

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Užití brzdného modelu vlakového zabezpečovače ETCS na dráze speciální

Bc. Ondřej Foldyna

Diplomová práce

2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Foldyna**
Osobní číslo: **D17418**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Název tématu: **Užití brzdného modelu vlakového zabezpečovače ETCS na dráze speciální**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Definice výchozích podmínek a předpokladů ovlivňující brzdné modely (technické a legislativní aspekty)
2. Specifikace vybraných brzdných modelů včetně jejich parametrů
3. Analýza a porovnání zvolených brzdných modelů
4. Návrh brzdného modelu pro dohled nad odrychlením vozidla na dráze speciální

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Interní dokumentace firmy AŽD Praha s.r.o.

Doc. Ing. Karel Hodík: Brzdy železničních kolejových vozidel; Praha 1980

Ing. Josef Baslar; Ing. Jan Mrkvička, CSc.: Trakční vozidla závislá I; Praha 1982

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Nachtigall, Ph.D.

Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání diplomové práce: **14. února 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.



Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. března 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 17. 5. 2019

Bc. Ondřej Foldyna

Touto cestou chci poděkovat Ing. Petru Nachtigalovi, Ph.D., za věcné a cenné připomínky k obsahu a úpravě práce.

Rád bych touto cestou poděkoval i společnosti AŽD Praha s.r.o., za umožnění psaní této práce a cenné připomínky z jejich strany.

Dále chci poděkovat všem, kteří mi poskytli rady a připomínky při psaní této práce a byli mi oporou, především mojí rodině a přátelům.

ANOTACE

Práce je zaměřena na užití brzdného modelu vlakového zabezpečovače ETCS na dráze speciální a porovnání tohoto modelu s brzdným modelem IEEE. Práce se zabývá popisem brzdových systémů, popisem dráhy speciální a rozbořem a užitím brzdných modelů. Popisovány a porovnávány jsou zde dva brzdné modely, a to model ERA a model IEEE. Na základě tohoto porovnání je v závěru práce navržen ideální brzdný model.

KLÍČOVÁ SLOVA

Brzdy, ETCS, CBTC, brzdné křivky, metro

TITLE

Use of the ETCS train braking model on special railway

ANNOTATION

My thesis is focused on the use of the ETCS train protection braking model on a special railway and comparing this model with the IEEE braking model. The thesis deals with the description of braking systems, the description of the special railway and the analysis and use of these braking models. Two braking models are described and compared, namely the ERA model and the IEEE model. Based on this comparison, the optimal braking model is proposed at the end of the thesis.

KEYWORDS

Brakes, ETCS, CBTC, brake curves, metro

Obsah

ÚVOD	9
1. VÝZNAM DOPRAVY A POHYB KOLEJOVÉHO VOZIDLA.....	11
1.1 Uvedení vozidla do pohybu	11
1.2 Fyzikální aspekty brzdění	12
2. POPIS TYPŮ BRZDOVÝCH SYSTÉMŮ	15
2.1 Pneumatické (tlakové) brzdy.....	16
2.1.1 Hlavní zařízení pneumatických brzd	18
2.1.2 Přímochinná brzda	22
2.1.3 Samočinná brzda (nepřímochinná)	23
2.1.4 Elektropneumatická brzda (EP brzda)	25
2.2 Sací brzda	26
2.3 Mechanické ruční brzdy	27
2.4 Elektrodynamické brzdy	27
2.5 Střadačová brzda	28
3. POPIS DRÁHY SPECIÁLNÍ A ZABEZPEČOVACÍCH SYSTÉMŮ.....	29
3.1 Dráha speciální.....	29
3.1.1 Členění metra.....	30
3.1.2 Požadavky na brzdění vozidel dráhy speciální	31
3.2 Popis zabezpečovacího systému ETCS.....	36
3.2.1 Fyzické rozdělení systému ERTMS/ETCS.....	37
3.2.1 Aplikační úrovně systému ERTMS/ETCS	39
3.3 Popis zabezpečovací části systému CBTC.....	43
3.4 Projekt NGTC	48
4. BRZDNÉ MODEL Y IEEE A ERA	49
4.1 Rychlostní profily.....	50
4.1.1 Statické rychlostní omezení	50
4.1.2 Dynamický rychlostní profil (DSP).....	53
4.2 Brzdny model IEEE	55
4.2.1 Vstupní parametry.....	55
4.2.2 Křivka ATP (Dynamický rychlostní profil ATP).....	56
4.2.3 Detekční křivka překročení rychlosti ATP	57
4.2.4 Křivka nouzového brzdění (křivka EB).....	57

4.2.5	Neurčitost polohy.....	58
4.3	Brzdňý model ERA.....	59
4.3.1	Vstupní parametry.....	59
4.3.2	Křivka nouzového brzdění (EBD).....	62
4.3.3	Křivka provozního brzdění (SBD).....	62
4.3.4	Naváděcí křivka (GUI).....	62
4.3.5	Dohledové křivky.....	62
5.	SIMULACE BRZDNÝCH KŘIVEK.....	64
5.1	Nastavení brzdňých modelů.....	65
5.1.1	Nastavení brzdňého modelu ERA.....	65
5.1.2	Nastavení brzdňého modelu IEEE.....	68
5.2	Porovnání brzdňých modelů.....	70
5.2.1	Jízda po rovině.....	71
5.2.2	Jízda po spádu 20‰.....	74
5.2.3	Jízda po spádu 40‰.....	76
5.2.4	Jízda do stoupání 20‰.....	79
5.2.5	Jízda do stoupání 40‰.....	81
5.3	Návrh brzdňého modelu.....	83
6.	ZÁVĚR.....	85
	POUŽITÁ LITERATURA.....	87
	SEZNAM TABULEK.....	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	91
	SEZNAM SCHÉMAT.....	92
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	93
	SEZNAM PŘÍLOH.....	95

ÚVOD

V současné době jsou s rozvojem velkých měst a aglomerací kladeny čím dál větší nároky na městskou hromadnou dopravu a stejně tak i na příměstskou železniční dopravu. Velké množství lidí směřujících každý den do center těchto měst a aglomerací za prací či studiem využívá právě tyto zmíněné dopravní prostředky. Z toho plyne zvyšování počtu spojů v tzv. špičkách, neboli v době největšího přesunu lidí a to ráno a odpoledne. Nejefektivnějším dopravním prostředkem, který je schopný zajistit přesun velkého množství lidí v rámci města je dráha speciální neboli metro. Kapacitní soupravy jezdící v krátkém časovém intervalu jsou mnohdy nedostatečné a z toho vyvstává potřeba přidání dalších posilových souprav s cílem zkrátit interval mezi jednotlivými spoji. Ovšem zde klasické metro řízené strojvedoucím naráží na své limity a tím je jízda v pevných oddílech, kdy každý vlak může obsadit pouze jeden délkově vyčleněný úsek. Z toho důvodu není možné přidání dalších souprav s cílem zkrácení intervalu. Proto se v posledních letech přechází na automatizované provozy, kde není potřeba přítomnosti strojvedoucího, soupravy jsou řízeny automaticky a jízda se již provádí v pohyblivých oddílech. Soupravy spolu neustále komunikují a udržují si mezi sebou bezpečnou vzdálenost. Tuto vzdálenost jsou schopny dodržovat na základě stanovení brzdných křivek, které jsou stanovovány pomocí palubního počítače. Správný výpočet brzdných křivek podle vhodného brzdného modelu umožní zkrácení intervalu mezi jednotlivými vlaky.

