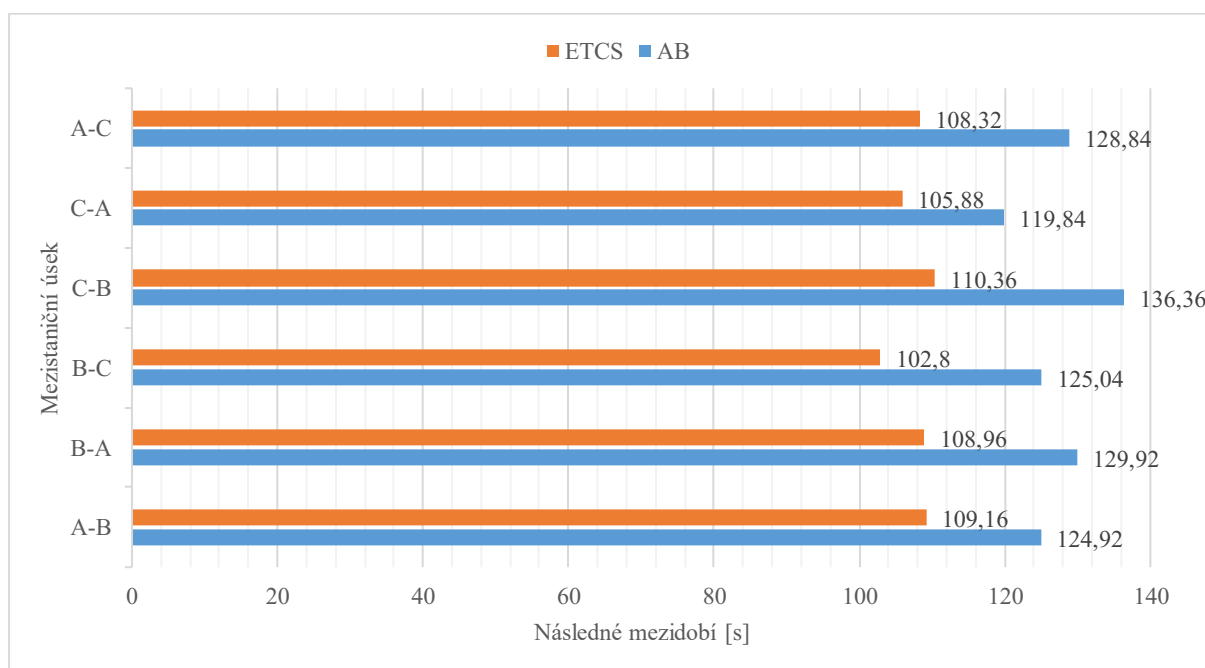
Autor společně s Ing. Tischerem připravili pro kongres CLC 2022 v Bojnicích odborný článek a poster, který mapuje aplikaci krátkých oddílů ETCS na současné infrastrukturu. Tento způsob se označuje jako ETCS L2 s optimalizací konvenčního zabezpečovacího zařízení. Zde bylo pomocí simulace zjištěno, že použitím tohoto nového způsobu zabezpečení jízdy vlaku se kapacita tratí zvýší o 11 až 25 % v závislosti na konfiguraci infrastruktury. Ukázka jedné sady dat pro úsek A-B je uvedena v tabulce 10. Tato data byla získána pomocí stejné metodiky jako v případě tabulky 9 a literatury (86). Následné mezidobí bylo simulováno v prostředí SW OpenTrack.

Tabulka 10 Sada dat ze simulace následného mezidobí pro jeden z úseků [s]

		První vlak									
		Nex		Pn		Os		R		Ex	
		AB	ETCS	AB	ETCS	AB	ETCS	AB	ETCS	AB	ETCS
Druhý vlak	Nex	83	68	229	209	151	134	89	74	43	33
	Pn	57	56	98	82	80	61	65	65	28	28
	Os	70	56	156	128	138	133	65	65	28	28
	R	164	137	246	226	196	148	73	69	28	28
	Ex	226	199	308	288	258	210	182	151	62	53

Zdroj: autor a Ing. Tischer

Souhrnná data jsou na obrázku 54 a vyjadřují průměrnou velikost následného mezidobí pro každý z mezistaničních úseků jako průměrná hodnota pro všechny kombinace vlaků.



Obrázek 54 Porovnání následného mezidobí na autobloku a při ETCS L2 s benefity

Zdroj: autor a Ing. Tischer

Efekt zavedení ETCS je nemalý, i když v porovnání s obrázkem 53 je poloviční oproti přínosu přechodu od ETCS L1 na ETCS L2 s benefity na německé infrastruktuře. Zde je potřeba zdůraznit, že původní výchozí hodnoty nejsou shodné, tedy není možné poměřovat obrázky 52 a 53 přímo mezi sebou.

Podobnými aktivitami obecně nebo pro konkrétní trať se zabývala také literatura (88) a (89). Tyto zkušenosti z Číny ukazují, že simulace v SW OpenTrack je vhodným prostředkem pro zjišťování provozních vlastností železniční infrastruktury, ale také vhodným prostředkem pro nastavení vhodného provozního konceptu včetně následného mezidobí a stability jízdního řádu. Nemalým benefitem je také zkoumání energetické náročnosti. Vzhledem k tomu, že odpor

vozidla roste s rychlostí kvadraticky, je nesmírně důležité porovnávat efekt zvýšení rychlosti (zkrácení jízdní doby) také v kontextu spotřebované energie, podobně jako je tomu v literatuře (67).

Podobným způsobem jako u tabulky 10 a obrázku 54 provedl autor společně s Ing. Tischerem simulaci prezentovanou na konferenci IRICON 2022. Zde byly zkoumány efekty zavedení ETCS L3 pomocí simulace. V literatuře (87) se uvádí, že efekt zavedení ETCS L3 je oproti verzi L2 cca 8 %. Vlastním výzkumem bylo zjištěno, že v ČR lze pomocí ETCS L3 dosáhnout dalšího dodatečného zvýšení kapacity o 4 až 6 %. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 Tabulka následných mezidobí

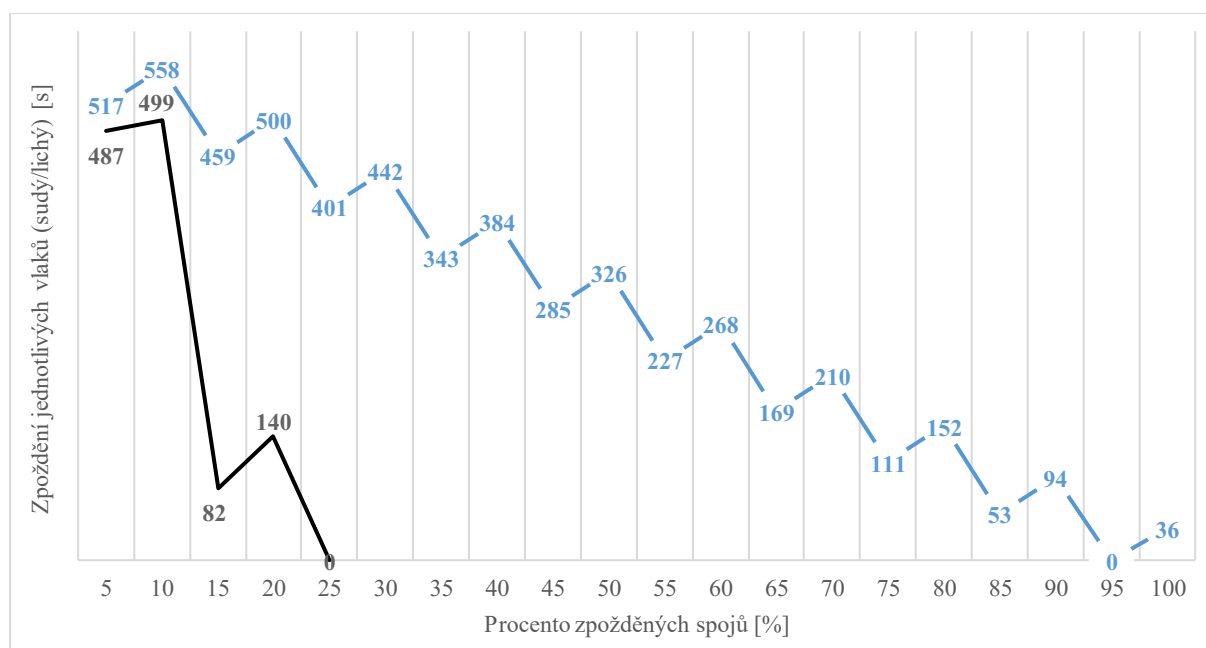
Úsek	Porovnání liniového vlakového zabezpečovače a ETCS L2		Porovnání liniového vlakového zabezpečovače a ETCS L3	
	[s]	[%]	[s]	[%]
A-B	-15,76	11,39	-18,92	26,18
B-A	-20,96	25,44	-22,03	18,15
B-C	-22,24	21,86	-22,31	22,70
C-B	-26,00	22,97	-26,5	30,00
C-A	-20,52	15,82	-21,52	27,91
A-C	-13,96	11,19	-14,06	17,54
Průměr	-19,91	18,11	-20,89	23,75

Zdroj: autor a Ing. Tischer

Otázka změny kapacity dráhy po zavedení ETCS L2 či L3 je otázkou řešenou i v dalších zemích. Mimo ČR a Německa, které byly v habilitační práci uvedeny je to i Švédsko. Zde byl řešen projekt (90), jehož cílem bylo posoudit změnu kapacity dráhy po zavedení ETCS L2 a ETCS L3. Výsledkem je závěr, že ETCS L2 přinese oproti současnému traťovému zabezpečovacímu zařízení cca 10 % kapacity a ETCS L3 pak cca 25 % kapacity. Bohužel varianta ETCS L2 byla posuzována pouze jako náhrada stávajících návěstidel za návěstní značky ETCS. Nebylo vzato v potaz doplnění současných pevných oddílů o další oddíly s lokačními značkami, které by zkrátily délku jednotlivých oddílů, což se v případě autorova výzkumu ukázalo jako kapacitně velmi přínosné.

4.3 Dílčí závěr

Využití simulace při přípravě nových staveb je dnes celosvětově používanou metodou otestování výhledového dopravního konceptu ještě před zahájením stavebních prací. Jedná se zejména o stabilitu jízdního řádu, tedy schopnost grafikonu eliminovat vstupní zpoždění. Příklad takového výzkumu provedl autor v literatuře (91), kde je na obrázku 55 vidět schopnost grafikonu eliminovat vstupní zpoždění, které činilo 600 sekund. Černou barvou je znázorněna situace, kdy byla trať zabezpečena SZZ 3. kategorie, v případě modré barvy byla doprava na trati organizována dle předpisu SŽ D3.



