

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vliv nových systémů zabezpečení jízdy vlaku na kapacitu železniční
infrastruktury

TEZE 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

Anotace

Habilitační práce se zabývá vlivem zavádění 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	5
Resume	6
Úvod	7
1 Nové možnosti zabezpečení jízdy vlaku	8
2 Evropský vlakový zabezpečovací systém	11
2.1 Nastavení brzdných křivek ETCS	16
2.1.1 Dohledové limity ETCS	16
2.1.2 Dohled ETCS nad snížením rychlosti	18
2.1.3 Datová struktura informací pro dohled nad snížením rychlosti	19
2.2 Možnosti úpravy brzdné křivky	20
2.3 Výpočet brzdné křivky	21
2.4 Další prostředky zvýšení bezpečnosti.....	22
3 Propustnost a kapacita tratí ve vztahu k ETCS	23
3.1 Pozitivní efekty zavedení ETCS.....	23
3.2 Negativní efekty zavedení ETCS	25
3.3 Náběh brzdného účinku	30
3.4 Průběh brzdného účinku	31
3.5 Změna Subsetů	32
4 Příprava nových staveb a využití simulace	34
4.1 Vliv ETCS na nové stavby	34
4.2 Využití simulace	34
Závěr.....	38
Citovaná literatura	39
Vlastní zdroje k tématu habilitační práce	45

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 dohledu 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 habilitation thesis aims 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 principle's point of view and the individual systems' requirements and parameters. The CBTC system, 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, capacity will be increased by 4 to 6 %.

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.

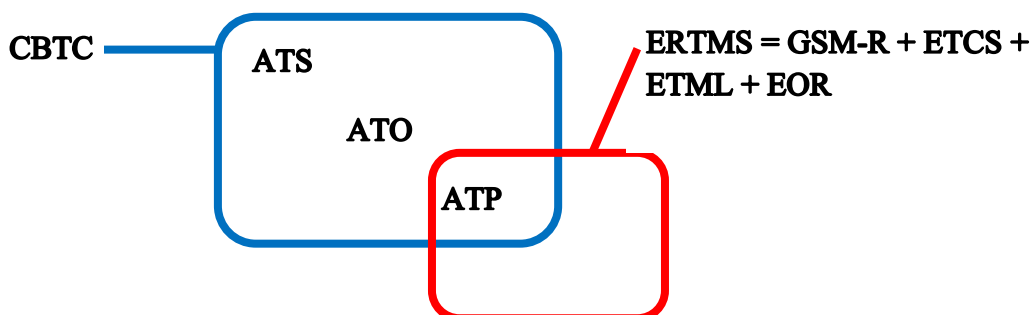
Habilitační práce poskytuje ucelený přehled o současném stavu vědeckého poznání v oblasti implementace nových způsobů zabezpečení jízdy vlaku a jeho provozních dopadech. Zvláštní pozornost je věnována zavádění Evropského vlakového zabezpečovacího zařízení¹ (dále jen ETCS) do podmínek české konvenční 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.

¹ ETCS – European Train Control System

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 NGTC², který zkoumal možnosti propojení a využití dvou systémů a to Communication-based train control (dále jen CBTC³) a European Rail Traffic Management System (dále jen ERTMS⁴). Tento projekt ukázal, jak je možné využít synergii 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 (ATS⁵), systém automatického vedení vlaku (ATO⁶) a systém vlakového zabezpečovacího zařízení s kontrolou rychlosti a místa zastavení (ATP⁷). Nově se spojení ATO a ATP systému označuje jako automatic train driving (ATD⁸). 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

² NGTC – Next Generation Train Control

³ CBTC – Communication-based Train Control

⁴ ERTMS – European Rail Traffic Management System (ETCS + GSM-R)

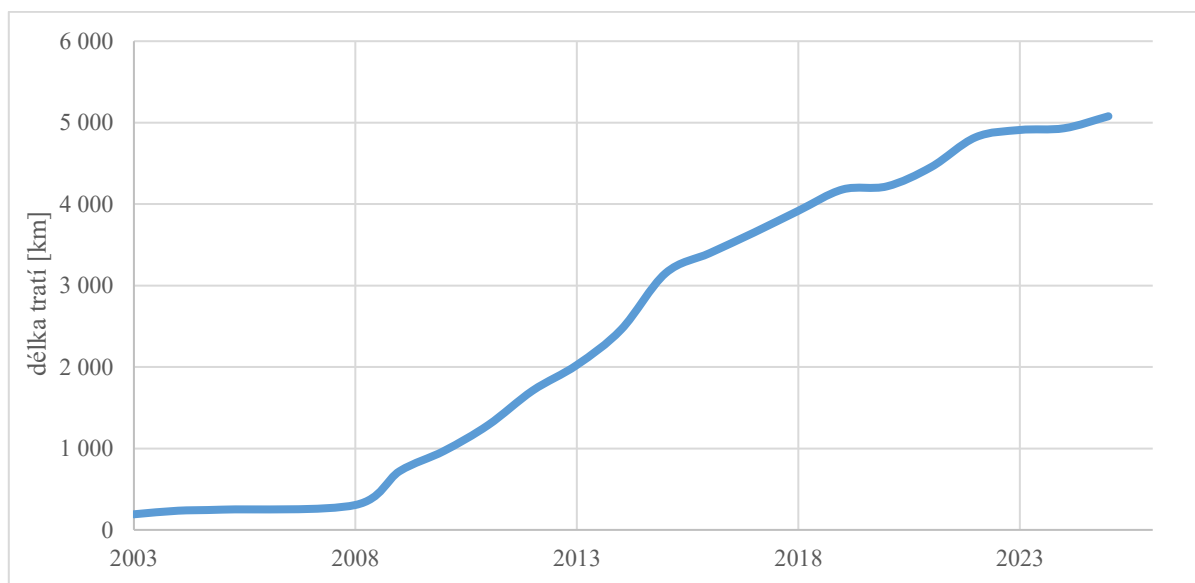
⁵ ATS – Automatic Train Supervision

⁶ ATO – Automatic Train Operation

⁷ ATP – Automatic Train Protection

⁸ ATD – Automatic Train Driving

i klimatické situace). Nejčastěji používaným standardem pro automatický provoz metra je 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

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), (10). Pro srovnání v případě pražského metra se uvažuje o střední velikosti soupravy pro cca 530 osob.

Hlavním benefitem systému CBTC je zavedení pohyblivého bloku. To však vyžaduje splnění celé řady technických podmínek a standardů (11). V případě pohyblivého bloku musí

souprava automaticky vyhodnocovat svou polohu vůči DP⁹, ze které pak odvozuje cílové místo zastavení, které je před DP předsazeno o pojistnou vzdálenost a je označeno jako EoA¹⁰. Zároveň musí brát na zřetel nepřesnost určení polohy obou souprav¹¹. Palubní část CBTC určuje polohu vlaku s vysokou přesností a rychlostní profil pro následující úsek je vozidlu odesílán 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. Vzdálenost mezi vlaky závisí na nejistotě určení obou vlaků, rychlosti vozidel, na jejich brzdných vlastnostech, rychlosti přenosu informací a pojistné vzdálenosti, kterou pokrývá provedení bezpečnostně-kritických funkcí (6), (12).