Diplomová práce byla zadána ve spolupráci s firmou AŽD Praha s.r.o., která chtěla vytvořit vzájemné porovnání dvou brzdných modelů, jako podklad pro další práci s brzdnými modely.

V současné době je dostupný jeden brzdný model pro výpočet brzdných křivek na dráze speciální, a to brzdý model IEEE. Dále existuje brzdý model ERA pro klasickou železnici a jeho použití na dráze speciální prozatím nebylo v praxi aplikováno.

Práce si klade za cíl vytvoření modelových situací, jež mohou nastat v provozu dráhy speciální. Na tyto modelové situace dále použít vstupní parametry zvolené soupravy metra a pomocí obou výše zmíněných brzdných modelů simulovat brzdné křivky. Tyto brzdné křivky následně porovnat a pokusit se navrhnout ideální brzdý model, který by byl nejvhodnější pro použití na dráze speciální a ověřit zda je vůbec možné použít brzdý model ERA v prostředí dráhy speciální.

Mojí osobní motivací pro řešení této práce bylo vzájemné porovnání brzdných modelů, což prozatím nebylo v žádné práci řešeno, jelikož většina prací je zaměřena pouze na jeden konkrétní model, ale jejich vzájemné srovnání chybí.

1. VÝZNAM DOPRAVY A POHYB KOLEJOVÉHO VOZIDLA

Pod pojmem doprava se rozumí přemísťování osob i věcí z výchozího místa do cílového místa. Doprava je tedy cílený pohyb hmot, neboť pohyb je vázán na hmotu. Doprava je jedním z průvodních jevů lidské činnosti a existence a postupně se vyvíjela s rozvojem lidské kultury a civilizace od nejjednodušších začátků (vynález kola), až po nové moderní formy dané vědeckým a technickým pokrokem (např. koncept hyperloopu). Existenci a rozvoj lidské společnosti si nelze představit bez spolehlivé a efektivní dopravy.

Mezi novější formy dopravy patří železniční doprava, která pracuje na principu pohybu kolejového vozidla po koleji, tedy odvalování ocelového kola po ocelovém pásu – kolejnici. Samotný pohyb vozidla se řídí fyzikálními zákony mechaniky a dynamiky. Při pohybu se v železniční dopravě překonává několik jízdních odporů, a to odpor trati a odpor vozidla.

1.1 Uvedení vozidla do pohybu

Má-li se vozidlo uvést do pohybu v určitém směru, musí na něj v tomto směru působit zrychlující síly (způsobující zrychlení, tj. akceleraci vozidla), jejichž velikost musí být větší než součet sil všech jízdních odporů působících na vozidlo. Působením těchto zrychlujících sil pohybujících vozidlem po určité dráze, je konána práce, kterou si vozidlo zachová ve formě kinetické neboli pohybové energie. Uvedení vozidla do pohybu zajišťuje tažná síla. Tažná síla se projevuje silovým působením mezi kolem a kolejnici a je způsobena prací hnacího soustrojí hnacího vozidla.

Kinetická (pohybová) energie

Je to energie, která vznikne působením síly po určité dráze. Kinetická energie E_k má schopnost konat práci a je teda ekvivalentní práci.

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} [J] \quad (1)$$

Kde: m – hmotnost vozidla [kg]

v – rychlost vozidla [$m \cdot s^{-1}$]

Do výpočtů kinetické energie se připočítávají pohyby rotujících hmot, např. kol, náprav, rotorů trakčních motorů atd. Tyto rotující hmoty mají při rotaci taktéž setrvačnost, která se ve výpočtech bere v úvahu zavedením koeficientu k .

$$E_{kc} = E_k * k [J] \quad (2)$$

Obsahem této práce ovšem není podrobnější rozbor uvádění vozidla do pohybu.

1.2 Fyzikální aspekty brzdění

Pokud má jedoucí vozidlo zastavit, nebo zmenšit svoji rychlost, musí se jeho pohybová energie zmařit, to je přeměnit v energii jiného druhu, nejčastěji v energii tepelnou. Aby se toho dosáhlo, musí na vozidlo působit zpomalující síly proti směru jeho pohybu (způsobující zpomalení, tj. deceleraci vozidla). Přírozenou zpomalující silou mohou být jízdni odpory. Síla z odporů však zpravidla není dostatečná k zastavení vozidla na adekvátně dlouhé vzdálenosti, a proto je třeba zavést umělou brzdící sílu způsobující záměrné brzdění vozidla. Brzdění je tedy umělé zvýšení vozidlového odporu za účelem snížení rychlosti vlaku až do případného zastavení, udržení rovnoměrné rychlosti na sklonu, nebo zajištění stojícího vlaku proti rozjetí. V průběhu brzdění je souhrn všech odporových sil včetně síly brzdící větší než souhrn sil urychlujících (tažná síla a síla ze spádu trati). Brzdění je nejdůležitější fází pohybu vozidla. Brzdění ovlivňují zejména následující faktory:

- adheze,
- odporové síly,
- brzdící síla,
- součinitel smykového tření.

Adheze

Základní podmínkou pohybu vlaku po kolejnicích je tření mezi kolem a kolejnicí neboli adheze. Adheze je schopnost přenosu tečných sil ve styku dvou povrchů bez zřetelného pohybu. Tření mezi kolem a kolejnicí umožňuje valení kola. Jestliže tažná síla na obvodu kola překročí mez adheze, začne kolo prokluzovat. Totéž platí i při brzdění, kdy se taktéž nesmí překročit mez adheze, aby nedošlo ke skluzu. Maximální hodnota adhezní síly je dána vztahem:

$$F_{Amax} = \mu * G [kN] \quad (3)$$

Kde: μ - součinitel adheze

G – tíha vozidla, dána vztahem $G = m * g$ [kN]

Odporové síly (jízdni odpory)

Jsou souhrnné označení pro síly, které působí proti pohybu vlaku. Jelikož působí pouze při jízdě vlaku, nazývají se někdy jako jízdni odporové síly, nebo jízdni odpory. Do těchto sil se nezahrnují brzdící síly. Jízdni odpory se dělí na dvě hlavní skupiny, a to na odpory vozidlové a odpory traťové.