Obrázek 55 Eliminace vstupního zpoždění

Zdroj: (91) s úpravou autora

Z obrázku je patrné, že v případě trati D3 se zpoždění sice snižuje, ale přenáší se do protisměru a z výchozí stanice odjíždí zpožděny všechny spoje, vyjma posledního v sudém směru. U trati D1 se zpoždění přenáší na dva páry vlaků a dále je jízdní řád již stabilizovaný. Stabilita provozu je tedy mnohem vyšší, nicméně je třeba toto porovnat s investičními a provozními náklady na danou trať. Svůj podíl také bude hrát velikost přepravního proudu.

Kromě nových staveb byl také analyzován efekt zavedení ETCS L2 s optimalizací konvenčního zabezpečovacího zařízení do podmínek ČR. Byla provedena simulace a autor předpokládá, že toto zavedení přinese 11 až 25 % kapacity navíc oproti současnému stavu. U ETCS L3 se potvrdily závěry německých studií, že efekt zavedení ETCS je v řádu jednotek procent oproti ETCS L2 s optimalizací konvenčního zabezpečovacího zařízení. Je tak na zvážení, zda toto navýšení má ekonomické opodstatnění.

VLASTNÍ PŘÍNOS

Nové moderní systémy zabezpečení jízdy vlaků na síti Správy železnic, s. o. vyvolávají také nové nároky na všechny složky přípravy, řízení a organizování drážní dopravy, počínaje konstrukcí jízdního řádu, pokračujíc přípravou nových staveb a vlastní organizací drážní dopravy konče. Prioritou všech těchto moderních trendů je zvyšování bezpečnosti a spolehlivosti železniční dopravy. Na druhou stranu tyto nové trendy, které jsou aplikovány na staré infrastrukturu či provozních předpisech, mohou znamenat také snížení míry operativity při organizování drážní dopravy či dokonce snížení kapacity našich tratí. Úlohou habilitační práce bylo tato místa identifikovat a kvantifikovat jejich negativní efekt. V dalším kroku pak byly představeny možnosti, jak tato rizika eliminovat, a to jak na současné infrastrukturu, tak při přípravě nových staveb, včetně těch vysokorychlostních. Samostatnou částí je možnost využití simulace při řešení kapacity tratí pod dohledem ETCS.

V první kapitole jsou analyzovány možnosti, které přináší moderní technologie v podobě CBTC. Omezený počet výrobců je dán především specifickostí využití daných systémů a vysoký nárok na bezpečnost. Naopak pozitivní je vysoká míra interoperability těchto zařízení, neboť všechna tato zařízení podléhají mezinárodním standardům. Autorův přínos v této oblasti se nachází především v **analýze základních principů těchto systémů**.

Na první kapitolu plynule navazuje část, která se týká ETCS. Tento zabezpečovač je intenzivně budován v evropském prostoru a stává se povinnou součástí všech staveb, které jsou zařazeny do sítě TEN-T či AGTC. Autor se v této kapitole zabývá především interakcí vozidlo-infrastruktura v podobě brzdných křivek a dohledových limitů, které mají vliv i na provozní výkonnost infrastruktury. Autorův přínos spočívá především v **systémovém přístupu k ETCS z pohledu technologa železniční dopravy**. V dílčím závěru jsou pojmenovány zásadní negativní a pozitivní důsledky zavedení tohoto systému do českého prostředí. Tyto jsou následně rozpracovány ve třetí kapitole společně s řešením otázky náběhu brzdného účinku a jeho interpretací v Subsetech 026. Jsou zde uvedeny možné úpravy Subsetů, které nemají vliv na bezpečnost ETCS jako celku.

Poslední kapitola je věnována přípravě nových staveb, kde je možné získané poznatky aplikovat již ve fázi přípravy staveb a zároveň je možné si různé modifikace infrastruktury nebo i jízdního řádu předem simulovat a získat tak lepší představu o chování systému jako celku. Autorův přínos zde tkví v **aktivní vědecké práci při využití simulace systému ETCS v podmínkách ČR**. Těžiště simulací a vědecké práce autora spočívá ve studiu důsledků implementace ETCS do ČR.

Vědecko-výzkumný přínos práce spočívá v **komplexním zmapování celé problematiky, a to na úrovni stavu vědeckého poznání a praktického užití**. Bylo prokázáno, že úpravou brzdných křivek ETCS lze snížit rizika úbytku kapacity tratí po zavedení výhradního provozu pod dohledem ETCS, a to bez snížení bezpečnosti celého systému nebo jeho částí. Bylo také prokázáno pomocí simulace, že zavedení ETCS L2 zvýší kapacitu tratí o 11 až 25 %, což bude mít pozitivní efekt zejména v osobní dopravou přetížených úsecích v sídelních aglomeracích. Při další simulaci ETCS L3 byl prokázán nárůst oproti ETCS L2 o pouze 4 až 6 %. Teoretické poznatky zjištěné v průběhu zpracování habilitační práce byly aplikovány na praktických příkladech, čímž byla ověřena jejich správnost a tyto budou dále využívány ve výukovém procesu. Zároveň bude možné v těchto výzkumných aktivitách pokračovat, a to zejména při využití simulací provozních konceptů.

ZÁVĚR

Habilitační práce se v jednotlivých částech zaměřuje na téma, zavádění nových systémů zabezpečení jízdy vlaku na české železniční infrastruktuře. Konkrétně se zabývá jejich vlivem na výkonnost železniční dopravní cesty. Primárním důvodem zavádění těchto systémů je zvyšování bezpečnosti. Tyto s sebou ale nesou dopady do technologie železniční dopravy, a to zejména na úrovni kapacity dráhy. Nové způsoby zabezpečení přinášejí na jedné straně zlepšení některých technologických časů, na straně druhé přinášejí omezení, která plynou z bezpečnostního přístupu k zabezpečení jízdy vlaku a předáním odpovědnosti ze strojvedoucího na systém.

První část práce se zabývá problematikou CBTC s akcentem na systém ETCS. Zvláštní pozornost je věnována brzdným křivkám a dohledu nad zastavením (snížením rychlosti) vlaku. Byť je tato problematika v Subsetech popsána matematicky, tak i zde existuje prostor pro úpravy a národní specifika. Důležitá je zejména interakce národních předpisů a zvyklostí s přesným matematickým popisem dohledu nad brzděním vlaku. Část kapitoly 2 byla věnována také otázce modifikace brzdných křivek a využití podpůrných systémů ATO.

Ve třetí kapitole habilitační práce jsou podrobně analyzovány pozitivní a negativní efekty, které přinese zavedení ETCS. Tato kapitola je vystavěna jako kombinace teoretických poznatků a dílčích výzkumů autora a dat z praxe. Právě porovnání dat z praxe a teoreticky vypočtených hodnot chování systému ETCS poskytuje důkazy o efektech, které přinese zavedení ETCS a navrhuje možná řešení pro eliminaci negativních dopadů.

Zatímco na současné infrastruktuře je řada opatření navrhovaných v kapitole 3 realizovatelná pouze za cenu vysokých investičních nákladů, na nově budované infrastruktuře představuje příležitost uzpůsobit infrastrukturu provozním konceptům. Nedílnou součástí budoucích aktivit v této oblasti je také využití simulace. Pomocí simulace je možné různé konfigurace železniční infrastruktury předem otestovat a zatížit provozními odchylkami za účelem sledování stability provozu. Zároveň se autorovi podařilo kvantifikovat interval, ve kterém se bude pohybovat efekt zavedení ETCS L2 s benefity na českou železniční infrastrukturu.

Závěrem lze připomenout, že **nové způsoby zabezpečení jízdy vlaku** sledují vždy primárně cíl ve **zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti železniční dopravy**. Je **úkolem technologů**, aby tyto systémy na současné infrastruktuře **využívali efektivně a poskytovali relevantní informace při přípravě nových infrastrukturních projektů**.

CITOVANÁ LITERATURA

1. **Evropská komise**, *Nářízení Komise (EU) 2016/919 ze dne 27. května 2016 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystému „Řízení a zabezpečení“ železničního systému v Evropské unii*, EUR-Lex, 26. 05 2016, [Citace: 01. 03 2019], https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.158.01.0001.01.CES.
2. **Gurník, P.**, *Next Generation Train Control (NGTC): more effective railways through the convergence of main-line and urban train control systems*, 6th Transport Research Arena. [Online] 21. 04. 2016, [Citace: 26. 12. 2020], <https://pdf.sciencedirectassets.com/308315/1-s2.0-S2352146516X00051/1-s2.0-S2352146516301533/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjENf////////wEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIFgoW5TMUqktjy1BswzcJjetKZZaKsxg37FiTd/Dr+VxAiEAzrk7RE0fOosB8iVIQR+84g+Nfpzu+c59>.
3. **Tischer, E.**, *Simulace automatického provozu na trase metra B*, diplomová práce, Pardubice : Univerzita Pardubice, 2017.
4. **Annual World Report 2018**, *UITP - Observatory of Automated Metros*, 2018, [Citace: 12. 02. 2021], https://metroautomation.org/wp-content/uploads/2019/05/Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf.
5. **Dopravní podnik hlavního města Prahy, a.s.**, *Metro D - dopravní systém*, 15. 01. 2021, [Citace: 01. 03 2021], <https://www.dpp.cz/metro-d/popis-projektu/dopravni-system#technologie-cbtc>.
6. **Ferrari, A.**, *Product Line Engineering Applied to CBTC Systems Development*, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, říjen 2012, [Citace: 10. 01. 2021], https://www.researchgate.net/publication/267977359_Product_Line_Engineering_Applied_to_CBTC_Systems_Development.
7. **Alstom**, *Signalling Urbalis brochure*, Railway news, 2016, <https://railway-news.com/wp-content/uploads/2016/12/Brochure-Signalling-Urbalis-range-English.pdf>.
8. **THALES Group**, *Seltrack CBTC*, 2013, https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/d7/asset/document/seltracr_cbtc_brochure.pdf.
9. **Tazaki, T.**, *Development of CBTC for Global Markets*, 2012, http://www.hitachi.com/rev/pdf/2012/r2012_07_110.pdf.
10. **Carvajal-Carreño, W., Cucala, A., Fernández-Cardador, A.**, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, ScienceDirect, srpen 2016, [Citace: 16. 02. 2021], <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197616300690.0952-1976>.
11. **UITP**, *Statistics Brief: World report on metro automation*, UITP, 1. 11. 2016, <http://www.uitp.org/world-report-metro-automation>.