Aby byl systém pohyblivého bloku skutečně bezpečný, musí mít kontrolní systém CBTC přesnou a spojitou¹² informaci o poloze a rychlosti vlaku. Z těchto údajů vypočte traťová část zabezpečovacího zařízení oprávnění k jízdě tak, aby byl vždy zajištěn bezpečný rozestup mezi soupravami. Tato vlastnost však současně zvyšuje nároky na pojistné dráhy a rezervní časy¹³ a tím snižuje výkonnost celého systému. Zkušenosti z užívání standardu CBTC budou v dalších částech habilitační práce využity při identifikaci efektů vlakového zabezpečovače s úplnou kontrolou rychlosti, tedy ETCS. Jádro habilitační práce se tak zabývá efekty implementace ETCS v ČR.

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. Systém ATS pak má za úkol dohled nad soupravami a jejich vzájemnou koordinaci či kooperaci s dalšími částmi systému jako jsou například stanice¹⁴. 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.

⁹ DP – Danger Point

¹⁰ EoA – End of Authority

¹¹ Zejména polohy maximálního a minimálního čela a konce vlaku

¹² 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 mezdobí

¹³ Sem lze zařadit přenos a zpracování bezpečnostně-relevantních dat a nepřesnost polohy a rychlosti. Vše je nutné zohledňovat více kritickým směrem

¹⁴ Eskalátory či nástupištní stěny

2 EVROPSKÝ VLAKOVÝ ZABEZPEČOVACÍ SYSTÉM

Jak již bylo uvedeno na obrázku 1, Evropský vlakový zabezpečovací systém ETCS je podmnožinou ERTMS¹⁵, jehož další nedílnou součástí je GSM-R¹⁶, ETML¹⁷ a EOR¹⁸. 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 (13).

Veškeré principy a fungování ETCS jsou obsaženy v tzv. specifikacích¹⁹, 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 zabezpečení²⁰. Proces tvorby specifikací je organizován a zaštiťován Evropskou železniční agenturou²¹ tak, aby byl zajištěn jednotný výklad všech funkcí a pojmů, které následně ovlivňují chování a bezpečnost celého systému. (14). 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 SZZ²², TZZ²³ či PZ²⁴. Obecnými principy, vlastnostmi a nasazením vlakového zabezpečovače ETCS se zabývají zdroje (15) (16), (17), (18), (19), a (20). S postupnou implementací ETCS Level 2 (dále jen ETCS L2) na české železnici se tento systém vlakového zabezpečovače stal velmi diskutovaným tématem v řadách odborné veřejnosti (21). 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.

Prvním tématem je dilema, zda **vybavit současná hnací vozidla novým vlakovým zabezpečovačem** nebo **pořizovat vozidla nová**, která mají tento zabezpečovač implementován

¹⁵ ERTMS – European Rail Traffic Management System

¹⁶ Global System for Mobile Communications – Railway

¹⁷ ETML – Evropský standard provozního řízení

¹⁸ EOR – Evropské provozní předpisy

¹⁹ Set of specifications 1, 2, 3

²⁰ TSI CCS – Technical specifications for interoperability – Control Command and Signaling

²¹ ERA – European Railway Agency

²² SZZ – staniční zabezpečovací zařízení

²³ TZZ – traťové zabezpečovací zařízení

²⁴ PZ – přejezdové zabezpečení

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 období²⁵ 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 rozmělnuje. 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 LS²⁶ a ETCS STOP²⁷. 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.

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 (22) a (23).

²⁵ 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.

²⁶ ETCS L1 LS – LS je limited supervision. Bodový vlakový zabezpečovač, který aktivuje nouzové brzdění v případě projetí konce oprávnění k jízdě.

²⁷ ETCS STOP – systémová verze, která umí především schopná při projetí návěsti stůj nouzově zastavit vlak a dohlíží také nejvyšší dovolenou rychlost.

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 (17), (24) 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 nebo Olomouc – Uničov. Další 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 ohrožení²⁸ 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 křížování 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.

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 integrity²⁹. 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 návěstidel,

²⁸ Může se jednat o námezník nebo hrot výhybky. Obecně tedy místo, kde reálně hrozí kolize dvou vozidel.

²⁹ Fyzickou kontrolou integrity bude zajišťovat jednotka OTI, která bude tuto informaci předávat OBU

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 (25), který shrnuje principy funkce Hybridního modelu ETCS L3³⁰, a který není souborem specifikací pro tento systém, ale je to důležitý dokument Users Group EEIG ERTMS³¹ (26), (27), (28).

Z porovnání vyplývá, že při rychlosti 160 km·h⁻¹ je kapacita tříznakého autobloku srovnatelná s aplikací ETCS L2. 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 habilitační práce.

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 rychlosti vlaku dle rychlostníků nebo návěstidel či rychlostní návěstní soustavy. S tím souvisí stanovení zábrzdne vzdálenosti, na kterou se návěstidla (kmenové návěstidlo a jeho předvěst) umísťují, 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 brzdící procento bylo vyšší nebo rovno předepsané hodnotě³². Výsledné snižování rychlosti vlaku je podstatnou měrou dáno citem, schopnostmi a zkušenostmi strojvedoucího. Zároveň je patrné určité bezpečnostní riziko, které spočívá v tom, že když strojvedoucí nesnižuje rychlost vlaku dostatečně (nebo vůbec³³), může velmi reálně a závažně ohrozit železniční provoz

Brzdící procento

Již bylo uvedeno, že brzdící procenta (λ) se v ČR získávají ze Zprávy o brzdění vlaku. Jejich výpočet je dán vztahem 1. 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 [%],

BPbrzdící hmotnost daná počtem a typem použitých brzd [tuny],

SHskutečná hmotnost vozů včetně nákladu či cestujících [tuny].

³⁰ Hybrid ERTMS/ETCS Level 3

³¹ EEIG ERTMS – European Economic Interest Group ERTMS

³² Předepsané brzdící procento je v Příloze 2 Vyhlášky 173/1995 Sb. – Dopravní řád drah

³³ 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.

Na úrovni ERA je uvažováno jiným způsobem a pomocí Kodexu UIC 544-1 (29) se stanovuje celková brzdná 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.

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

Kde:

s.....brzdná dráha [m],

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

λ brzdící procento [%].

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 vyhlášce 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 brzdě dráhy dle UIC 544-1 pro vlaky se 100, 150 a 200 brzdícími procenty v tabulce 2.

Tabulka 1 Hodnoty brzdě 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 projetí návěstidla zakazující jízdu (30). 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 Švýcarsko³⁴, 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 balíčovými skupinami.