Odpory vozidlové:

- odpor valivého tření – vzniká mezi vozidlem a kolejnicí,
- odpor čepového tření – vzniká v nápravových ložiskách,
- odpor vzduchu – vzniká mezi vozidlem a vzduchem.

Odpory traťové:

- odpor ze stoupání trati – při jízdě do stoupání působí jako odpor, v opačném případě jako urychlující síla. Sklon trati se uvádí v promilích [‰],
- odpor z oblouku trati – vzniká při jízdě vlaku obloukem,
- odpor tunelu – vzniká při jízdě vlaku tunelem, zejména se projevuje u jednokolejných tunelů.

Brzdící síla

Při brzdění vozidla až do jeho zastavení měříme jeho kinetickou energii práci vykonanou brzdící silou působící na toto vozidlo na odpovídající zábrzdné dráze. Brzdící síla je dána podílem zmařené pohybové energie vozidla E_k a zábrzdné dráhy L_z . U brzdné síly se uvádí pojem průměrná brzdná síla, je to z toho důvodu, neboť brzdná síla není po dobu brzdění konstantní. Výpočet potřebné průměrné brzdné síly pro zastavení na určité dráze je tedy dán vztahem:

$$F_b = \frac{E_k}{L_z} [N] \quad (4)$$

Skutečná potřebná průměrná brzdná síla (uměle vyvinutá brzdovým systémem) je ve výsledku o něco menší, neboť proti jízdě vozidla působí odpory vozidlové a odpory traťové.

Je zřejmé, že průměrná brzdná síla F_b musí být menší nebo rovna maximální hodnotě adhezní síly F_{Amax} , jinak by došlo k zablokování dvojkolí a k prodloužení zábrzdné dráhy, čímž by mohlo dojít ke smýkání a vážnému mechanickému poškození dvojkolí.

Součinitel smykového tření

Při tření mezi předmětem (kolem) a plochou (kolejnicí), po které se předmět smýká, se projevuje součinitel smykového tření. Je to tedy součinitel tření za pohybu. Tento součinitel je závislý na mnoha faktorech: na velikosti styčné plochy a její drsnosti, na tlaku na kolo, na konstrukci, na rychlosti, na prašnosti, vlhkosti atd. Nejvíce je však závislý na materiálu třecích ploch.

Součinitel smykového tření je bezrozměrná veličina. Jeho hodnota je empiricky stanovena provedením množstvím zkoušek a měření, kdy z výsledků jsou sestaveny tabulky a grafy, z nichž se v dnešní době vychází. Součinitel smykového tření mezi litinovým špalíkem a kolem se pohybuje ve většině případů v mezích od 0,08 do 0,35.

U špalíků je součinitel závislý na:

- rychlosti vozidla – s rostoucí rychlostí koeficient klesá,
- měrné síle (přítlačná síla zdrže ke kolu) – s rostoucí silou koeficient stoupá,
- materiál špalíku kola (např. litina),
- teplotě zdrže – s rostoucí teplotou koeficient klesá,
- hrubosti povrchu třecích ploch – s větší hrubostí koeficient stoupá.

Pro kotoučové brzdy se používají keramické nebo osinkové materiály, které mají vyšší součinitel tření než litina. U těchto materiálů je součinitel tření méně závislý na rychlosti a teplotě, což je jejich hlavní předností. Tyto třecí materiály se původně používaly na brzdách vozidel pro vyšší rychlosti, u nichž lze konstantní přítlačnou silou dosáhnout téměř konstantní brzdící síly, málo závislé na rychlosti vozidla. V dnešní době jsou již používány i u pomalejších vozidel.

2. POPIS TYPŮ BRZDOVÝCH SYSTÉMŮ

V této kapitole jsou popsány jednotlivé typy brzdových systémů a jejich dělení. Brzdný účinek je obvykle způsoben třením mezi třecí plochou příslušné části brzdy a příslušné části kola. V případě brzd špalíkových jde o tření mezi brzdovými špalíky a obručemi náprav, v případě brzd kotoučových jde o tření mezi brzdovými kotouči a styčnými plochami kol, a v případě brzd kolejnicových jde o tření mezi brzdovým trámem a temenem kolejnice. U hnacích vozidel existují ještě i další možnosti, jak lze vyvodit brzdící sílu např. elektrodynamicky, motoricky nebo elektromagneticky.

Brzdy se tedy dělí podle různých hledisek, např. podle působení brzd, podle jejich ovládání, konstrukce atd.

Podle způsobu přenosu brzdící síly mezi vozidlem a kolejnicí rozdělujeme brzdy na:

- Adhezní brzdy – brzdící síla je závislá na hmotnosti vozidla a na styku kola s kolejnicí (na adhezi), samotné brzdění probíhá mezi brzdící částí vlaku a kolem (tření), tyto brzdy se dále dělí dle konstrukce mechanické brzdící části:
 - kotoučové,
 - špalíkové (zdržové),
 - bubnové (čelist'ové).
- Neadhezní brzdy - brzdící síla není závislá na hmotnosti vozidla a na styku kola s kolejnicí, samotné brzdění probíhá mezi brzdící částí vlaku a kolejnicí, tyto brzdy se dále dělí dle konstrukce brzdící části:
 - elektromagnetické kolejnicové,
 - vířivé brzdy.

Podle způsobu vytvoření brzdící síly v brzdovém systému se brzdy dělí na:

- mechanické – soustava pákovic,
- hydraulické – retardéry, lopatky na kole ženu kapalinu regulovatelným škrtícím otvorem,
- hydrodynamické,
- aerodynamické – působení tlaku vzduchu, protipáry, brzdění motorem atd.,
- pneumatické (vzduchové),
- elektropneumatické,
- elektrodynamické – trakční motory působí jako generátory.

Podle způsobu ovládaní se brzdové systémy dělí na:

- člověkem ovládané (ručně nebo nožně prostřednictvím brzdíče, brzdové páky, brzdového pedálu, tlačítka apod., povel „brzdit“ iniciuje člověk),
- automaticky ovládané (povel „brzdit“ iniciuje systém, zpravidla zabezpečovací nebo řídicí zařízení).

2.1 Pneumatické (tlakové) brzdy

V železničním provozu, a i na dráze speciální (metro) se nejlépe uplatnily pneumatické brzdy. Jedná se o nejčastěji používanou brzdu. Použití stlačeného vzduchu jako přenosného prostředku je vhodné, neboť potřebný tlak vzduchu je možné snadno získat pomocí kompresoru, ve vzduchojemu ho shromažďovat, snadno se rozděluje a vhodným zařízením se dobře reguluje. Vzduch, který probíhá v průběžném potrubí pod vozy vzájemně spojenými hadicemi, slouží k ovládní brzd jednotlivých vozidel ze stanoviště strojvedoucího (brzdíč je ovládán strojvedoucím), nebo ze strojovny (brzdíč ovládaný elektronicky). Na hnacím vozidle se pneumatická brzda skládá z kompresoru, hlavního vzduchojemu, rozvaděče, brzdíče přímočinné a nepřímochinné brzdy, dvojité zpětná záklopka, brzdový válec a spojovací potrubí.