12. **Ouředníček, J., Nachtigall, P.,** *Zajištění dohledu nad zastavením (snížením rychlosti) v ERTMS/ETCS v souvislostech*, Vědeckotechnický sborník ČD, červenec 2019, [Citace: 15. 01. 2020], [https://vts.cd.cz/documents/168518/233051/11_4719_Nachtigall%2C+Ouředníček_Zajištění+dohledu+nad+zastavením+\(snížením+rychlosti\)+v+ERTMSETCS+v+souvislostech_kor.pdf/bf57499e-aac1-4a0f-9ebd-b523361d694a](https://vts.cd.cz/documents/168518/233051/11_4719_Nachtigall%2C+Ouředníček_Zajištění+dohledu+nad+zastavením+(snížením+rychlosti)+v+ERTMSETCS+v+souvislostech_kor.pdf/bf57499e-aac1-4a0f-9ebd-b523361d694a).
13. **Chen, R., Guo, J.,** *Development of the new CBTC system simulation and performance analysis*, 22. 06. 2010, <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/114/21448>.
14. **Marek, J.,** *Brzdny model ERTMS/ETCS a možnosti jeho optimalizace na úrovni aplikace*, Vědeckotechnický sborník ČD, červenec 2019, [Citace: 20. 01. 2020], https://vts.cd.cz/documents/168518/233051/01_4719_Marek_Brzdny+model+ERTMS_ETCS+a+moznosti+jeho+optimalizace_kor.pdf/b12d3378-d3e6-4d06-8feb-b5ba5a15605c.
15. **European railway agency,** *Set of specifications # 2*, ERA, 29. 07. 2015, [Citace: 20. 01. 2016], <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Set-of-specifications-2.aspx>.
16. **Česká státní norma,** *Drážní zařízení - Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a bezpečnosti (RAMS)*, ČNÚ, 1. 6. 2001, [Citace: 20. 10. 2016], <http://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=59709>.
17. **Nachtigall, P., Tischer, E.,** *Možnosti zavedení automatického provozu pražského metra B*, Vědeckotechnický sborník ČD, 2017, Sv. 44.
18. **Chen, R., Zhu, C., Liu, L.,** *Calculation and optimization of train headway in CBTC system*, Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, Sv. 4., <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/ChlQZXJpb2RpY2FsQ0hJTmV3UzIwMjIwOTAxEHf4bmp0ZHh4YjIwMTEwNDAwORoIbnp4djdhN3E%253D>.
19. **Huber+Suhner AG,** *CBTC Connectivity Solutions White paper*, 2011, http://www.railwaydirectory.net/company/feature/project_references/hash/a4c286bc338f6eac9e60034c4152aba0/name/White%20Paper%20-%20CBTC%20Connectivity%20Solutions.pdf.
20. **UNIFE,** *ERTMS Statistics: The European Rail Traffic Management System*. UNIFE, 2020, [Citace: 01. 10. 2022], <https://www.ertms.net/facts-figures/deployment-statistics/>.
21. **Správa železniční dopravní cesty, s. o.,** *TNŽ 34 2620: Železniční zabezpečovací zařízení - Staniční a traťová zabezpečovací zařízení*, 01. 07. 2002, [Citace: 03. 03. 2019], <https://www.szdc.cz/documentpublisher/download?documentId=1%3B%233dcf584e-93d8-4bef-9424-8cbeda715a7f&contentId=0>.
22. **European Railway Agency,** *Subset 104*, European Union Agency for Railways. 05. 07. 2014, [Citace: 01. 03. 2019], https://www.era.europa.eu/node/641/1091882_en.

23. **Klega, M.**, *Zavádění systému ETCS na tratích v ČR*, Správa železniční dopravní cesty, s.o., 2012, [Citace: 01. 03. 2019], <http://www.szdc.cz/soubory/konference-a-seminare/zdc-2012/a06-klega-szdc.pdf>.
24. **UNIFE**, *European Rail Traffic Management System*, UNIFE, [Citace: 01. 03. 2019], <http://www.ertms.net>.
25. **Railway Signalling**, *The ERTMS/ETCS signalling system*, Railwaysignalling.eu, 2014, [Citace: 01. 03. 2019], http://www.railwaysignalling.eu/wp-content/uploads/2016/09/ERTMS_ETCS_signalling_system_revF.pdf.
26. **Klega, M.**, *Technické požadavky pro implementaci ERTMS/ETCS L2 na české části Koridoru E*, Správa železniční dopravní cesty, s.o., [Citace: 01. 03. 2019], www.szdc.cz/soubory/ertms/technicke-pozadavky.doc.
27. **Ghazel, M.**, *Formalizing a subset of ERTMS/ETCS specifications for verification purposes*, Transportation Research Part C, květen 2014, Volume 42, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X14000345>.
28. **Ministerstvo dopravy**, *Národní implementační plán TSI CCS*, Evropská komise, 2017, [Citace: 19. 06. 2018], <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/rail-nip/nip-ccs-tsi-czech-rep-cz.pdf>.
29. **Marek, J., Myslivec, I., Bubeník, M.**, *Návrhy úprav funkčního chování ERTMS/ETCS při dohledu cíle na generické úrovni*, Vědeckotechnický sborník Správy železnic, 2020, [Citace: 20. 05. 2021], <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/94808101/N%C3%A1vrhy+%C3%BApravy+funk%C4%8Dn%C3%ADho+chov%C3%A1n%C3%AD+ERTMSETCS+p%C5%99i+dohledu+c%C3%ADle+na+generick%C3%A9+%C3%BArovni.pdf/3a9e0a49-084c-439d-afe2-7afb74826c59>.
30. **Nachtigall, P., Ouředníček, J.**, *Zajištění dohledu nad zastavením (snížením rychlosti) v ERTMS/ETCS v souvislostech*, Vědeckotechnický sborník ČD, 2019, [Citace: 19. 05. 2021], https://www.researchgate.net/publication/333566976_Zajisteni_dohledu_nad_zastavenim_snizenim_rychlosti_v_ERTMSETCS_v_souvislostech_Context_of_security_of_the_stop_speed_reduction_under_the_ERTMSETCS.
31. **European Railway Agency**, *European Rail Traffic Management System (ERTMS)*, ERA, [Citace: 01. 03. 2019], https://www.era.europa.eu/activities/european-rail-traffic-management-system-ertms_en.
32. **European Rail Traffic Management System**, *Hybrid ERTMS/ETCS Level 3*, EEIG ERTMS Users Group, 14. 07. 2017, [Citace: 15. 07. 2021], http://www.ertms.be/sites/default/files/2018-03/16E0421A_HL3.pdf.

33. **Hoang, T.H., Butler, M., Reichl, K.**, *Abstract State Machines, Alloy, B, TLA, VDM and Z*, 6th International Conference ABZ 2018, Southampton : Springer, 2018. stránky 251-261. 978-3-319-91271-4.
34. **Hansen, D., Leuschel, M., Körner, P. et al.**, *Validation and real-life demonstration of ETCS hybrid level 3 principles using a formal B model*, International Journal of Software Tools and Technological Transfer, 2020, 22, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10009-020-00551-6>.
35. **Folega, P., Irilik, M.**, *Effect of Train position reporting on railway line capacity*, Transport Problems, 2021, Svazek 16, stránky 59-72, <http://dx.doi.org/10.21307/tp-2021-023>.
36. **Iovino, S. and col.**, *Onboard Train Integrity as enabler for ETCS Level 3*, Birmingham, 2022.
37. **Hamid, H.A., Nicholson, G.L., Roberts, C.**, *Impact of train positioning inaccuracies on railway traffic management systems: framework development and impacts on TMS functions*, Journal of Intelligent Transport Systems, 24. 01. 2020, <http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2019.0503>.
38. **Drážní inspekce**, *Výroční zpráva 2020*, Drážní inspekce, [Citace: 10. 01. 2022], <http://www.dicr.cz/vyrocní-zpravy>.
39. **Union Internationale des Chemins de fer**, *UIC Code – 544-1 – Brakes – Braking performance*, Brusel, UIC, 2014.
40. **Schrötter, J., Bouda, J.**, *Pozor, přijíždí vlak*, Praha: CPress, 2015, 978-80-264-0726-3.
41. **European Railway Agency**, *Set of specifications 3 (ETCS B3 R2 GSM-R B1) – Subset 026-3*, UNISIG – EEIG ERTMS USERS GROUP, 13. 05. 2016, [Citace: 01. 03. 2019], https://www.era.europa.eu/node/641/1091973_en.
42. **Hruban, I., Nachtigall, P., Štěpán, O.**, *Přínosy zavedení ETCS z pohledu brzdných křivek*, Vědeckotechnický sborník ČD, 2015, Svazek 40.
43. **Klega, M.**, *Požadavky a doporučení SŽDC na mobilní část ETCS*, Praha: Správa železniční dopravní cesty, s.o., 04. 11. 2018.
44. **Fiala, L.**, *Provozní dopady aplikace ochranných vzdáleností podle TNŽ 34 2620*, Diplomová práce, 10. 05. 2010, [Citace: 15. 09. 2016], http://dspace.upce.cz/bitstream/handle/10195/36540/FialaL_OchrannychVzdalenosti_PD_2010.pdf;jsessionid=6C7B814BAE56DB44790363B5B25F54FD?sequence=1.
45. **European Railway Agency**, *ERTMS – Set of specifications 2 (ETCS B3 MR1 GSM-R B1)*, ERA, [Citace: 01. 03. 2019] https://www.era.europa.eu/node/641/1091974_en.
46. **European Railway Agency**, *ERTMS – Set of specifications 3 (ETCS B3 R2 GSM-R B1)*, ERA, [Citace: 01. 03. 2019], https://www.era.europa.eu/node/641/1091973_en.