2.1.1 Dohledové limity ETCS

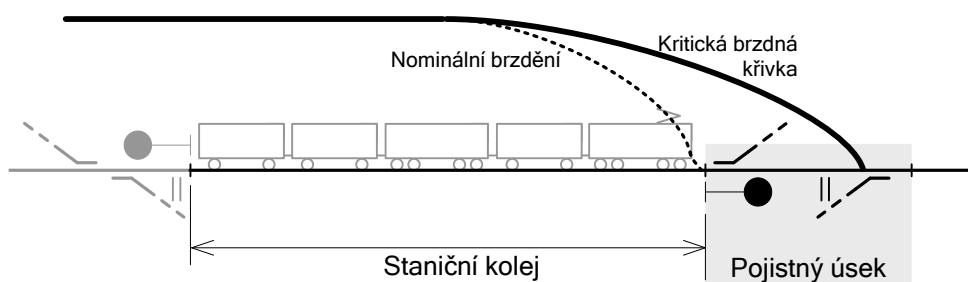
Pojem brzdná křivka (brake curve) je ve specifikacích ETCS řešen v Subsetu 026 (31). V části 026-3 jsou uvedeny základní principy fungování ETCS včetně MA, kontroly dodržování rychlostních limitů a výpočtu brzdných křivek. Samostatná příloha je věnována NV. Právě výpočet brzdného zpomalení (dále jen odrychlení³⁵) je klíčovým parametrem pro zajištění bezpečnosti železničního provozu. Vlastnosti brzdného modelu, resp. odlišnosti od současných zvyklostí budou hrát rozhodující roli při zvýšení či snížení propustnosti.

Na vlakovou soupravu se ETCS může dávat ze dvou pohledů. Tím prvním jsou ucelené soupravy o přesně měřitelných brzdných vlastnostech. 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 brzdící procento. Takové vlaky se nazývají **lambda** (32). 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.

³⁴ Informace od Ing. Tomáše Konopáče (manager programu implementace ETCS Správy železnic

³⁵ Odrychlení – tento pojem užívá autor pro **brzdné 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.

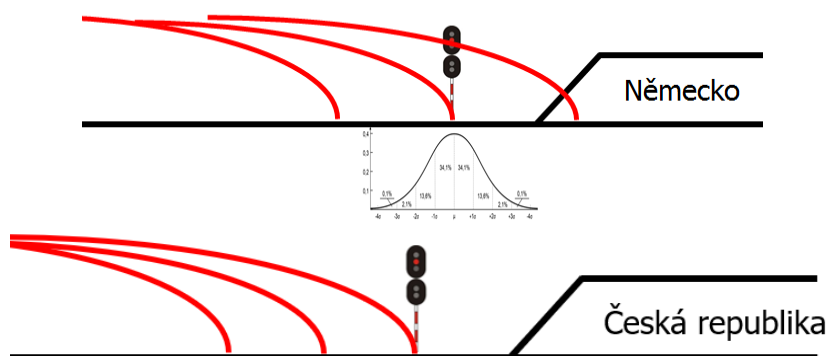
V podmínkách ČR je tato skutečnost dále prohloubena způsobem a zvyklostí brzdění ve vazbě na infrastrukturu, protože konec MA označovaný jako EoA³⁶ je totožný s místem ohrožení (dále jen DP³⁷). V řadě zemí, kde se uplatňují tzv. prokluzové vzdálenosti, jsou tato dvě místa odlišná (místo ohrožení není návěstidlo, ale výhybka), a vytváří tak lepší výchozí pozici pro dojíždění vlaku k návěstidlu. Situace zobrazená na obrázku 4 ukazuje rozdíl v kritické a nominální brzdné křivce v případě použití prokluzového úseku. Tento prokluzový úsek pak poskytuje prostor pro strojvedoucího, aby i při brzdění k EoA nepřekročil DP.



Obrázek 3 Pojistný (prokluzový) úsek

Zdroj: (11)

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 (viz. obrázek 5).



Obrázek 4 Vedení vlaku k návěstidlu v Německu a ČR

Zdroj: (32)

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 závislosti prokluzové vzdálenosti na rychlosti vlaku. Více o této problematice pojednává literatura (33).

³⁶ EoA – End of Authority

³⁷ DP – Danger Point

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 limitů³⁸ 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 (34), (35). Jejich hlavním rysem byla jednoznačná algoritmizace umožňující parametrizovat vozidlo při příjezdu na konkrétní železniční infrastrukturu, a to na základě dat ze stacionární části ETCS, které stanovuje manažer infrastruktury. 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.

2.1.2 Dohled ETCS nad snížením rychlosti

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. 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

³⁸ Tento výraz je užíván také pro „dohledové křivky“ či „kritické dohledové křivky“.

procesem a průkazem bezpečnosti, tedy prokázat, že neovlivňuje schopnost systému pracovat spolehlivě a bezpečně.

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. Vlak projetím nad balízovou skupinou pomocí BTM³⁹ modulu indukuje proud a balízová skupina tak předá vlaku informace, které obsahuje. Balízové skupiny se rozlišují na nepřepínatelné⁴⁰ a přepínatelné⁴¹. **Nepřepínatelná balízová skupina** zpravidla obsahuje informaci o své poloze a národní identifikátory balízové skupiny. **Přepínatelná balízová skupina** je napojena na LEU⁴² 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.

Odchylka aktuální a plánované polohy vlaku se označuje jako chyba **odometrie**. Velikost této chyby je dána Subsetem 041 (34), (35) a (36) a činí $\pm (5 \text{ metrů} + 5 \% \text{ ze vzdálenosti od LRBG})$. 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.

2.1.3 Datová struktura informací pro dohled nad snížením rychlosti

Každé MA začíná u BG, která je v MA přímo definovaná (identifikovaná). Její konec pak označuje jako konec oprávnění k jízdě (EoA). 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). 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).

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

³⁹ BTM – Balise Transmission Module

⁴⁰ Fixed Data Balise nebo Fixed Balise

⁴¹ Transparent Data Balise, Switchable nebo Controllable Balise

⁴² LEU – Lineside Electronics Unit

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 NV) 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 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.

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. Podobné je to v současnosti při aplikaci vlakových cest s omezením (dále jen VCO). Správné nastavení NV ETCS je tak významným prvkem v udržení současné propustnosti české železniční infrastruktury.

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 k rozvolnění dohledu může být zároveň chápána jako bezpečnostní riziko a schvalovací orgán, kterým je Posuzovatel bezpečnosti⁴³ může požadovat průkaz, že daná úprava neznámá systémové bezpečnosti riziko⁴⁴.

2.2 Možnosti úpravy brzdě křivky

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

⁴³ AsBo – Assessment Body – posuzovatel bezpečnosti dle nařízení 402/2013/EU

⁴⁴ Samotné defaultní hodnoty průkazem bezpečnosti neprošly, resp. spoléhá se na jejich obecnou platnost

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:

- dimenzovat železniční provoz na kritický stav. To je možné u nově budované infrastruktury. Délky staničních kolejí budou prodlužovány na délku potřebnou pro tento kritický přístup. U současné infrastruktury je to možné také, a to zřizováním OL nebo umělým zkrácením užitečné délky koleje (37).
- Snižít 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 (38).
- 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 změnu⁴⁵. Tyto požadavky jsou řešeny na úrovni pracovních skupin UNISIG⁴⁶ či EUG⁴⁷.

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 (39), 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. 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.