Pneumatické brzdy v základu dělíme na:

- přímočinné,
- samočinné (nepřímochinné).

Samočinné brzdy se dále dělí na:

- vyčerpateľné,
- nevyčerpateľné.

O vyčerpateľné a nevyčerpateľné brzdě více pojednává kapitola o rozvaděčích.

Důležitým parametrem pneumatických samočinných brzd je průrazná rychlost pneumatické brzdy. Průrazná rychlost je udávána v [m/s] a počítá se jako poměrná délka hlavního potrubí od brzdíče po koncový spojkový kohout posledního vozidla zapojeného do brzdy, což jsou metry a čas za který se začne plnit brzdový válec posledního vozidla. Průrazná rychlost musí být podle normy UIC větší než 250 m/s, brzdy od firmy DAKO dosahují rychlosti 280 m/s. Rychlost je tedy nižší než rychlost zvuku. Z hodnoty průrazné rychlosti lze vypočítat, za jak dlouho začne brzdit konkrétní vozidlo v soupravě, což se určí z délky soupravy. Je tedy zřejmé, že u delších souprav začne brzdit začátek soupravy dříve než konec soupravy. To může při výrazných rázech v soupravě vést i k přetržení vlaku.

Tabulka 1: Doba přenosu povelu k brzdění od začátku na konec soupravy

Délka soupravy [m]	Doba potřebná pro přenos povelu k brzdění od začátku na konec soupravy [s]
50 – 200 m	Přibližně 0,5 s
200 – 500 m	Přibližně 1,5 s
500 – 700 m	Přibližně 2,5 s

Zdroj: autor

Dalším důležitým parametrem u pneumatických samočinných brzd jsou plnicí vyprazdňovací časy brzdových válců. Doba plnění brzdového válce udává čas, za který se brzdový válec naplní na 95 % od začátku plnění. Vyprazdňovací čas je naopak doba, za jakou se vyprázdní brzdový válec. Tyto doby jsou závislé na režimu brzdění, na který je nastavena brzda na vozidle. Režimy brzdění jsou používány tři základní, a to režim nákladní – G, režim osobní – P a režim rychlík – R. Režimy se od sebe liší v rychlosti plnění a vyprazdňování brzdových válců, což zajišťuje rozvaděč na vozidle.

Tabulka 2: Režimy brzdění a jejich plnicí a vyprazdňovací časy

Režim brzdění	Plnicí čas [s]	Vyprazdňovací čas [s]
Nákladní - G	22 – 26	45 - 52
Osobní - P	3 – 5	15 - 18
Rychlík - R	2,5 – 4	14 - 17

Zdroj: autor na základě Pohl: *Brzdění nákladních vlaků samočinnou pneumatickou brzdou*

U přímočinné brzdy se stejně jako u průrazné rychlosti tyto hodnoty nezohledňují, neboť se brzdí přímo pouze hnací vozidlo a časy jsou tím pádem velmi krátké.

Při popisu brzd železničních vozidel se používá jako jednotka stlačeného vzduchu bar. Jedná se o vedlejší jednotku tlaku a využívá se pro svou názornost. Odpovídá starší jednotce tlaku jedné atmosféry, která odpovídá přibližně atmosférickému tlaku na hladině moře. Na železničních vozech je mnohdy u manometrů využívána jednotka megapascal (MPa). Obecně platí, že 1 bar = 0,1 MPa.

2.1.1 Hlavní zařízení pneumatických brzd

Je zřejmé, že pro správnou funkčnost brzd je potřeba celá řada zařízení. Mezi ně patří kompresory, brzdiče, rozvaděče, vzduchojemy, brzdové potrubí a řada dalších zařízení. Popis těchto zařízení není podstatný pro další obsah této práce, ale pro úplnost je zde stručně popsána jejich funkce.

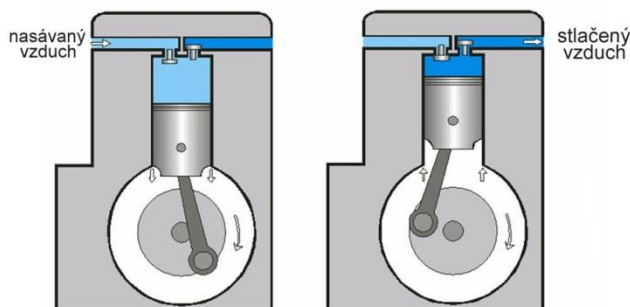
Kompresory

Zásobovací zařízení stlačeného vzduchu (kompresor) je nezbytným zařízením tlakových brzd a nejen jich. Stlačený vzduch se využívá nejen k brzdění, ale i k ovládní sběračů (na elektrických lokomotivách), pískování, zavírání dveří, ovládní houkačky, ovládní vakuového WC a dalších věcí na lokomotivě, potažmo soupravě.

Pro správnou funkci vzduchových zařízení je třeba, aby doplňování vzduchu bylo automatické. Z toho důvodu je ovládní kompresoru automatické, neboť se zapíná a vypíná samočinně podle kolísání tlaku vzduchu v hlavním vzduchojemu.

Na hnacích vozidlech bývá zpravidla hlavní a pomocný kompresor (nutný u vozidel elektrické trakce). Pomocný kompresor bývá poháněn z lokomotivní baterie a slouží k výrobě stlačeného vzduchu pro zvednutí sběračů. Po zvednutí sběračů se již funkce ujímá hlavní kompresor.

Nejčastěji používaným typem kompresoru v drážním provozu je pístový kompresor. Jeho funkce je založena na pravidelném zmenšování pracovního objemu válce, ve kterém se pohybuje píst.

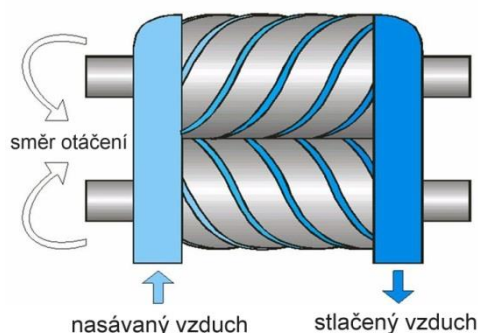


Obrázek 1: Jednostupňový pístový kompresor

Zdroj: <https://slideplayer.cz/slide/2744500/>

Dalším typem kompresoru je šroubový kompresor. Pracuje na principu dvou šroubovic, kdy se díky geometrickému tvaru šroubovic při rotaci zmenšují meziprostory, tím dochází k přesouvání vzduchu a na konci výstupu dochází k finálnímu stlačení vzduchu.