47. **European Railway Agency**, *Introduction to ETCS braking curves*, ERA, 14. 06. 2016, [Citace: 01. 03. 2019], https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/introduction_to_etcs_braking_curves_en.doc.
48. **European Railway Agency**, *ERTMS – Set of specifications 1 (ETCS B2 GSM-R B1)*, ERA, [Citace: 01. 03. 2019], https://www.era.europa.eu/node/641/1091975_en.
49. **Konopáč, T.**, *ERTMS/ETCS pro železnici*, Univerzita Pardubice, Pardubice, 2018.
50. **Nachtigall, P.**, *Vliv nastavení mobilní části ETCS na brzdovou křivku*, Perner's Contacts, Volume 22, číslo 4, 2016, stránky 131-138.
51. **Gaider, S., Knechtsberger, P.**, *Implementace systému ETCS na tratích ÖBB*, Konference sdělovací a zabezpečovací techniky na železnici, 14. 09. 2021, [Citace: 20. 01. 2022], https://konferenceszt.cz/wp-content/uploads/2021/10/4.-ETCS_OEBB_Olomouc_140921.pdf.
52. **Marek, J.**, *Brzdný model ERTMS/ETCS a možnosti jeho optimalizace na úrovni aplikace*, Vědeckotechnický sborník ČD, 2019, Sv. 47.
53. **Nachtigall, P., Ouředníček, J.**, *Wider aspects of deceleration supervision in ERTMS/ETCS*, Matec Web of Conferences, 12. 10. 2018, [Citace: 17. 01. 2020], <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500010>.
54. **Správa železniční dopravní cesty, s.o.**, *Prozatímní požadavky na uplatnění uvolňovací rychlosti*, Správa železniční dopravní cesty, s.o., 28. 02. 2018, [Citace: 01. 03. 2019], Dostupné jako soubor příloha_5_ZTP.pdf v zadávací dokumentaci veřejné zakázky ETCS Plzeň (mimo) - Cheb. https://zakazky.szdc.cz/document_7936/6fb1483faa42ed68f0a1180155c324bb-dil-2-zavazny-vzor-sod-vc-priloh.zip.
55. **Gröpler, O.**, *Braking curves and models for ETCS*, Minden, 2010.
56. **European Railway Agency**, *European Rail Traffic Management System – ERA tool*, European Railway Agency, 2020, [Citace: 28. 05. 2021], https://www.era.europa.eu/activities/european-rail-traffic-management-system-ertms_en.
57. **European Railway Agency**, *Braking curves simulation tool*, European Railway Agency, 15. 06. 2016, [Citace: 04. 10. 2016], <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Braking-Curves-Simulation-Tool.aspx>.
58. **Česká státní norma**, *ČSN EN 50129 (34 2675) – Drážní zařízení - Sdělovací a zabezpečovací systémy a systémy zpracování dat - Elektronické zabezpečovací systémy*, Český normalizační institut, Praha, 2004.
59. **Railvolution**, *Czech Raildays 2008*, 17. 06. 2008, [Citace: 01. 03. 2019], http://www.railvolution.net/czechraildays/2008/seminare/kv_09.pdf.
60. **Lieskovský, A.**, *ETCS a AVV*, ACRI. 15. 06. 2015, [Citace: 01. 03. 2019], http://www.acri.cz/uploads/acri-akademie/15-06%20ETCS/2015_ETCS_Lieskovsky.pdf.

61. **Myslivec, I.**, *Malé zamyšlení nad brzdovými a zásahovými křivkami ETCS*, konference AŽD Praha, Velké Losiny, 2019.
62. **Gašparík, J., Kolář, J.**, *Železniční doprava*, Praha: Grada Publishing, 2017, 978-80-271-9855-9.
63. **Správa železnic, s.o.**, *Směrnice SŽDC 104 – Provozní intervaly a následná mezidobí*, Praha, 2013.
64. **Správa železnic, s.o.**, *Směrnice SŽDC Sm124 – Zjišťování kapacity dráhy*, Praha, 2018.
65. **Vignali, V., Cuppi, F., Lanteri, C., Dimola, N., Galasso, T., Rapagna, L.**, *A methodology for the design of sections block length on ETCS L2 railway networks*, Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, Volume 13.
66. **Weik, N., Niebel, N., Nießen, N.**, *Capacity analysis of railway lines in Germany - A rigorous discussion of the queueing based approach*, Journal of Rail Transport Planning & Management, 2016, Volume 6.
67. **Nachtigall, P., Tischler, E., Široký, J.**, *Assessing the efficiency of increasing the track speed in the line section Rokycany-Plzeň hl. n.*, Sustainability, 2020.
68. **Porwisz, V.**, *Technologicko-provozní aspekty křížení dráhy a pozemní komunikace*, diplomová práce, Univerzita Pardubice, 2020.
69. **Ministerstvo dopravy ČR**, *Plán moderního zabezpečení české železnice*, Drážní úřad, [Citace: 06. 10. 2021], https://www.ducr.cz/images/drurad/dokumenty/ostatni/3_PL%C3%81N_modern%C3%ADho_zabezpe%C4%8Den%C3%AD_%C4%8Desk%C3%A9_%C5%BEEleznice_Implementace_ETCS_MDCR0C30LVPA.pdf.
70. **Šimral, P.**, *ETCS - provozní zkušenosti*, ACRI, 30. 05. 2015, [Citace: 16. 09. 2016], http://www.acri.cz/uploads/acri-akademie/15-06%20ETCS/2015_ETCS_Simral.pdf.
71. **Marek, J.**, *Informace z UNISIG – aktuální stav specifikací a další rozvoj ETCS*, ACRI, 02. 06. 2015, [Citace: 04. 02 2016.], www.acri.cz.
72. **Marek, J., Myslivec, I., Bubeník, M., Drápal, B.**, *Update on the proposal for improvements of the ETCS braking curves*, Signal und Draht, 2020, Volume 6.
73. **Hrušovský, J.**, *Brzdy hnacích vozidel ČSD*, Nakladatelství dopravy a spojů, 1972. 31-065-72.
74. **Union Internationale des Chemins de fer**, *Vybavení nákladních vozů kompozitními špalky s nízkou hodnotou součinitele tření (LL)*, Příručka pro používání kompozitních špalků (LL), UIC, 2013.
75. **Štěpánek, Z.**, *Zavedení LL brzdových špalků*, opatření dopravce ČD Cargo č. 10/2016, Praha, 10. 08. 2016.

76. **Marek, J.**, *Brzdné křivky ETCS a jejich optimalizace na generické úrovni*, Konference sdělovací a zabezpečovací techniky na železnici, 6. 10. 2021, [Citace: 13. 02. 2022], https://konferenceszt.cz/wp-content/uploads/2021/10/ETCS-BCCRs-Marek-Olmc2021_corr-2.pdf.
77. **European Railway Union**, *Backwards and forwards compatibility of ETCS baselines*, European Rail Traffic Management System (ERTMS), ERA, [Citace: 01. 03. 2019], https://www.era.europa.eu/activities/european-rail-traffic-management-system-ertms_en#meeting2.
78. **Trögel, M.**, *Zásady pro projektování traťové části ERTMS pro tratě s výhradním provozem evropského vlakového zabezpečovače*, Správa železnic, s.o., Praha, 2022.
79. **Správa železniční dopravní cesty, s.o.**, *Zásady pro návrh technického řešení ETCS ve vazbě na kolejová řešení dopraven*, Správa železniční dopravní cesty, s.o. 08. 03. 2018, [Citace: 01. 03. 2019], Dostupné jako soubor ETCS_zásady.pdf v zadávací dokumentaci veřejné zakázky ETCS Plzeň (mimo) - Cheb. https://zakazky.szdc.cz/document_7936/6fb1483faa42ed68f0a1180155c324bb-dil-2-zavazny-vzor-sod-vc-priloh-zip.
80. **Správa železnic, s.o.**, *Postup přípravy výstavby vysokorychlostních tratí*, Správa železnic, s.o. listopad 2019, [Citace: 10. 02. 2022], <https://www.spravazeleznice.cz/vrt/>.
81. **Wang, J., a kol.**, *Optimizing High-Speed Railroad Timetable with Passenger and Station Service Demands: A Case Study in the Wuhan-Guangzhou Corridor*, Journal of Advanced Transportation, 24. 09. 2018, [Citace: 15. 02. 2020], <https://doi.org/10.1155/2018/4530787>.
82. **Wang, J., a kol.**, *Optimization of High-speed Railway Line Planning Considering Extra-Long Distance Transportation*, Journal of Advanced Transportation, 13. 01. 2020, [Citace: 20. 02. 2022], <https://doi.org/10.1155/2020/3062891>.
83. **Dobruszkes, F.**, *High-speed rail and air transport competition in Western Europe: A supply-oriented perspective*, Transport Policy, 2011, Sv. 6, Volume 18, stránky 870-879.
84. **Harrod, S., Cerreto, F., Nielsen, O. A.**, *OpenTrack simulation model files and output dataset for a Copenhagen suburban railway*, Journal Data in Brief, 01. 08. 2019, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340919303038?via%3Dihub>.
85. **Goodman, C., J., Siu, L., K., Ho, T. K.**, *A review of simulation models for railway systems*. International Conference on Developments in Mass Transit Systems Conf., London, 1998.
86. **Tischer, E., Nachtigall, P., Šíroký, J.**, *The use of simulation modelling for determining the capacity of railway lines in the Czech conditions*, Open Engineering, 10. 03. 2020, <https://www.degruyter.com/view/journals/eng/10/1/article-p224.xml>.
87. **Union Internationale des Chemins de fer**, *Influence of ETCS on the line capacity - generic study*, Verkehrswissenschaftliches Institut - Technische Hochschule Aachen, 2008, [Citace: 03. 03. 2022.], <https://www.shop-ETF.com/en/influence-of-ETCS-on-line-capacity-generic-study>.

88. **Ho, T., K., Mao, B., H., Yuan, Z., Z., Liu, H., D., Fung, Y., F.,** *Computer simulation and modeling in railway applications*, Computer Physics Communications, 01. 02. 2002, Sv. 1, Volume 143, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465501004106>.
89. **Chen, Z., Han, B., M.,** *Simulation Study Based on OpenTrack on Carrying Capacity in District of Beijing-Shanghai High-Speed Railway*, Applied Mechanics and Material, 01. 01. 2014, <https://www.scientific.net/amm.505-506.567>.
90. **Ranjbar, V., Olsson, N., Sipilä, H.,** *Impact of signalling system on capacity – Comparing legacy ATC, ETCS level 2 and ETCS hybrid level 3 systems*, Journal of Rail Transport Planning & Management, 2022, Volume 23, stránky 1-14, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210970622000245>.
91. **Nachtigall, P., Šourek, D., Tischer, E.,** *Level of Detail of the Simulation Model and its Influence on the Result Accuracy*, Transport Research Procedia, 01. 10. 2021, [Citace: 20. 05. 2022], <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.012>.