Při výpočtu brzdných křivek se užívají dvě základní brzdné křivky – provozní a nouzová. Tyto křivky jsou označovány jako SBD⁴⁸ a EBD⁴⁹. Křivka SBD se vygeneruje v případě, že NV v dané zemi umožňují ETCS zasáhnout do provozního brzdění. V opačném

⁴⁵ CRs – Change requests

⁴⁶ UNISIG – Union Industry of Signalling

⁴⁷ EUG – ERTMS Users Group

⁴⁸ SBD – Service brake deceleration – křivka provozního brzdění

⁴⁹ EBD – Emergency brake deceleration – křivka nouzového brzdění

případě se generuje pouze EBD. Výsledná funkce brzdného odrychlení je dána vztahem 3. Konkrétní hodnoty koeficientů a_{mn} jsou uvedeny v literatuře (31).

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

Kde:

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

$a_{1n}, a_{2n}, a_{3n}, a_{0n}$ koeficienty odrychlení dle literatury (31) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

λ brzdící procento [%].

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, aby zvýšení bezpečnosti bude mít za následek zhoršení provozních vlastností systému.

Kromě dvou základních brzdných 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 SBI⁵⁰ a EBI⁵¹. Jedná se tedy o okamžik, ve kterém dojde k aktivaci příslušné brzdy a tato křivka je předsazena oproti SBD či EBD o náběh příslušné brzdy.

2.4 Další prostředky zvýšení bezpečnosti

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 (40) 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 (41) a (42). 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 (43).

⁵⁰ SBI – Service Brake Intervention

⁵¹ EBI – Emergency Brake Intervention

3 PROPUSTNOST A KAPACITA TRATÍ VE VZTAHU K ETCS

Pojmy kapacita a propustnost tratí jsou velmi často zaměňované výrazy, které zdánlivě znamenají totéž. 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 jízdními řády, které se využívají v Integrovaných dopravních systémech a v dálkové dopravě i na národní úrovni. Další rozměr také přináší vnímání kvality, kdy různá úroveň kvality odpovídá různé kapacitě. Zcela zásadní literatura v této oblasti je (44) 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. (45) a (46), 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.

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.

3.1 Pozitivní efekty zavedení ETCS

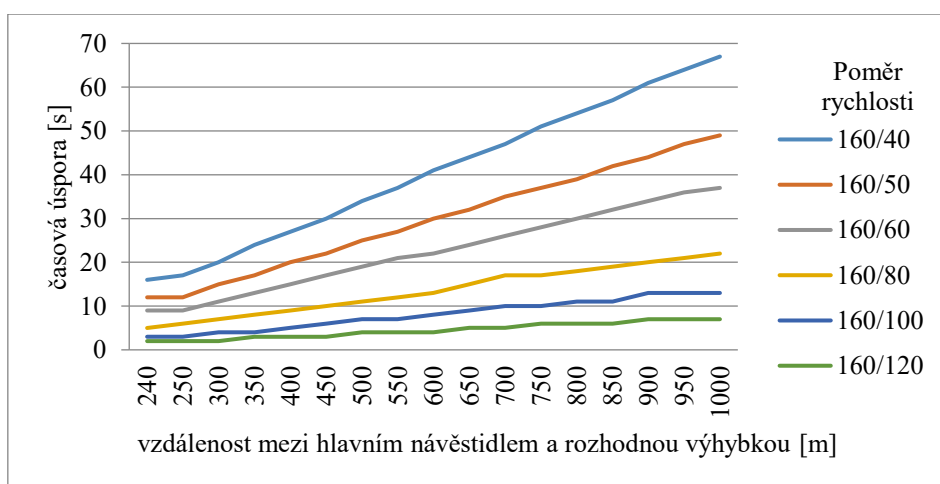
Mimo pozitivní efekty v oblasti bezpečnosti se jako jeden z dalších pozitivních efektů uvádí také zvýšení propustnosti tratí. Tento efekt vychází z předpokladu, že pod dohledem ETCS je možné definovat rychlostní profil obecně, tedy bez vazby na rychlostní návěstní soustavu. Změna rychlosti pak může být 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 spolehlivěji než strojvedoucí. První zkušební úsek je Ejpovický tunel (47), 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 odvratné výhybky nebude potřeba VCO.

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 navěštěná 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 předjízdňou kolej sníženou rychlostí.

V tomto případě lze kvantifikovat přínosy zavedení ETCS na provozních intervalech, době obsazení či samotné jízdňí době. Klíčem k tomuto výpočtu pak je vzdálenost mezi hlavním návěstidlem a rozhodňou výhybkou a také rychlost v přímé a odbočňé větvi výhybky. Hluběji se autor se spoluautory touto problematikou zabýval roku 2015 v literatuře (32) a dospěli k závěrům, které lze interpretovat na obrázku 8. Časový přínos u žádné z variant nepřekračuje jednu minutu. To není nikterak vysoká hodnota, ale i ta může mít vliv na jízdňí dobu i provozní intervaly.



Obrázek 5: Úspora jízdňí doby

Zdroj: (32)

Jako zatím nedořešená otázka se jeví případ, kdy je v jízdňí cestě na zhlaví stanice přejezdňové zabezpečovací zařízení. Nastavení přibližovacího úseku totiž může znemožňit plně

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 (48). Autor zde analyzuje, za jakých podmínek by bylo možné použít proměnlivou dobou výstrahy přejezdového zabezpečovacího zařízení.

Tabulka 2 Délky přibližovacích úseků [m]

	Rychlost [km·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: (48)

Uměle je tak snížena kapacita pozemní komunikace. Pro ilustraci jsou v tabulce 3 uvedeny délky přibližovacích úseků pro různé rychlosti a různé počty traťových kolejí.

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 (48) 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.

3.2 Negativní efekty zavedení ETCS

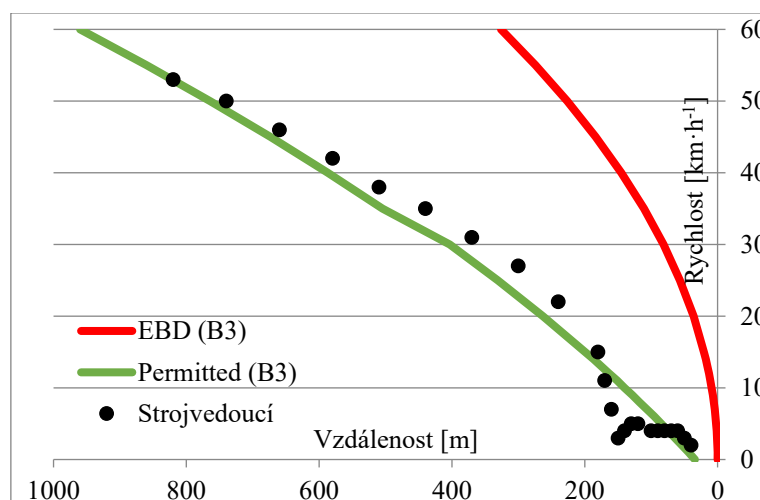
V září 2021 schválila vláda ČR plán implementace ETCS v ČR pod názvem Plán moderního zabezpečení české železnice (49). V tomto plánu jsou uvedeny konkrétní termíny zavedení na jednotlivých tratích a také očekávaná finanční náročnost. Velkým posunem oproti předchozím plánům implementace ETCS je konkrétní podpora pro dopravce na obnovu vozového parku a na vybavení vozidel palubní částí. Mezi 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 (50). 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 brzdnu křivku dle ETCS. 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.