Šroubové kompresory se v současné době používají u moderních vozidel, neboť dosahují menších rozměrů než šroubové a mají taktěž tišší chod.



Obrázek 2: Princip funkce šroubového kompresoru

Zdroj: <https://slideplayer.cz/slide/2744500/>

U trakčních vozidel se z důvodu potřeby většího množství stlačeného vzduchu používají kompresory vyšších výkonů. Často jsou na hnacím vozidle i dva hlavní kompresory. Některé kompresory pracují s dvoustupňovou kompresí, kdy stlačený vzduch z jednoho válce jde do dalšího válce (v případě vícepístových kompresorů). Zároveň se používá mezichladič stlačeného vzduchu, neboť při stlačování dochází k zahřívání vzduchu.

Pohony kompresorů jsou zpravidla na hnacích vozidlech řešeny elektricky, kdy každý kompresor má svůj elektromotor, který zajišťuje chod kompresoru v případě potřeby. Na vozidlech motorové trakce byly mnohdy kompresory přes odpínatelnou spojku připojovány na výstupní hřídel ze spalovacího motoru.

Ke správnému chodu kompresoru dále slouží množství tlakových spínačů, které zajišťují zapínání a vypínání kompresoru v závislosti na tlaku vzduchu v hlavním vzduchojemu. Taktěž se u kompresoru nachází vysoušeče vzduchu a filtry, které zajišťují to, aby se ve stlačeném vzduchu nenacházela vlhkost a nečistoty, což by vedlo k zanášení hlavního vzduchojemu.

Brzdiče

Důležitým prvkem celé brzdné soustavy je brzdič. Slouží strojvedoucímu případně obsluze drážního vozidla k regulaci brzdící síly a tím i k regulaci rychlosti. Pro popis principu fungování brzdiče byly vybrány brzdiče od tuzemské firmy DAKO (typ BS2 a typ BSE), které se v současné době používají nejčastěji. Brzdiče se od sebe liší v ovládání, umístění a samozřejmě v samotné konstrukci.

Brzdič DAKO BS2 je staršího provedení a samotný brzdič je umístěn na každém stanovišti strojvedoucího, odkud strojvedoucí přestavováním rukojeti řídí přímo tlak vzduchu

v průběžném potrubí a tím i výslednou sílu brzdění. Ovládací rukojeť je tedy součástí brzdiče. Tento brzdič najdeme na starších vozidlech, neboť s postupnou automatizací drážního provozu přestal vyhovovat modernějším požadavkům na řízení procesu brzdění.



Obrázek 3: Brzdič DAKO-BS2

Zdroj: http://kpzs.logout.cz/t334/popis/popis334_soubory/bs.html

Novějším typem a dodnes ve velké míře používaným brzdičem je DAKO-BSE. Jedná se o elektricky řízený brzdič samočinné pneumatické brzdy. Vlastní brzdič je ve strojovně lokomotivy a jeho ovládání je zajištěno brzdovými kontroléry (ovladači), které jsou umístěny na každém stanovišti strojvedoucího. Ovladač má několik poloh, mezi kterými strojvedoucí přestavuje rukojeť. V současné době je brzdový kontrolér často implementován do sdružené jízdni páky (hlavní jízdni páka). Nespornou výhodou tohoto typu brzdiče je jeho možné řízení řídicí jednotkou vozidla. Díky tomu je možné vozidlo provozovat v režimu automatické regulaci rychlosti (ARR) a automatického vedení vlaku (AVV).



Obrázek 4: Ovladač OBE1 brzdiče DAKO-BSE

Foto: Daniel Forejtar



Obrázek 5: Sdružená jízdní páka
Foto: Daniel Forejtar

Rozvaděče

Základním členem samočinné brzdy je rozvaděč. Bývá zpravidla jeden na vozidle. Řídí v závislosti na změnách tlaku v hlavním potrubí plnění a odvětrávání brzdového válce, stejně tak i plnění pomocného a rozvodného vzduchojemu.

Podle způsobu odbrzdění se rozvaděče a pneumatické samočinné brzdy dělí na:

- Stupňovitě neodbrzdovatelné (jednorázově odbrzdující) brzdy
 - při malém zvýšení tlaku v hlavním potrubí dojde k úplnému odbrzdění brzd, proces odbrzdování lze přerušit jen novým zabrzděním. Při odbrzdění se vypustí veškerý vzduch z brzdových válců do ovzduší, z toho důvodu se jedná o vyčerpateľnou brzdou (veškerý stlačený vzduch se při dalším zabrzdění vyčerpá).
- Stupňovitě odbrzdovatelné brzdy
 - tlak v brzdovém válci je snižován úměrně ke zvýšení tlaku v hlavním potrubí, umožňují tedy snižovat účinek brzdění, aniž by nastalo jednorázové odbrzdění. Rozvaděč zajišťuje doplňování pomocného vzduchojemu vzduchem, a proto se jedná o tzv. nevyčerpateľnou brzdou (stlačený vzduch se nikdy nevyčerpá).

V současné době se vyrábí již jen stupňovitě odbrzdovatelné brzdy, a to z důvodu lepší regulovatelnosti brzdícího účinku a bezpečnosti proti vyčerpání brzdou při opakovaném zabrzdění a odbrzdění. Stupňovitě neodbrzdovatelné brzdy se dnes vyskytují již jen na historických vozidlech.

Hlavní a napájecí potrubí

Důležitou částí brzdové soustavy je hlavní a napájecí potrubí.

Hlavní potrubí umožňuje činnost samočinných tlakových brzd jednotlivých vozidel a zapojení jednotlivých vozidel do průběžné brzdy vlaku. Potrubí je nataženo od hnacího

vozidla přes celou soupravu. Mezi jednotlivými vozy je potrubí spojeno pomocí brzdových spojek.

Napájecí potrubí zajišťuje zásobování vozů stlačeným vzduchem přímo z hlavního vzduchojemu hnacího vozidla nezávisle na tlakové brzdě. Potrubí je taktéž mezi jednotlivými vozy spojeno pomocí brzdových spojek.