VLASTNÍ ZDROJE K TÉMATU HABILITAČNÍ PRÁCE

- (1) NACHTIGALL, P., BŘEZINA, E. Vztah kvalitativních a kvantitativních ukazatelů na dopravní provoz a infrastrukturu. *ŽelAktuel* 2008. Pardubice: Institut Jana Pernera, o.p.s., 2008, s. 83. ISBN 978-80-86530-51-2.
- (2) MAZAČ, P., NACHTIGALL, P. Možnosti optimalizace JŘ pomocí simulačního modelu. *Horizons of railway transport* 2009. Žilina: EDIS – vydavatelství Žilinskej univerzity, 2009, s. 219-223. ISBN 978-80-554-0094-5.
- (3) MAZAČ, P., NACHTIGALL, P. Racionalizace traťového úseku Praha-Čakovice – Měšice u Prahy. *ŽelAktuel* 2009. Pardubice: Institut Jana Pernera, o.p.s., 2009, s. 60-66. ISBN 978-80-86530-61-1.
- (4) ŠIROKÝ, J., CEMPÍREK, V., NACHTIGALL, P., RATHOUSKÝ, B., ZEMAN, A., GAŠPARÍK, J., NEDELIÁKOVÁ, E., CÍSAŘOVÁ, H. Transport Technology and Control. *Transport technology and control*. Pardubice: Institut Jana Pernera, o.p.s., 2009, s. 124-142. ISBN 978-80-86530-55-0.
- (5) ŠIROKÝ, J., CEMPÍREK, V., NACHTIGALL, P., RATHOUSKÝ, B., ZEMAN, A., GAŠPARÍK, J., NEDELIÁKOVÁ, E., CÍSAŘOVÁ, H. Transport Technology and Control. Pardubice: Institut Jana Pernera, o.p.s., 2009. 198 s. ISBN 978-80-86530-55-0.
- (6) CEMPÍREK, V., NACHTIGALL, P., ŠIROKÝ, J., ŠOUREK, D., KRUTONOG, L. МОДЕЛЬ СИСТЕМНОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В СМЕШАННОМ СООБЩЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie (Transport: science, technique and management)*, 2012, roč. 8, č. srpen, s. 19–25.
- (7) NACHTIGALL, P., HRUBAN, I., ŠTĚPÁN, O. Přínosy zavedení ETCS z pohledu brzdných křivek. *Vědeckotechnický sborník ČD*, 2015, roč. 40, č. prosinec, s. 01-13.
- (8) HRUBAN, I., NACHTIGALL, P., ŠTĚPÁN, O. Technologická úskalí implementace ETCS. 2015.
- (9) DRAHOTSKÝ, I., CEMPÍREK, V., BŘEZINA, E., NACHTIGALL, P., PÁCHA, M. Metodika výpočtu spotřeby trakční energie. *ČD Cargo*, 2015. 47 s.
- (10) NACHTIGALL, P., HRUBAN, I., ŠTĚPÁN, O. Přínosy zavedení ETCS z pohledu kapacity dráhy. *Vědeckotechnický sborník ČD*, 2016, roč. 41, č. duben, s. 1-11.
- (11) NACHTIGALL, P. VLIV NASTAVENÍ MOBILNÍ ČÁSTI ETCS NA BRZDNOU KŘIVKU. *Perner's Contacts*, 2016, roč. 11, č. 1, s. 131-137.

- (12) NACHTIGALL, P. VLIV KONFIGURACE ETCS NA VZDÁLENOST MEZI MÍSTEM ZASTAVENÍ VLAKU A KONCEM VLAKOVÉ CESTY. *Perner's Contacts*, 2016, roč. 11, č. 3, s. 124-130.
- (13) NACHTIGALL, P., ŠKÁREK, M. RAILWAY INFRASTRUCTURE CAPACITY MANAGEMENT FOR AD-HOC TRAINS ON THE SŽDC NETWORK. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016, s. 44-46. ISBN 978-80-01-06022-3. ISSN 2336-5382.
- (14) NACHTIGALL, P., TISCHER, E. Možnosti zavedení automatického provozu pražského metra B. *Vědeckotechnický sborník ČD*, 2017, roč. 44, č. prosinec, s. 1-16.
- (15) GAŠPARÍK, J., MAJERČÁK, J., ŠIROKÝ, J., ABRAMOVIĆ, B., MEŠKO, P., NACHTIGALL, P., ZITRICKÝ, V. *Railway Traffic Operation*. Žilina: Žilinská univerzita, 2017. 292 s. ISBN 978-80-554-1281-8.
- (16) NACHTIGALL, P., OUŘEDNÍČEK, J. Wider aspects of deceleration supervision in ERTMS/ETCS. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 235, 2018, roč. 235, č. October, s. 1-6.
- (17) ŠIROKÝ, J., NACHTIGALL, P., TISCHER, E., MAGDECHOVÁ, K. Possibilities of Introduction of Automated Operation on the Prague Metro. *Transport Means: proceedings of the international scientific conference*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2018, s. 356-365. ISSN 1822-296X.
- (18) ŠIROKÝ, J., NACHTIGALL, P., GAŠPARÍK, J., ABRAMOVIĆ, B. *Transport Technology and Traffic Management*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2018. 254 s. ISBN 978-80-7560-163-6.
- (19) NACHTIGALL, P., OUŘEDNÍČEK, J. Zajištění dohledu nad zastavením (snížením rychlosti) v ERTMS/ETCS v souvislostech. *Vědeckotechnický sborník ČD*, 2019, roč. 47, č. červen, s. 1-25.
- (20) NACHTIGALL, P., ŠIROKÝ, J., TISCHER, E. The use of simulation modelling for determining the capacity of railway lines in the Czech conditions. *Open Engineering*, 2020, roč. 10, č. 1, s. 224-231.
- (21) NACHTIGALL, P., ŠIROKÝ, J., TISCHER, E. Assessing the efficiency of increasing the track speed in the line section Rokycany – Plzeň hl. n.. *Sustainability*, 2020, roč. 18, č. 12, s. 1-13.
- (22) NACHTIGALL, P., TISCHER, E. Efficiency of Increasing of the Track Speed Using Simulation in Opentrack. *Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation*

- Symposium (EMSS 2020). Rende: CAL-TEK SRL, 2020, s. 130-136. ISBN 978-1-71382-056-7. ISSN 2724-0029.
- (23) ŠIROKÝ, J., NACHTIGALL, P., TISCHER, E., GASPARIK, J. Simulation of Railway Lines with a Simplified Interlocking System. *Sustainability*, 2021, roč. 13, č. 3, s. nestránkováno.
- (24) ŠIROKÝ, J., NACHTIGALL, P., GAŠPARÍK, J., ČÁP, J. Calculation model of railway capacity price in the Czech Republic. *Promet – Traffic & Transportation*, 2021, roč. 33, č. 1, s. 91-102.
- (25) NACHTIGALL, P., ŠOUREK, D., TISCHER, E. Level of Detail of the Simulation Model and its Influence on the Result Accuracy. *INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE HORIZONS OF RAILWAY TRANSPORT 2020*, 2021, roč. 53, č. March, s. 91-97.
- (26) NACHTIGALL, P., TISCHER, E. CALCULATION OF THE MINIMAL LENGTH OF THE HIGH-SPEED LINE. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. Vol. 31, 2021, roč. 31, č. July, s. 30-35.
- (27) BULÍČEK, J., NACHTIGALL, P., ŠIROKÝ, J., TISCHER, E., Improving single-track railway line capacity using extended station switch point area, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol. 24, 2022, doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100354.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Obecné schéma působnosti systémů CBTC a ETCS.....	16
Obrázek 2	Kumulativní délka tratí se CBTC	17
Obrázek 3	Podíl výrobců CBTC podle délky linek.....	18
Obrázek 4	Schéma komunikace souprav se zabezpečovacím zařízením v systému ATS	19
Obrázek 5	Schéma určení bezpečného rozestupu vlaků	21
Obrázek 6	Kontrola maximální rychlosti	22
Obrázek 7	Schéma funkčních závislostí systému CBTC trasy metra D v Praze	23
Obrázek 8	Současný stav s pevnými oddíly (a) a aplikace virtuálních oddílů (b)	31
Obrázek 9	Vývoj počtu mimořádných událostí nedovolené jízdy za návěstidla	33
Obrázek 10	Pojistný (prokluzový) úsek	39
Obrázek 11	Vedení vlaku k návěstidlu v Německu a ČR.....	39
Obrázek 12	Matematické vyjádření pojistné vzdálenosti.....	40
Obrázek 13	Brzdné křivky dohlížené k SvL a EoA.....	43
Obrázek 14	Použití danger point (vlevo) a pojistného úseku (vpravo).....	45
Obrázek 15	Nemožnost postavení vlakové cesty z důvodu boční ochrany	46
Obrázek 16	Rychlostní profily ETCS	47
Obrázek 17	Srovnání nominálního a kritického brzdění.....	48
Obrázek 18	Pojistný úsek	49
Obrázek 19	Umělé zkrácení užitečné délky koleje	49
Obrázek 20	Princip užití uvolňovací rychlosti	49
Obrázek 21	Chyba odometrie.....	51
Obrázek 22	Obecná funkce odrychlení	52
Obrázek 23	Doba náběhu brzdy v závislosti na délce vlaku.....	55
Obrázek 24	Riemann-Stiltjesův integrál	58
Obrázek 25	Vztah mezi kvalitou služby a počtem vlaků	59
Obrázek 26	Časová úspora při jízdě odbočkou.....	60
Obrázek 27:	Úspora jízdní doby.....	61
Obrázek 28:	Úspora v obsazení záhlaví a zhlaví.....	62
Obrázek 29:	Hraniční hodnoty rychlosti pro maximální zkrácení obsazení zhlaví a záhlaví ..	62
Obrázek 30	Brzdná křivka polského strojvedoucího a brzdných křivek ETCS.....	65
Obrázek 31	Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění českého strojvedoucího a křivek ETCS (měření 1).....	66

Obrázek 32 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání – detail měření 1	67
Obrázek 33 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění českého strojvedoucího a křivek ETCS (měření 2).....	68
Obrázek 34 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění českého strojvedoucího a křivek ETCS (měření 3).....	69
Obrázek 35 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění Ex 145 Landek a křivek ETCS.....	70
Obrázek 36 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění Os 5010 a křivek ETCS.....	71
Obrázek 37 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění vlaků METRANS a křivek ETCS.....	72
Obrázek 38 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění vlaků METRANS a křivek ETCS – detail pro přiblížení k návěstidlu	72
Obrázek 39 Úprava obrázku 37 pro křivky P a W	73
Obrázek 40 Srovnání původní křivky EBI (černá) a EBD (červená) po úpravě dle (11)	75
Obrázek 41 Srovnání nové křivky EBI_{JM} (modrá) s daty od společnosti METRANS.....	75
Obrázek 42 Detail srovnání křivek z obrázku 38	76
Obrázek 43 Srovnání původních křivek SBI, W a P a křivek dle JaM	76
Obrázek 44 Srovnání brzdění vlaků společnosti METRANS a původní křivky P a upravené P_{JaM}	77
Obrázek 45 Doba náběhu brzdy dle Subsetu 026-3	78
Obrázek 46 Dynamická charakteristika rozvaděče v režimu P	79
Obrázek 47 Závislosti rychlosti na čase pro reálný model a ETCS	80
Obrázek 48 Závislosti rychlosti na ujeté dráze pro reálný model a ETCS.....	80
Obrázek 49 Závislosti okamžité rychlosti na dráze pro litinový špalík a kotouč.....	81
Obrázek 50 Součinitel adheze a tření.....	83
Obrázek 51 Porovnání současného stavu (vlevo) a po aplikaci CR1385 (vpravo)	85
Obrázek 52 Úprava doby náběhu brzdy zprava – současný stav (vlevo), aplikace CR1344 (vpravo).....	85
Obrázek 53 Porovnání propustnosti tratí dle úrovně ETCS v %.....	92
Obrázek 54 Porovnání následného mezidobí na autobloku a při ETCS L2 s benefity	93
Obrázek 55 Eliminace vstupního zpoždění	95