Lokomotiva TRAXX

Při testovacích jízdách na vozidle společnosti METRANS Rail, byly opakovaně prováděny zkoušky, kdy měl strojvedoucí za úkol brzdit 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 možné⁵². 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 6 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění českého strojvedoucího a ETCS

Zdroj: autor

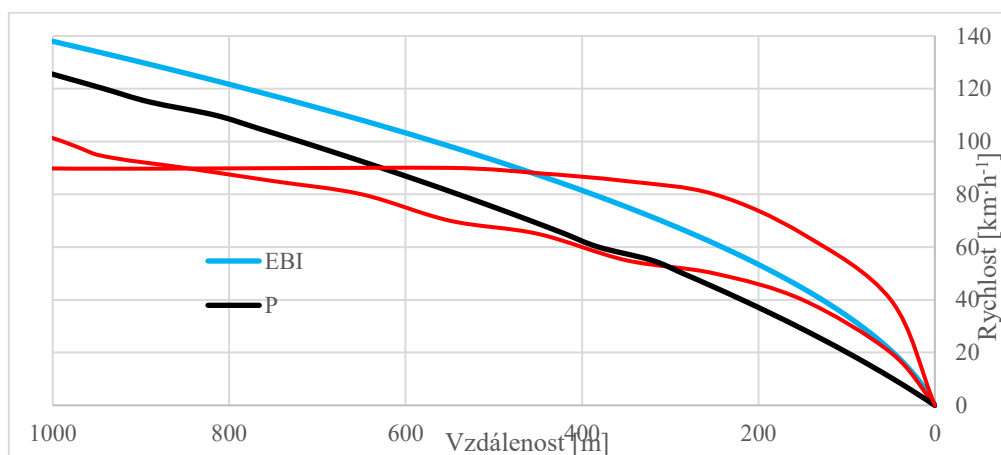
Obrázek 12 ukazuje brzdění strojvedoucího nákladního kontejnerového vlaku. Je patrné, že ve vzdálenosti mezi 900 a 300 metry se rychlost vlaku nesnižuje dostatečně rychle, což má v další fázi za následek další snížení tlaku v potrubí a skokové zpomalení hluboko pod křivku P. Z principu jejich fungování proto trvá, než tato brzda začne účinkovat a také, než účinkovat přestane. 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

⁵² Nebo by vedlo k aktivaci nouzové brzdy

10 km·h⁻¹. Řešením je opět uvolňovací rychlost, která by způsobila to, že by se na obrázku 31 pod uvolňovací rychlostí⁵³ nedohlížela a strojvedoucí by byl omezen pouze křivkou EBD.

Expresní vlak společnosti ČD

Další sadou dat byly údaje z rychloměrů o jízdě vlaku Ex 145 Landek. Na obrázku 15 je zachycen průběh brzdění pro Ex 145 Landek (červené křivky) a brzdných křivek ETCS (P a EBI). Z těchto průběhů je patrné, jak výrazně jsou oba reálné průběhy brzdění nad těmi, které povoluje ETCS. Z pohledu bezpečnosti však bude za celý proces brzdění zodpovědný systém ETCS.



Obrázek 7 Graf závislosti rychlosti na vzdálenosti pro srovnání brzdění Ex 145 Landek a křivek ETCS

Zdroj: autor na podkladě dat ČD, a.s. a (51)

Otázkou tedy je: **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. (52). 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 (53) a (54). 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 (31) jako vztah 4.

$$a_{brake_safe} = K_{v_int}(V) \cdot K_{r_int}(L_TRAIN) \cdot a_{brake_emergency} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (4)$$

Kde:

⁵³ Tuto rychlost stanovuje manažer infrastruktury jako součást národních hodnot – zpravidla není vyšší než 30 km·h⁻¹.

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 4 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 5.

$$a_{brake_safe} = 0,7 \cdot 0,9 \cdot a_{brake_emergency} = 0,63 \cdot a_{brake_emergency} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (5)$$

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 (53) 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 6.

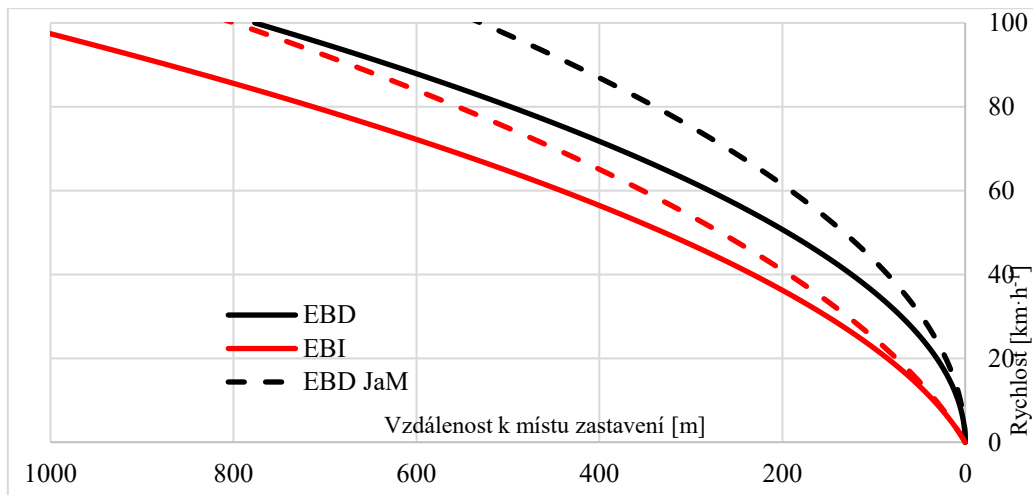
$$a_{brake_safe_JaM} = 0,7 \cdot 1,32 \cdot a_{brake_emergency} = 0,924 \cdot a_{brake_emergency} [m \cdot s^{-2}] \quad (6)$$

Kde:

$a_{brake_safe_JaM}$ bezpečné odrychlení dle literatury (53) [$m \cdot s^{-2}$],
 $a_{brake_emergency}$ 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 případ⁵⁴ ($a_{brake_emergency} = 0,7885 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) do vztahu 11, vyjde hodnota nového a_{brake_safe} . Hodnota upraveného bezpečného odrychlení $a_{brake_safe_JaM}$ je tak $0,7286 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a na obrázku 16 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.