2.1.2 Přímočinná brzda

Touto brzdou jsou vybavena pouze hnací vozidla, kdy je pomocí této brzdy možné brzdit jen jedno vozidlo, a to na kterém se tato brzda nachází. Přímočinná brzda se mnohdy označuje jako lokomotivní brzda. Přímočinná brzda slouží zejména k brzdění samostatně jedoucího hnacího vozidla, k odbrzdění a zajištění proti pohybu. Jedná se o nejstarší typ pneumatického brzdění, to díky své jednoduchosti. Má krátké plnicí a vyprazdňovací časy brzdových válců a tím i rychlý účinek. Strojvedoucí pomocí brzdiče přímočinné brzdy ovládá (snižuje/zvyšuje) přes dvojitou zpětnou záklopku přímo tlak v brzdovém válci lokomotivy/hnacího vozu. Nejvyšší tlak v brzdových válcích, který tato brzda vyvine, je obvykle 5 barů. Na každém stanovišti se obvykle nachází jeden brzdič přímočinné brzdy. U modernějších vozidel je tato brzda ovládána elektricky, tedy na vozidle je umístěn pouze jeden brzdič, který je z každého stanoviště ovládán elektrickým ovladačem. Tato brzda se nepoužívá k průběžnému brzdění, neboť při spojení více vozidel by hrozilo nebezpečí rozpojení napájecího potrubí za brzdičem. Tím by přestala brzdit celá připojená souprava.

Brzda se skládá ze vzduchojemů, brzdiče, dvojitě zpětné záklopký a brzdových válců. Princip přímočinné brzdy je znázorněn na schématu 1.

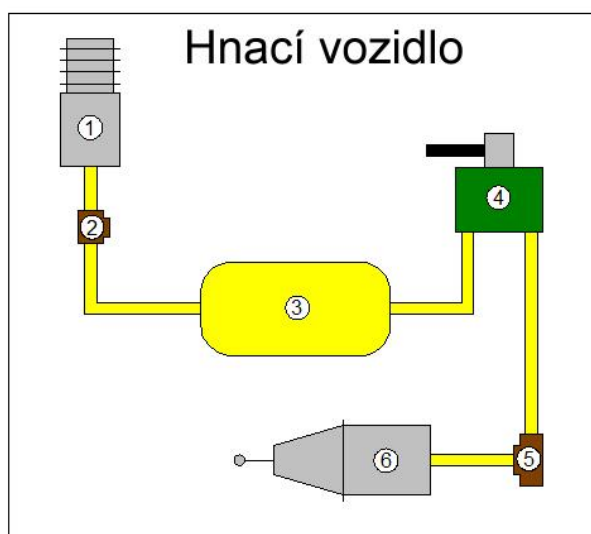


Schéma 1: Princip funkce přímočinné brzdy
Zdroj: autor

1 - kompresor, 2 - zpětný ventil, 3 - hlavní vzduchojem, 4 - brzdíč přímočinné brzdy, 5 - dvojitá zpětná záklopka, 6 - brzdový válec

Funkce přímočinné brzdy je následující. Kompresor (1) vyrobí stlačený vzduch, který se přes zpětný ventil (2) natlačí do hlavního vzduchojemu (3). Tlak vzduchu v hlavním vzduchojemu dosahuje hodnoty až 11 barů a následně je přes upravovač tlaku snížen na 5 barů. Přestavením brzdíče přímočinné brzdy (4) do jiné polohy, dojde k přepuštění vzduchu přes dvojitou zpětnou záklopku (5) do brzdového válce (6).

2.1.3 Samočinná brzda (nepřímá)

Nejdůležitějším typem pneumatické brzdy je samočinná brzda. Též bývá nazývána jako vlaková či průběžná brzda. Každé hnací vozidlo musí být vybaveno touto brzdou, neboť tato brzda splňuje požadavek na průběžnost a samočinnost. Tato brzda je určena k brzdění celého vlaku včetně lokomotivy a svojí funkcí odstraňuje riziko spojené s nefunkčností brzd při přerušení soupravy (viz přímočinná brzda). Samočinná brzda splňuje průběžnost tím, že umožňuje ovládat brzdy celého vlaku z jednoho místa, a to buď ze stanoviště strojvedoucího, nebo zatažením záchranné brzdy ve voze a samočinnost splňuje samočinným uvedením brzdy v činnost, při přerušení brzdového potrubí soupravy. Při přetržení vlaku, nebo netěsnosti průběžného potrubí poklesne tlak v průběžném potrubí a vlak zabrzdí bez zásahu strojvedoucího (řídícího systému) – odtud název samočinná brzda.

Brzda se skládá ze vzduchojemů, průběžného potrubí (hlavní), brzdíče, rozvaděčů, pomocných vzduchojemů, dvojitě zpětné záklopky a brzdových válců. Oproti přímočinné brzdě, je samočinná brzda vybavena pomocným vzduchojemem, rozvaděčem a průběžným potrubím.

Samočinná brzda je nepřímo účinkující brzda, u níž se pro zabrzdění využívá stlačeného vzduchu ze vzduchojemů umístěných na každém vozidle vybaveném brzdou. Rozvod stlačeného vzduchu je na vozidle ovládán rozvaděčem, který reaguje na změny tlaku v průběžném potrubí (hlavní). Snižováním tlaku v hlavním potrubí se brzda uvádí do činnosti a brzdí, naopak zvyšováním tlaku v hlavním potrubí se odbrzdí. Základní tlak v průběžném potrubí pro polohu odbrzděno je 5 barů. Tlak v průběžném potrubí se pohybuje při provozním brzdění v rozmezí 3,5 – 5 barů. Snížením tlaku v průběžném potrubí na 3,5 barů dojde k úplnému provoznímu zabrzdění, maximální tlak v brzdovém válci může být 3,7 až 3,9 barů. Pokud by se dále snižoval tlak v průběžném potrubí pod hodnotu 3,5 barů, tak to již nemá vliv na zvyšování brzdícího účinku, pouze při rychlém snížení tlaku v průběžném potrubí dojde i k rychlejší reakci brzdy – rychločinné brzdění. Důležitým prvkem v brzdovém systému

hnacích vozidel je dvojitá zpětná záklopka, která umožňuje brzdění přímočinnou brzdou bez použití samočinné brzdy a opačně. Odděluje tedy systém samočinné a přímočinné brzdy.