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Stupně automatizace (GoA)	24
Tabulka 2	Koeficienty pro výpočet brzdné dráhy dle UIC 544-1	35
Tabulka 3	Hodnoty brzdné dráhy dle UIC 544-1 [m]	35
Tabulka 4	Délky přibližovacích úseků [m]	63
Tabulka 5	Srovnání různých způsobů náběhu brzdy	79
Tabulka 6	Srovnání součinitelů adheze	82
Tabulka 7	Srovnání dohledových limitů pro CR1344	86
Tabulka 8	Snížení objemu přepravených cestujících po zavedení VRT [%]	89
Tabulka 9	Srovnání velikosti následného mezidobí dle směrnice Správy železnic a SW OpenTrack [s]	91
Tabulka 10	Sada dat ze simulace následného mezidobí pro jeden z úseků [s]	93
Tabulka 11	Tabulka následných mezidobí	94

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Přehled stupňů automatizace a funkcí vykonávaných zabezpečovacím zařízením

Příloha B – Základní charakteristika nejběžnějších CBTC systémů

Příloha C – Funkční struktura Traffic Management System

Příloha D – Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění vlaků METRANS a křivek ETCS

Příloha E – Srovnání původních křivek SBI, W a P a křivek dle JaM

Příloha F – Srovnání brzdění vlaků společnosti METRANS a původní křivky P a upravené P_{JaM}

Příloha G – Úprava doby náběhu brzdy zprava – současný stav a aplikace CR1344

Příloha A – Přehled stupňů automatizace a funkcí vykonávaných zabezpečovacím zařízením

Základní funkce provozu vlaku		Provoz vlaku podle rozhledu	Neautomatizovaný provoz	Poloautomatizovaný provoz	Provoz vlaku bez strojvedoucího	Provoz vlaku bez obsluhy
		GoA0	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
Zajištění bezpečné jízdy vlaku	Zabezpečení jízdní cesty					
	Zajištění bezpečného rozestupu vlaků					
	Zajištění bezpečné rychlosti					
Řízení vlaku	Zrychlování a brzdění		Provozní personál nebo částečně UGTMS			
Dohled nad vodící dráhou	Zabránění střetu s překážkami					
	Zabránění střetu s osobami v kolejišti					
Dohled nad pohybem cestujících	Otevírání dveří pro cestující					
	Zabránění úrazům osob mezi vozy nebo v nástupním prostoru					
	Zajištění podmínek					

Příloha A – Přehled stupňů automatizace a funkcí vykonávaných zabezpečovacím zařízením

Základní funkce provozu vlaku		Provoz vlaku podle rozhledu	Neautomatizovaný provoz	Poloautomatizovaný provoz	Provoz vlaku bez strojvedoucího	Provoz vlaku bez obsluhy
		GoA0	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
	pro bezpečný rozjezd					
Provozování vlaku	Uvádění vlaku do provozu a odstavení z provozu					
	Dohled nad stavem vlaku					
Zajištění detekce a řešení nouzových situací	Detekce ohně/kouře a detekce vykolejení, detekce roztržení vlaku, nouzová signalizace cestujících					UGTMS nebo personál v OCC

Zdroj: (14) s úpravou autora

Příloha B – Základní charakteristika nejběžnějších CBTC systémů

Bombardier CITYFLO

Společnost Bombardier vyrábí systém CBTC pod označením CITYFLO, který dodává ve verzi od CITYFLO 250 až po CITYFLO 650. Poslední verze CITYFLO 650 umožňuje provoz jak GoA3, tak GoA4 vlaků a je koncipována i pro provoz v pohyblivých blocích. Přenos informací se děje pomocí obousměrné bezdrátové komunikace. Nedílnou součástí provozu tohoto systému jsou další podpůrné subsystémy jako řízení provozu, radiobloková centrála, ovládání výhybek, onboard unit či ATO. Systém lze také doplnit o záložní variantu pro případ mimořádné události s klasickými kolejovými obvody a návěstidly. Teoretický interval je 75 sekund. V praxi se však využívá spíše interval 100 až 110 sekund (6).

Alstom URBALIS

Společnost Alstom je dalším dodavatelem komplexního technického řešení pro CBTC. Dodávky zabezpečovacích zařízení jsou realizovány na více než 1 500 km tratí na více než 100 linkách (Lille, Sao Paulo, Mexico City, Lausanne, Peking, Singapore, Dubaj). Společnost má podíl na trhu CBTC cca 25 %. Označení jejich produktu pro CBTC je URBALIS (poslední verze 400), který existuje ve verzi GoA3 i GoA4. Pro komunikaci vozidlo-infrastruktura se používá komunikační síť, která je založena na standardu IEEE 802.11 g/a na frekvenci 2,4 nebo 5,8 GHz. K detekci přesné polohy se používají eurobalízy a odometrická čidla. Velikost následného mezidobí je u tohoto systému na úrovni 60 sekund, což je o 15 sekund méně než u řešení firmy Bombardier (16).

Thales SelTrac

Systém CBTC od firmy Thales je označen SelTrac CBTC. Opět i zde jsou možné varianty GoA3 a GoA4. Technické řešení systému SelTrac CBTC má obdobnou architekturu jako systém URBALIS. Trať je rozdělena na zóny a tyto zóny jsou rozděleny na segmenty pro zjištění polohy vlaku. Segmenty jsou realizovány pomocí indukčních smyček (poloha a výpočet polohy vlaku probíhá odometricky) nebo rádiové sítě (k určení polohy vlaku je využito radiomajáků s přesně danou polohou) dle standardu IEEE 802.11 (17).

Minimální dosažitelný interval systému SelTrac CBTC je menší než 60 s. V komerčním provozu se pak opět používá špičkový interval 90 s.

Invensys Rail Group

Řešení CBTC od tohoto výrobce má označení SIRIUS. Je použit na více než 1 000 km tratí ve městech Madrid, Barcelona, Londýn, Peking, Sao Paulo, Singapore a dalších. Tato firma je dnes součástí koncernu SIEMENS. Systém využívá rádiového spojení mezi vlakovou

Příloha B – Základní charakteristika nejběžnějších CBTC systémů

a traťovou částí zabezpečovacího zařízení a poloha vlaků je určována pomocí balíz. V čele vlaku jsou pak čidla Dopplerova radaru, který dokáže určit vzdálenost mezi vozidly. Teoretický interval tohoto systému je udáván 80 s (6).

Ansaldo STS

Systém CBTC od společnosti Ansaldo STS používá standardu IEEE 1474.1, na jehož vývoji se také podílí. Na čínském trhu spolupracuje s firmou ZTE, kde provedli úspěšné testy CBTC na LTE síti ve městě Hangzhou. V evropských městech je tímto systémem vybaveno např. metro v Brescii, Miláně či Kodani.

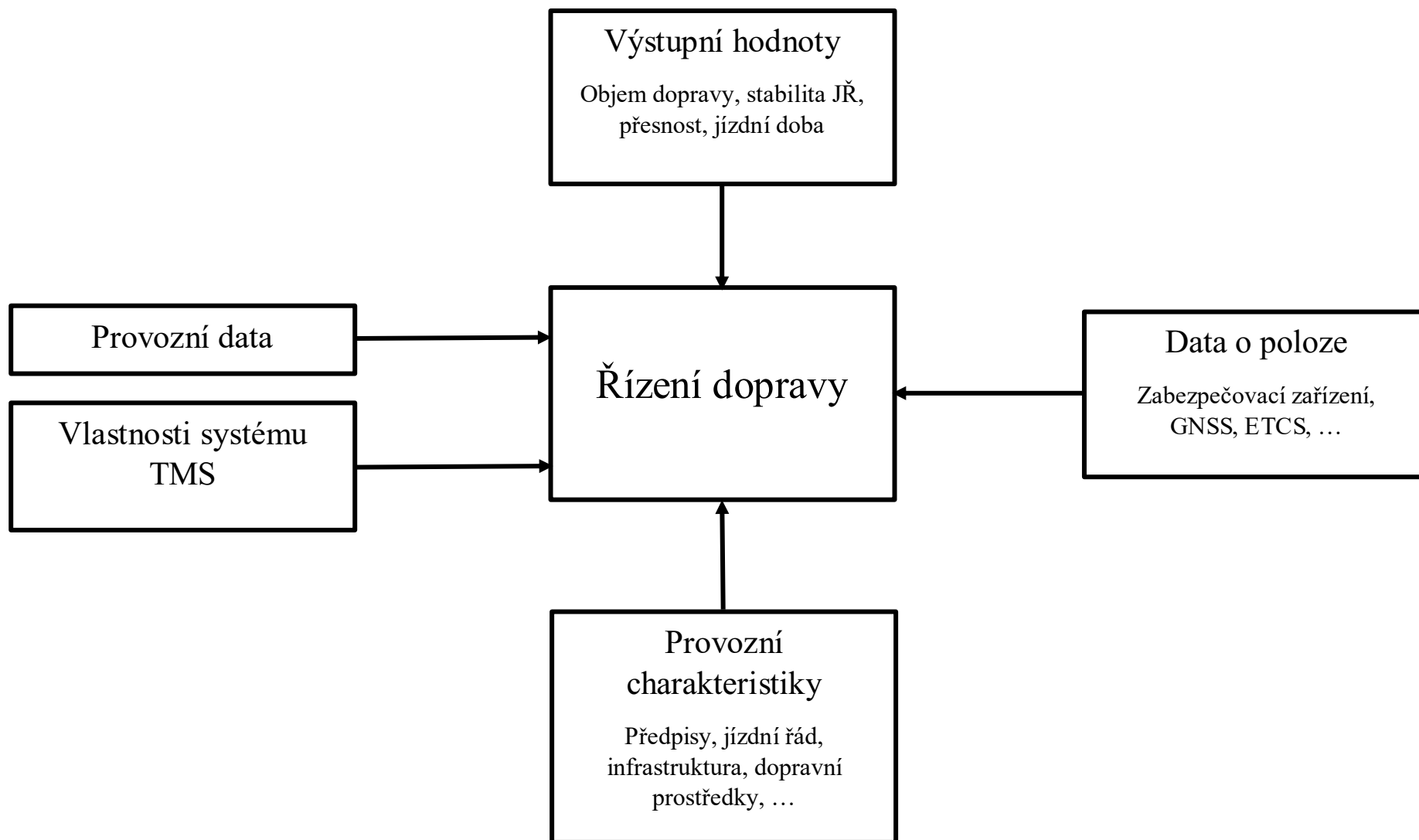
Siemens Trainguard MT

Zabezpečovací zařízení od společnosti SIEMENS s označením Trainguard MT je koncipováno jako zabezpečovací zařízení nejen pro homogenní provoz, ale také pro smíšený provoz. Tím se odlišuje od ostatních systémů dalších výrobců. Komunikace mezi traťovou a palubní částí se uskutečňuje pomocí datové komunikace na frekvenci 2,4 GHz a označuje se Airlink. Tímto systémem je vybaveno např. kodaňské metro či linky metra ve městech Barcelona, Paříž, New York, Buenos Aires a další. K určení polohy a také rychlosti souprav se používají odometrická čidla v kombinaci s Dopplerovým radarem. Systém nepoužívá pohyblivý blok, ale pro detekci volnosti oddílu využívá počítače náprav. Minimální interval je cca 80 s (6).