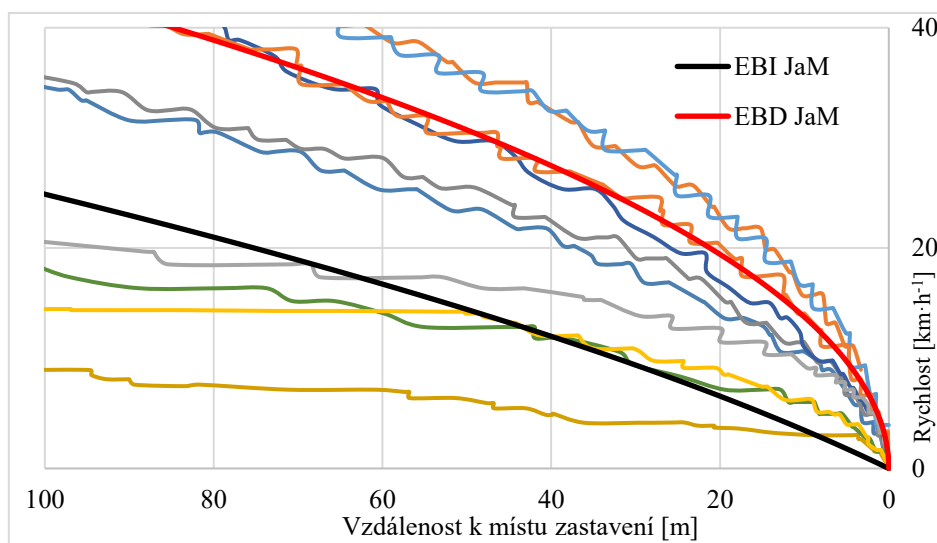
⁵⁴ Vlak společnosti METRANS – 95 brzdících procent, $L = 620$ metrů, nákladní vlak s brzdou v poloze P



Obrázek 8 Srovnání původní křivky EBI (černá) a EBD (červená) po úpravě dle (53)

Zdroj: autor na podkladě dat METRANS a (51)

Úprava odrychlení $a_{brake_safe_JaM}$ na $0,7286 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ posunula křivku EBD_{JaM} více do středu hodnot z měření od společnosti METANS, 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 17.



Obrázek 9 Úprava dohledových křivek

Zdroj: autor na podkladě dat METRANS a (51)

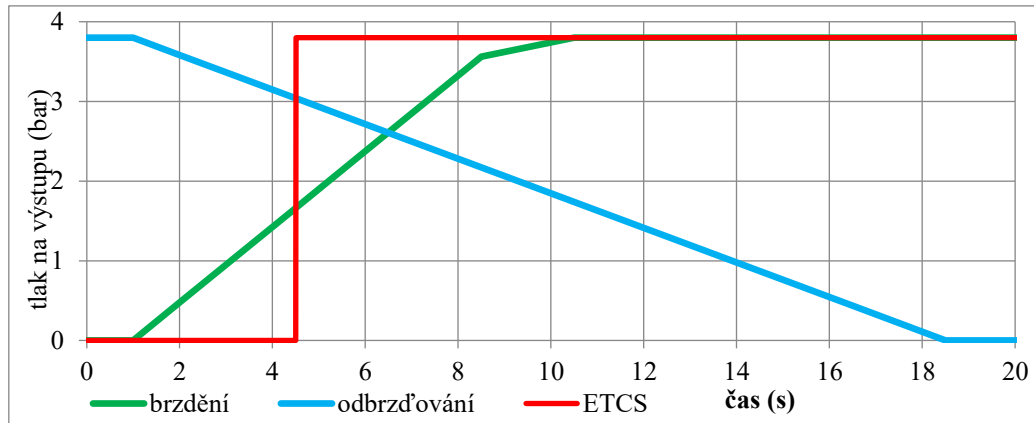
Tato úprava brzdného modelu dle Marka, tedy výrazně zlepšuje tvar brzdné křivky zejména ve vyšších rychlostech, což zkracuje především celkovou dobu brzdění. V oblasti rychlostí pod $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ je však tento efekt již minimální. Jedním z možných řešení je tak aplikace release speed. 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 (55). 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 (55) 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.

První a třetí fáze jsou tedy stejné, ale u druhé fáze dochází v případě ETCS k výraznému zjednodušení – nedochází k postupnému nárůstu brzdného účinku, ale vlak polovinu času náběhu brzdy 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 (obrázek 19).



Obrázek 10 Dynamická charakteristika rozvaděče v režimu P

Zdroj: autor na podkladě konzultací s Ing. Pohlem

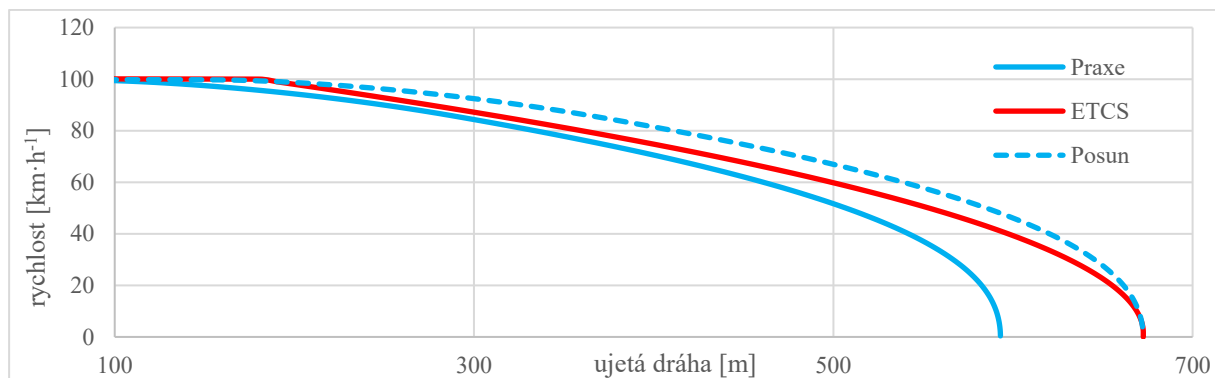
Jaký je však důsledek toho rozdílu ve tvaru obou křivek? Předně je třeba uvést, že z pohledu bezpečnosti je spíše restriktivnější. Na druhou stranu se odklání od reality brzdění vlaku, což může způsobovat provozní problémy. Pro lepší pochopení celé problematiky byla sestavena tabulka 4, kde jsou uvedeny 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. V tabulce 4 jsou porovnány dva nejběžnější způsoby brzdění P a G.

Tabulka 3 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 4 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). Pokud je doba zastavení v současnosti rovna 31,10 s, tak u ETCS je tento čas 42,67 s, z čehož 6,12 s tvoří vlastní náběh brzdy. Také dráha se u obou přístupů liší (obrázek 21).