Princip samočinné brzdy je znázorněn na schématu:

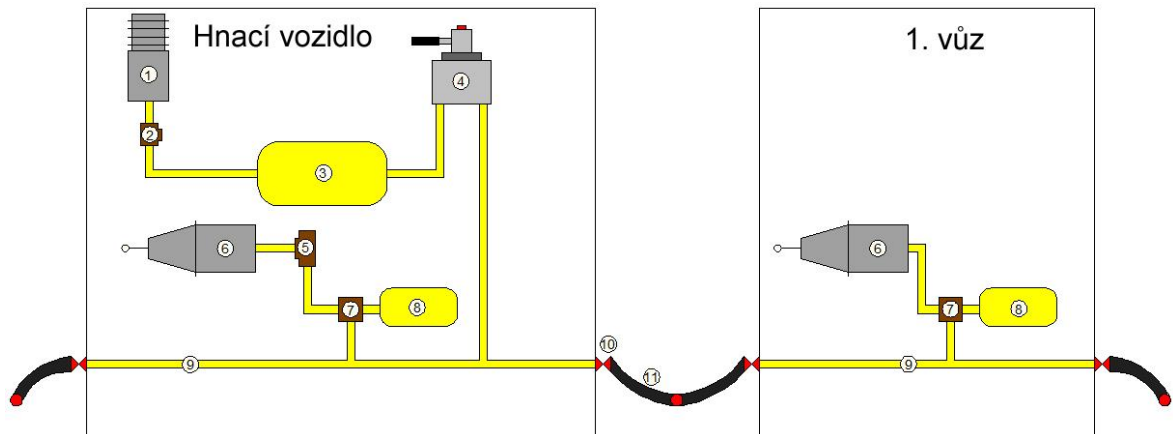


Schéma 2: Princip funkce samočinné brzdy

Zdroj: autor

1 - kompresor, 2 - zpětný ventil, 3 - hlavní vzduchojem, 4 - brzdíč samočinné brzdy, 5 - dvojitý zpětný ventil, 6 - brzdový válec, 7 - brzdový rozvaděč, 8 - pomocný vzduchojem, 9 - průběžné (hlavní) potrubí, 10 - spojkový kohout, 11 - brzdová spojka

Funkce brzdy je následující. Kompresor (1) naplní stlačeným vzduchem hlavní kompresor (3) přes zpětný ventil (2). Zpětný ventil brání zpětnému proudění vzduchu ze vzduchojemu do kompresoru. Tlak vzduchu v hlavním vzduchojemu dosahuje hodnoty až 11 barů. Za vzduchojemem je následně upraven na 5 barů. Při sestavování soupravy dojde k propojení brzdových spojek (11) a otevření spojkových kohoutů (10) mezi lokomotivou a vozy (příp. mezi vozy) a tím se přes brzdíč naplní průběžné potrubí (9) na tlak 5 barů. Zároveň se z průběžného potrubí (9) naplní přes brzdový rozvaděč (7) pomocné vzduchojemy (8) taktéž na tlak 5 barů. Následné brzdění během pohybu vlaku probíhá následovně. Přestavením brzdíče (4) případně ovladače brzdíče do brzdící polohy dojde ke snížení tlaku vzduchu v průběžném potrubí (9) čímž dojde k zareagování brzdových rozvaděčů (7), které přepustí vzduch z pomocných vzduchojemů (8) přes dvojitou zpětnou záklopku (5) do brzdových válců (6). Naopak při přestavení brzdíče (4) do odbrzdovací polohy dojde ke zvýšení tlaku v průběžném potrubí (9) zpátky na hodnotu 5 barů, na což opět zareagují rozvaděče, které spojí brzdový válec (6) s ovzduším a pomocný vzduchojem (8) s průběžným potrubím (9). Tím dojde k odvětrání brzdových válců (6) a zároveň se naplní pomocný vzduchojem (8) na původní hodnotu tlaku. Z tohoto popisu je tedy zřejmé, že v případě roztržení vlaku, nebo netěsnosti dojde ke snížení tlaku vzduchu v průběžném potrubí (9)

a tím k zaúčinkování brzdových rozvaděčů (7), díky čemuž se napustí brzdové válce (6) stlačeným vzduchem a dojde k zastavení vlaku.

Starší vozidla měly brzdič umístěný přímo na stanovišti strojvedoucího a strojvedoucí tak přímo reguloval tlak v průběžném potrubí. Novější vozidla mají brzdič umístěný ve strojovně a na stanovišti strojvedoucího je umístěn pouze ovladač brzdiče a funkce pneumatické brzdy je tedy řízena elektrickým ovládáním. Brzdič je pak tvořen soustavou elektropneumatických ventilů, které může na dálku ovládat buďto strojvedoucí, nebo automatické řízení.

2.1.4 Elektropneumatická brzda (EP brzda)

Jedná se o samočinnou tlakovou brzdu, která je doplněna o ovládání pomocí elektropneumatických ventilů. Ty urychlují plnění a vyprazdňovací časy brzdového válce a tím i výsledný brzdící účinek. Elektropneumatická brzda se dá dělit stejně jako tlakové brzdy na přímočinnou a samočinnou. Každé vozidlo je vybaveno dvěma elektropneumatickými ventily (zpravidla brzdící a odbrzdňovací), které jsou ovládány ze stanoviště strojvedoucího pomocí brzdiče elektropneumatické brzdy. Hnací vozidlo a připojené vozy musí být vybaveny funkčním zařízením elektropneumatické brzdy, což vyžaduje propojení brzdových spojek hlavního potrubí a propojení všech vozů kabelem UIC. Pomocí kabelu UIC se následně ovládají jednotlivé elektropneumatické ventily.

U samočinné elektropneumatické brzdy dojde při povelu na brzdění ke stejnému postupu, jako je popsáno v podkapitole Samočinná (průběžná) brzda, tedy k poklesu tlaku vzduchu v hlavním potrubí pomocí brzdiče a zároveň elektrickým impulsem dojde k otevření jednotlivých ventilů a ty zajistí rychlý pokles tlaku vzduchu v celém potrubí naráz. Nedochozí tedy k výrazným časovým prodlevám od povelu na brzdění až k vyvinutí potřebné brzdné síly, což je popsáno v podkapitole Pneumatická (tlaková) brzda. Druhý elektropneumatický ventil zajišťuje naopak při požadavku na odbrzdění rychlé zvýšení tlaku v hlavním potrubí, kdy přepustí stlačený vzduch z napájecího potrubí přes pomocný vzduchojem do hlavního potrubí.

U přímočinné elektropneumatické brzdy dochází pouze k ovládání jednotlivých elektropneumatických ventilů. Zvyšování a snižování tlaku v brzdových válkách je zajišťováno z pomocného vzduchojemu přes elektropneumatický ventil. Tento typ brzdy se využívá především u ucelených jednotek, především soupravy metra.

Výhodou elektropneumatické brzdy jsou rychlé reakční doby. V současnosti se tento typ brzdy používá u moderních ucelených jednotek a nových typů osobních vozů,

kde je funkce této brzdy podmíněna přítomností hnacího vozidla, které umožňuje tento typ brzdění.