Hitachi CBTC

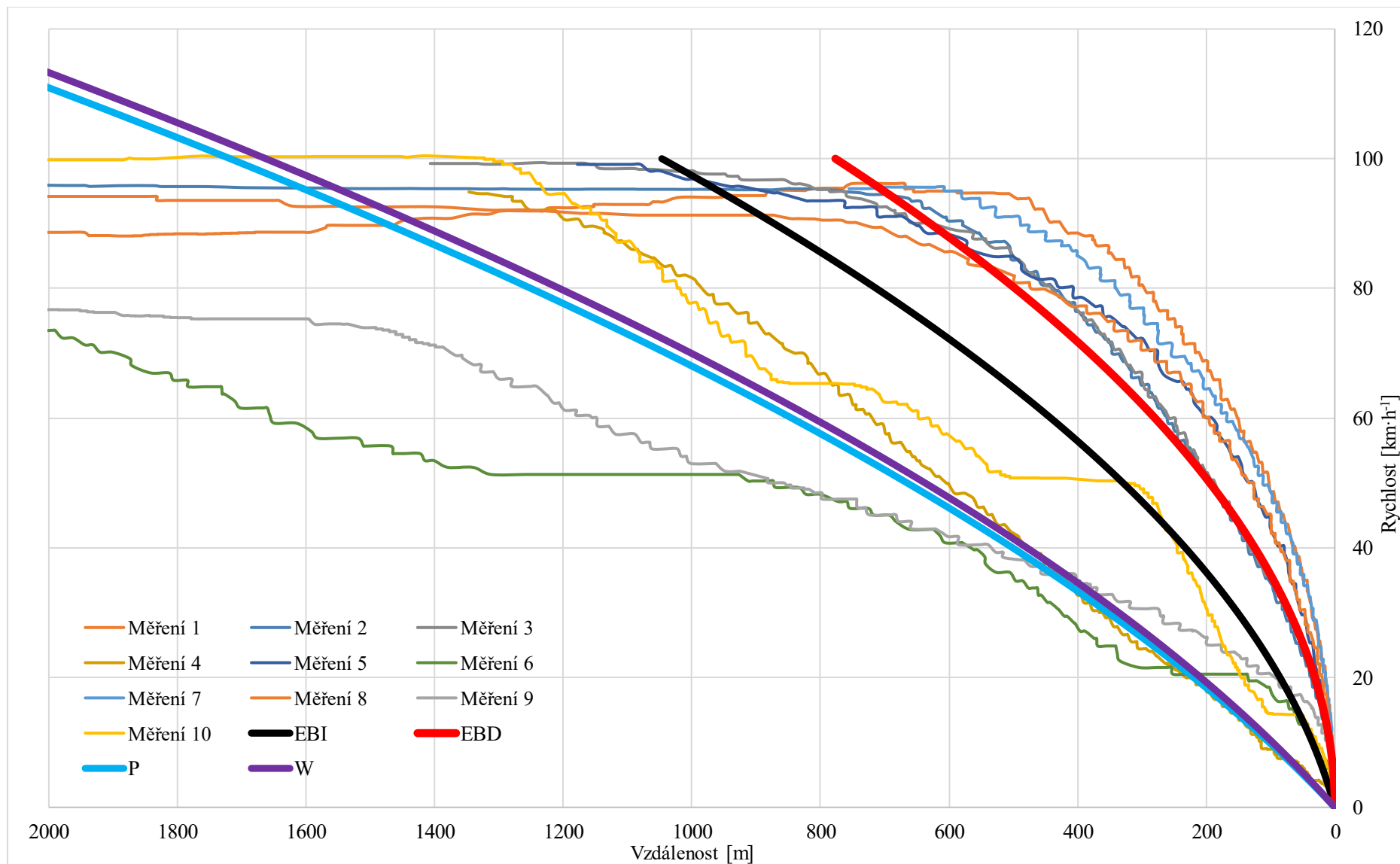
Společnost Hitachi také disponuje certifikovaným systémem CBTC. Architektura systému je stejná jako u dalších výrobců. Pro určování přesné polohy vlaku je použito měření odometrie. Pro přenos informací pak WLAN síť (2,4 GHz), která vysílá na třech kanálech současně, aby se zabránilo vzájemnému rušení. Toto zařízení umožňuje provoz ATO vlaků (GoA4). V provozu tento systém dosahuje minimálního intervalu mezi vlaky 120 s (18).

Příloha C – Funkční struktura Traffic Management System



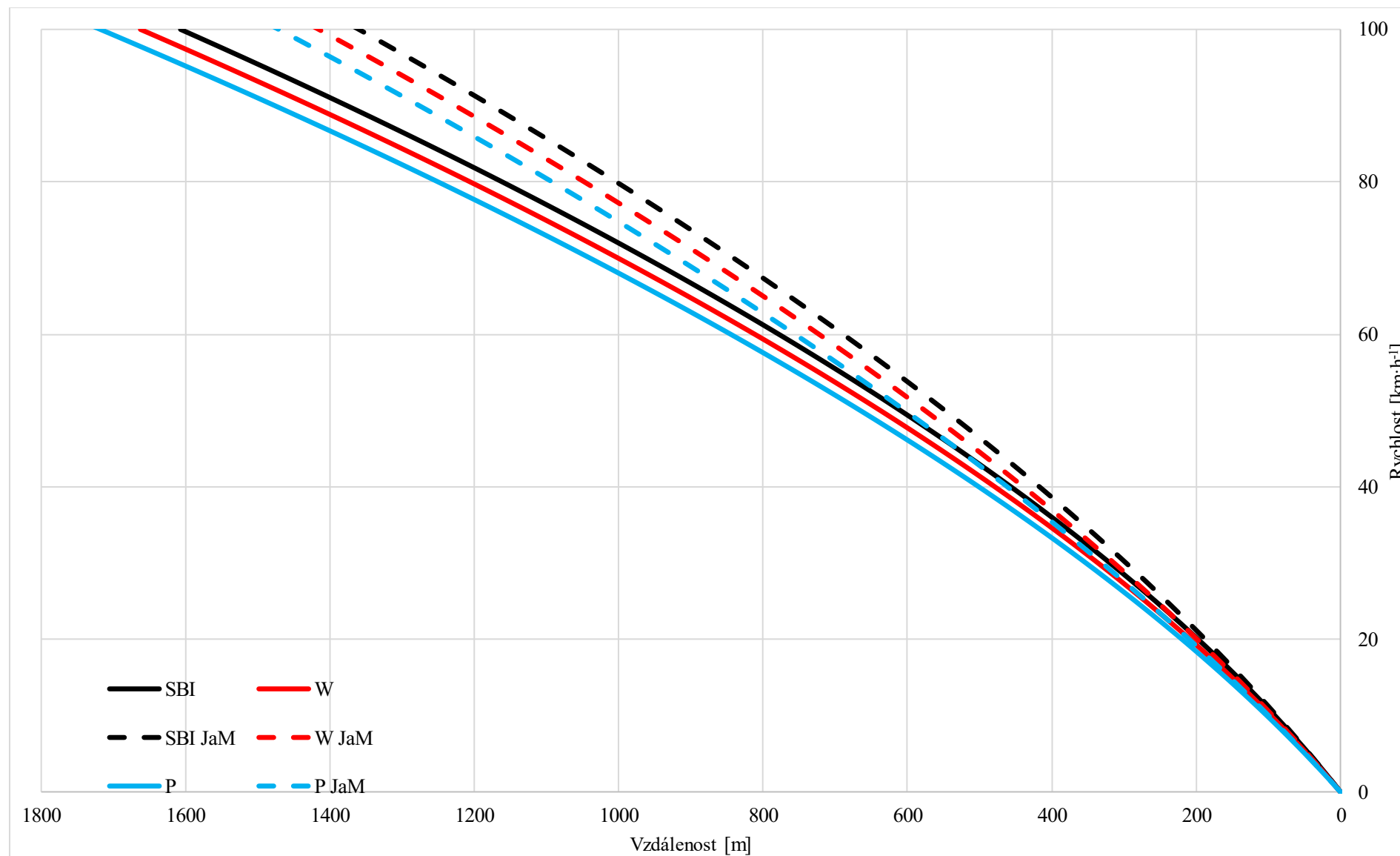
Zdroj: autor

Příloha D – Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění vlaků METRANS a křivek ETCS



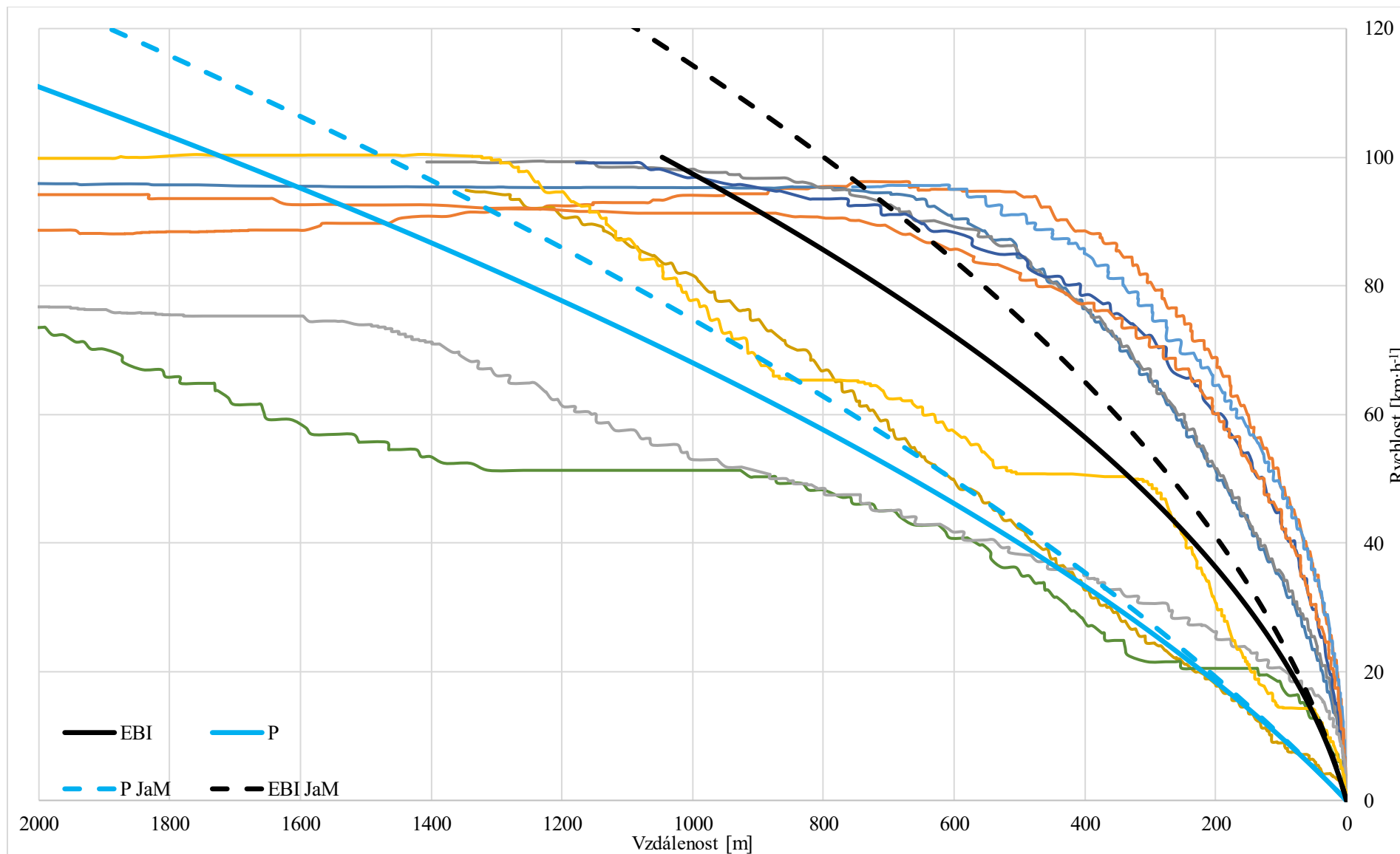
Zdroj: autor na podkladě dat od společnosti METRANS Rail v SW MS Excel