Obrázek 11 Závislosti rychlosti na ujeté dráze pro reálný model a ETCS

Zdroj: autor na podkladě konzultací s Ing. Pohlem

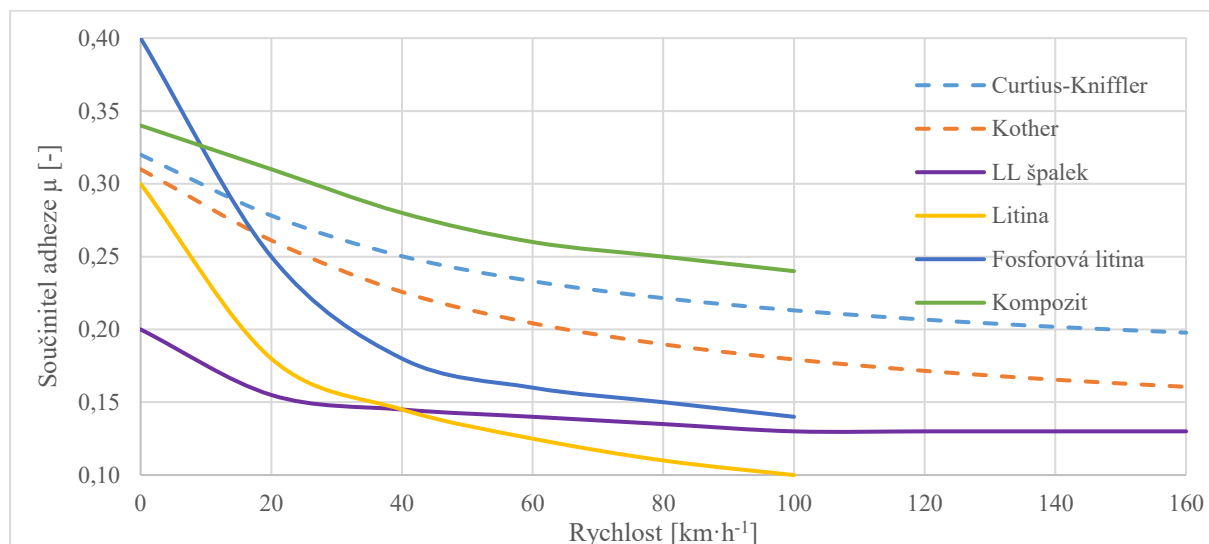
3.4 Průběh brzdného účinku

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 (31) 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 přítlaku

brzdových špalíků na kola. Neliší se brzdná dráha jako taková, ale liší se průběh brzdného účinku, tedy tvar brzdné křivky.

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. K součinitelům adheze je pak dobré přidat ještě součinitele tření pro různé druhy materiálů třecích ploch. Společně jsou na obrázku 23.



Obrázek 12 Součinitel adheze a tření

Zdroj: autor na podkladě (55)

Vlivem zavádění TSI se na evropských železnicích začaly používat nekovové špalky typu LL. Jejich značnou výhodou je nižší hlučnost, nevýhodou pak mnohem vyšší měrná cena⁵⁵ a také výrazně horší adhezní charakteristika (fialová křivka). Provozní zkušenosti odhalily, že brzdné schopnosti těchto špalků výrazně klesají při nižší teplotě, tedy v zimě či při brzdění neohřátým špalkem (z nižší rychlosti).

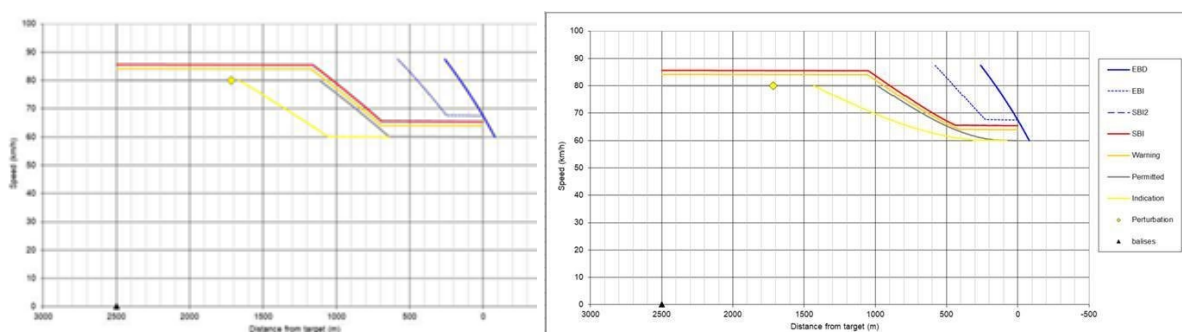
3.5 Změna Subsetů

V kapitole 3.4 je zmíněn výzkum Jakuba Marka z AŽD Praha, s.r.o., který v literatuře (54) uvádí, že je možné upravit brzdny 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 (54) byla při UNISIG zřízena speciální skupina, kladoucí si za cíl dořešit tyto CR až do podoby změny Subsetů.

⁵⁵ 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.

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 bude systém vědět, že vlak snižuje svou rychlost dostatečně a zastaví před koncem MA.

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 nereflektuje 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 25.



Obrázek 13 Úprava doby náběhu brzdy zprava – současný stav (vlevo), aplikace CR1344 (vpravo)

Zdroj: podklady od Dr. Marka

V návrhovém stavu bude nutné mít vlak požadovanou rychlost cca 80 metrů od omezení rychlosti. Přínos tohoto opatření je shrnut v tabulce 5.

Tabulka 4 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

4 PŘÍPRAVA NOVÝCH STAVEB A VYUŽITÍ SIMULACE

Zkušeností s provozními aspekty ETCS 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 (56), 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 návěstní znaky byly zcela odlišné od těch na konvenční železnici.

Také se do zadávacích dokumentací veřejných zakázek dostaly určité zásady pro kolejová řešení dopraven ve vazbě na ETCS, které vycházejí z Metodického pokynu (56) a jsou konkretizovány pro každou stavbu (57). Tento seznam je 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 (58). 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 a správná zastavovací politika může zvýšit atraktivitu celého systému (59).

4.2 Využití simulace

Jedním z prostředků, který se již etabloval při plánování rozvoje železničního subsystému, je simulace. Na modelu reálné infrastruktury si lze ověřit, jaké vlastnosti bude mít navržená infrastruktura při aplikaci očekávaného (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.

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. Srovnáním výpočtu následného mezidobí dle národních směrnic *SŽDC Sm 124 (46)* a *SŽDC Sm 104 (45)*, a SW OpenTrack se zabývala literatura (60). Zde bylo na základě srovnání analytických výpočtů a simulace prokázáno, že odchylka měření pomocí simulace (M^{OT}) je oproti oficiální směrnici provozovatele dráhy (M^{104}) méně než 2 %.

Při práci na simulačním modelu bylo zjištěno, že SW Opentrack není schopen respektovat (připočítat) k následnému mezidobí dohlednost návěstidel a výpravu druhého vlaku (45). Tato hodnota (d_{z1}) musí být připočítávána manuálně. Výsledkem pak je tabulka 6, ze které vyplývá, že maximální velikost odchylky byla cca 7 % (7 sekund).

Tabulka 5 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 %

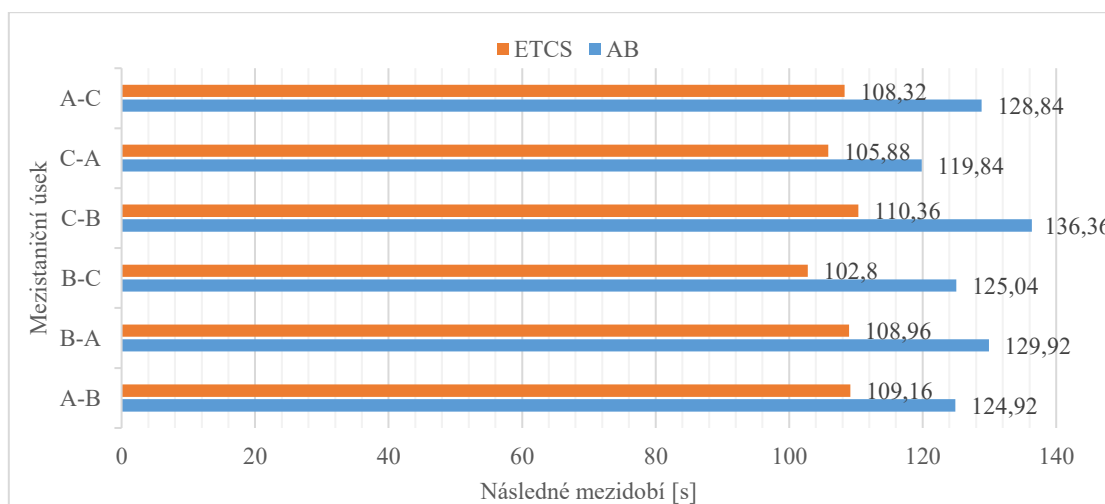
Zdroj: (60)

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 poježděné do odbočky,
- může dojít ke změně počtu a velikosti oddílů, tedy i ke zkrácení následného mezidobí,
- zavedením ETCS bude možné zvýšit maximální rychlost vlaku.

Autor společně s Ing. Tischerem zmapovali 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. Kompletní data jsou v habilitační práci a na obrázku 27 jsou uvedeny průměrné velikost následného mezidobí pro každý z mezistaničních úseků.



Obrázek 14 Porovnání následného mezidobí na autobloku a při optimalizované verzi ETCS L2

Zdroj: autor a Ing. Tischer

Zkušenosti se simulací má také Čína (61), (62). Jejich zkušenosti 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. Nemałym 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 (47).

Podobným způsobem jako na obrázku 27 provedl autor společně s Ing. Tischerem simulaci prezentovanou na konferenci IRICON 2022. Zde byly zkoumány efekty zavedení ETCS L3 pomocí simulace. V literatuře (63) 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 cca 5 %. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 6 Příklad z tabulky 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
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 (64), 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.

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**, *Narizení 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////////wEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIFgoW5TMUqktjy1BswzcJjctKZZaKsxxg37FiTd/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. **UITP**, *Statistics Brief: World report on metro automation*, UITP, 1. 11. 2016, <http://www.uitp.org/world-report-metro-automation>.

11. **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).
12. **Carvajal-Carreño, William, Cucala, Asunción a Fernández-Cardador, Antonio.** Engineering Applications of Artificial Intelligence. ScienceDirect. [Online] 08 2016. [Citace: 16. 02 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197616300690>. 0952-1976.
13. **UNIFE**, *ERTMS Statistics: The European Rail Traffic Management System*. UNIFE, 2020, [Citace: 01. 10. 2022], <https://www.ertms.net/facts-figures/deployment-statistics/>.
14. **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>.
15. **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.
16. **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>.
17. **UNIFE**, *European Rail Traffic Management System*, UNIFE, [Citace: 01. 03. 2019], <http://www.ertms.net>.
18. **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.
19. **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.
20. **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>.

21. **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>.
22. **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%BAprav+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>.
23. **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.
24. **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.
25. **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.
26. **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.
27. **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>.
28. **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>.
29. **Union Internationale des Chemins de fer**, *UIC Code – 544-1 – Brakes – Braking performance*, Brusel, UIC, 2014.
30. **Schrötter, J., Bouda, J.**, *Pozor, přijíždí vlak*, Praha: CPress, 2015, 978-80-264-0726-3.

31. **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.
32. **Hruban, I., Nachtigall, P., Štěpán, O.**, *Přínosy zavedení ETCS z pohledu brzdných křivek*, Vědeckotechnický sborník ČD, 2015, Svazek 40.
33. **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.
34. **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.
35. **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.
36. **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.
37. **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>.
38. **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.
39. **Gröpler, O.**, *Braking curves and models for ETCS*, Minden, 2010.
40. **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.
41. **Railvolution**, *Czech Raildays 2008*, 17. 06. 2008, [Citace: 01. 03. 2019], http://www.railvolution.net/czechraildays/2008/seminare/kv_09.pdf.
42. **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.

43. **Myslivec, I.**, *Malé zamyšlení nad brzdovými a zásahovými křivkami ETCS*, konference AŽD Praha, Velké Losiny, 2019.
44. **Gašparík, J., Kolář, J.**, *Železniční doprava*, Praha: Grada Publishing, 2017, 978-80-271-9855-9.
45. **Správa železnic, s.o.**, *Směrnice SŽDC 104 – Provozní intervaly a následná mezidobí*, Praha, 2013.
46. **Správa železnic, s.o.**, *Směrnice SŽDC Sm124 – Zjišťování kapacity dráhy*, Praha, 2018.
47. **Nachtigall, P., Tischler, E., Široký, J.**, *Assessing the efficiency of increasing the track speed in the line section Rokycany-Plzeň hl. n.*, Sustainability, 2020.
48. **Porwisz, V.**, *Technologicko-provozní aspekty křížení dráhy a pozemní komunikace*, diplomová práce, Univerzita Pardubice, 2020.
49. **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%BEEeelnice_Implementace_ETCS_MDCR0C30LVPA.pdf.
50. **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.
51. **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
52. **Marek, J.**, *Informace z UNISIG – aktuální stav specifikací a další rozvoj ETCS*, ACRI, 02. 06. 2015, [Citace: 04. 02 2016.], www.acri.cz.
53. **Marek, J.**, *Brzdový 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.
54. **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.
55. **Hrušovský, J.**, *Brzdy hnacích vozidel ČSD*, Nakladatelství dopravy a spojů, 1972. 31-065-72.
56. **Trögel, M.**, *Zásady pro projektování traťové části ERTMS pro tratě s výhradním provozem evropského vlakového zabezpečovače*, Správa železnic, s.o., Praha, 2022.

57. **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.
58. **Správa železnic, s.o.**, *Postup přípravy výstavby vysokorychlostních tratí*, Správa železnic, s.o. listopad 2019, [Citace: 10. 02. 2022], <https://www.spravazeleznic.cz/vrt/>.
59. **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>.
60. **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>.
61. **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>.
62. **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>.
63. **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>.
64. **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>.

VYBRANÉ VLASTNÍ ZDROJE K TÉMATU 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) NACHTIGALL, P., HRUBAN, I., ŠTĚPÁN, O. Přínosy zavedení ETCS z pohledu brzdných křivek. *Vědeckotechnický sborník ČD*, 2015, roč. 40, č. prosinec, s. 01-13.
- (5) HRUBAN, I., NACHTIGALL, P., ŠTĚPÁN, O. Technologická úskalí implementace ETCS. 2015.
- (6) NACHTIGALL, P., HRUBAN, I., ŠTĚPÁN, O. Přínosy zavedení ETCS z pohledu kapacity dráhy. *Vědeckotechnický sborník ČD*, 2016, roč. 41, č. duben, s. 1-11.
- (7) NACHTIGALL, P. VLIV NASTAVENÍ MOBILNÍ ČÁSTI ETCS NA BRZDNOU KŘIVKU. *Perner's Contacts*, 2016, roč. 11, č. 1, s. 131-137.
- (8) 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.
- (9) NACHTIGALL, P., TISCHER, E. Možnosti zavedení automatického provozu pražského metra B. *Vědeckotechnický sborník ČD*, 2017, roč. 44, č. prosinec, s. 1-16.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.

- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) 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.