Příloha E – Srovnání původních křivek SBI, W a P a křivek dle JaM



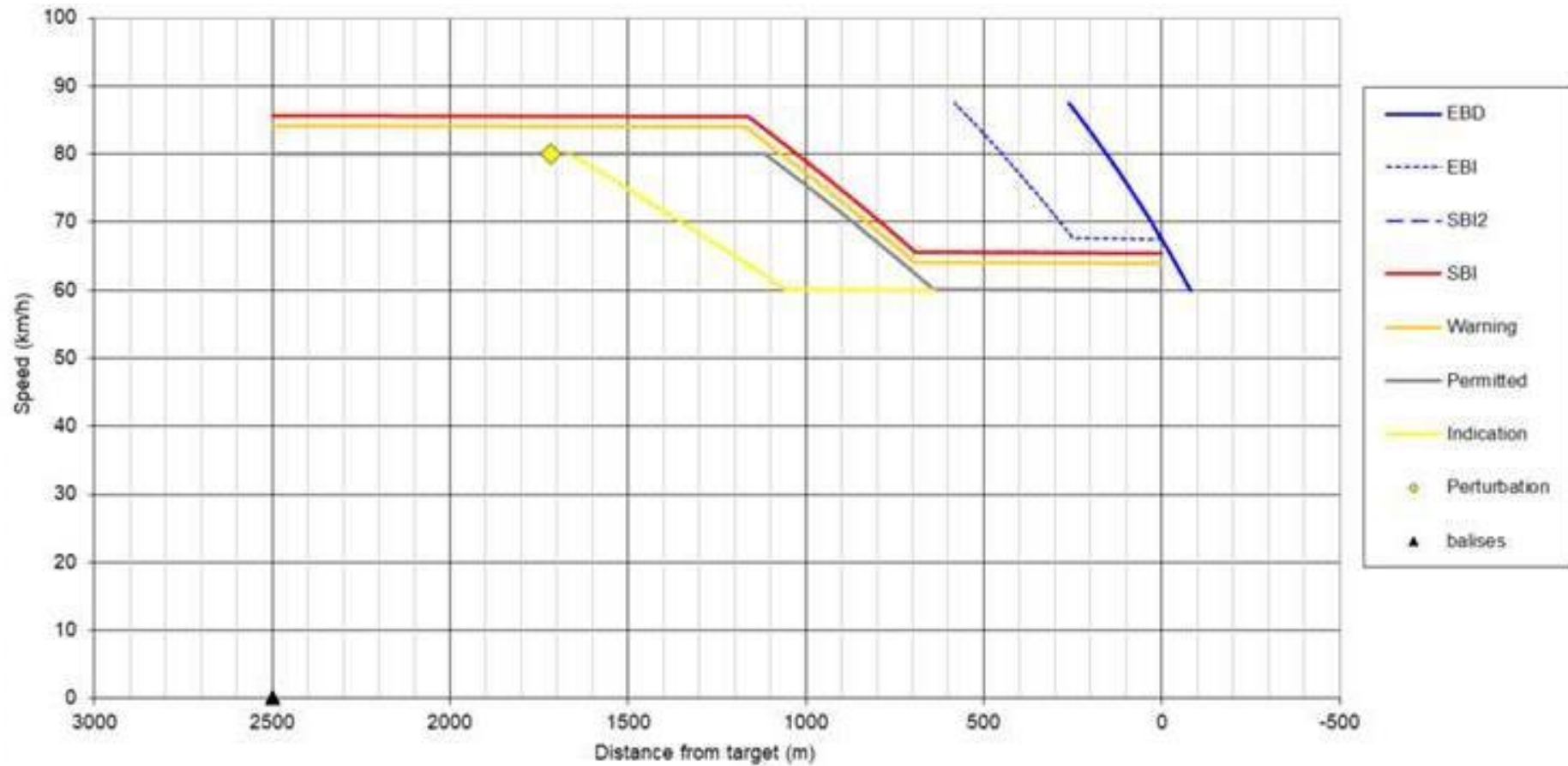
Zdroj: autor na podkladě dat od společnosti METRANS Rail v SW MS Excel

Příloha F – Srovnání brzdění vlaků společnosti METRANS a původní křivky P a upravené P_{JaM}



Zdroj: autor na podkladě dat od společnosti METRANS Rail v SW MS Excel

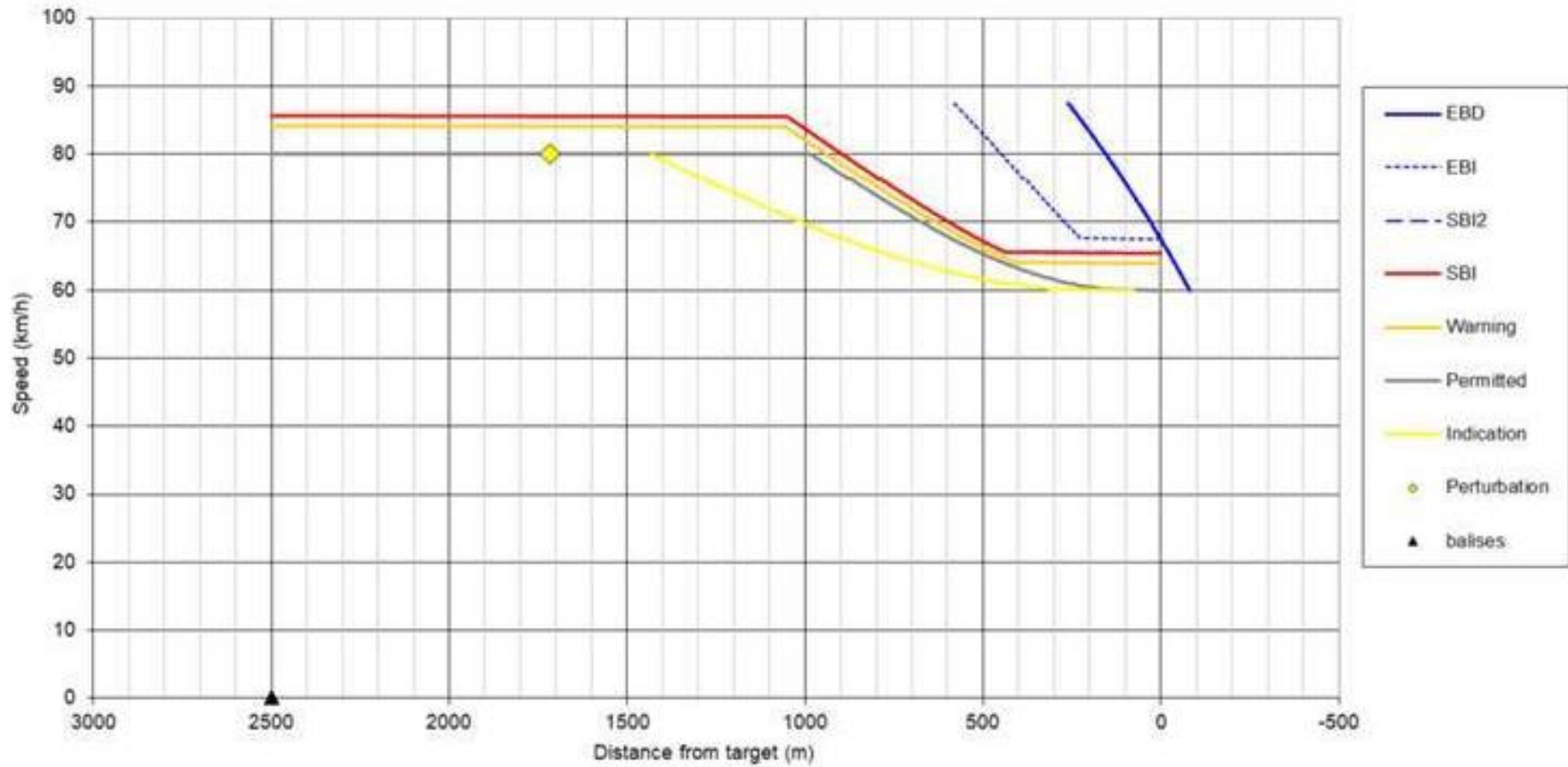
Příloha G – Úprava doby náběhu brzdy zprava – současný stav



Initial speed (km/h)	Distance from target (m)							Release speed (km/h)	Journey time
	Perturbation	Indication	Permitted	Warning	SBI	EBI	StartRSM		
80.00	1717.25	1664.91	1114.33	1069.88	1025.44	448.31	N/A	N/A	125.23

Zdroj: Ing. Jakub Marek, Ph.D. v ERA Tool

Příloha G – Úprava doby náběhu brzdy zprava – aplikace CR1344



Initial speed (km/h)	Distance from target (m)							Release speed (km/h)	Journey time
	Perturbation	Indication	Permitted	Warning	SBI	EBI	StartRSM		
80.00	1717.25	1432.02	984.94	940.50	896.06	448.31	N/A	N/A	121.68

Zdroj: Ing. Jakub Marek, Ph.D. v ERA Tool