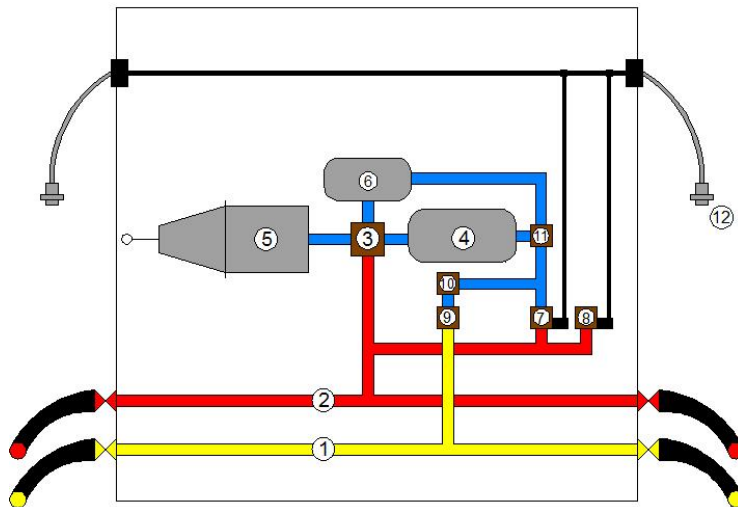


Schéma 3: Princip funkce elektropneumatické brzdy

Zdroj: autor

1 – napájecí potrubí, 2 – hlavní potrubí, 3 – rozvaděč, 4 – pomocný vzduchojem, 5 – brzdový válec, 6 – rozvodový vzduchojem, 7 – odbrzd'ovací ventil, 8 – brzdící ventil, 9 – zpětný ventil, 10 – omezovač tlaku, 11 – přepouštěč, 12 – kabel UIC

Při požadavku na brzdění se pomocí elektrického signálu sepne elektropneumatický brzdící ventil (8). Tím dojde k rychlému snížení tlaku v hlavním potrubí (2), na což zareaguje rozvaděč (3) a přepustí stlačený vzduch z pomocného vzduchojemu (4) do brzdového válce (5). Při odbrzdění dojde k sepnutí elektropneumatického odbrzd'ovacího ventilu (7), který doplňuje hlavní potrubí z potrubí napájecího přes zpětný ventil (9) a omezovač tlaku (10). Pomocný vzduchojem je přes zpětný ventil a omezovač tlaku neustále doplňován. Díky rychlému plnění hlavního potrubí je zajištěn i kratší vyprazdňovací čas brzdového válce.

2.2 Sací brzda

Tento typ brzd není podstatný pro další část této práce, nicméně pro vysvětlení typů brzd je na místě se o nich zmínit. Jedná se o starší typ brzdy, která byla postupně nahrazena brzdou tlakovou. Někdy bývá označována jako brzda podtlaková. Sací brzda využívá rozdíl tlaku na pístu brzdového válce. Na jedné straně pístu brzdového válce vzniká podtlak (vyvozený vývěvou), zatímco na druhé straně působí atmosférický vzduch a následný tlak se převádí na brzdové táhloví. V Československu byl tento typ brzdy v 30. letech 20. století nahrazen brzdou tlakovou. V současné době je sací brzda používána v Indii a jižní Africe.

Dělí se na:

- nesamočinná (jednoduchá),
- samočinná.

Nesamočinná brzda nevyvolá zabrzdění u přetržené soupravy. Samočinná brzda zabrzdí oba díly přetrženého vlaku bez zásahu lidského činitele.

2.3 Mechanické ruční brzdy

Ruční brzdy jsou zajišťovací. Zajišťuje se pomocí nich vozidlo při odstavení proti pohybu. Vyskytují se na všech hnacích i tažných vozidlech. Jejich provedení se značně liší. Ovládání je působením ruky na ruční kolo. Mezi ručním kolem a zdrží, jsou převody, kdy otáčením kola se pohyb převádí ozubeným čelným i kuželovým soukolím na vřeteno (šroub) a z něho na soustavu kladek na zdrž. Tento typ brzdy je v této práci uvedený pro přehled a přímo nesouvisí s tématem práce. V minulosti býval používán i u vozů metra pro zajištění proti pohybu.

2.4 Elektrodynamické brzdy

Jedná se o neadhezní typ brzd, které přeměňují pohybovou energii na energii elektrickou. Trakční motor umístěn v podvozku hnacího vozidla je brzděn a tím dochází ke zpomalování rychlosti vozidla. Využívají pohybové energie vlaku k roztáčení trakčních motorů, které přejdou na tzv. generátorický chod a začnou vyrábět elektrickou energii. Ta se dá buďto mařit v brzdových odpornicích (odporová brzda), nebo zpátky vracet do napájecí sítě (rekuperační brzda). Samotný princip funkce elektrodynamické brzdy závisí na použitém typu trakčního motoru. Jinak se brzdový účinek vyvozuje u stejnosměrného sériového motoru a jinak u moderního asynchronního motoru. Účinek elektrodynamické brzdy je přibližně závislý na druhé mocnině rychlosti a nejvyšších účinků brzda dosahuje při vyšších rychlostech a s klesající rychlostí klesá i účinek brzdy. Elektrodynamická brzda tedy nepůsobí až do zastavení, a proto je při nízké rychlosti nahrazena pneumatickou brzdou, která zajistí bezpečné zastavení vozidla. Velkou výhodou tohoto typu brzdění je, že nedochází k žádnému opotřebenosti brzdových zdrží a zároveň se vyrábí elektrická energie, která se dá dále využít. Brzdu je možné používat v kombinaci s pneumatickou brzdou a zvyšuje se tím samotný brzdící účinek.

2.5 Střadačová brzda

Využívá se jako zajišťovací brzda. Je kombinací tlakovzdušné a pružinové brzdy. Funguje opačným způsobem než brzda pneumatická, kdy přítomnost stlačeného vzduchu ve válci způsobuje odbrzdění. Stlačený vzduch přetlačuje pružinu ve válci a tím dojde k odlehnutí zdrží, nebo čelistí, čímž se vozidlo odbrzdí. V případě úniku stlačeného vzduchu pružina opět přitlačí zdrž, nebo čelisti a vozidlo se zabrzdí. Tento princip je tedy vhodný při dlouhodobém odstavení, kdy není přítomný stlačený vzduch.

3. POPIS DRÁHY SPECIÁLNÍ A ZABEZPEČOVACÍCH SYSTÉMŮ

Tato kapitola se věnuje popisu Dráhy speciální a popisu zabezpečovacích systémů ETCS a CBTC. Dráha speciální je specifický provoz drážních vozidel oproti klasické dráze. V tomto konkrétním případě se jedná o popis provozu metra včetně požadavků na tento systém. Zároveň jsou v kapitole popsány i zabezpečovací systémy ETCS a CBTC. Ty jsou popsány z pohledu členění jednotlivých systémů a pro pochopení funkce činnosti konkrétního zabezpečovacího systému.

3.1 Dráha speciální

Dělení železničních tratí je v České republice dáno zákonem o dráhách č. 266/1994 Sb. Z pohledu této práce je důležitá dráha definovaná v odstavci f).

„f) speciální dráha, která slouží zejména k zabezpečení dopravní obslužnosti obce.“
(MDČR, 2018, s. 80)

Jak již bylo uvedeno, tato práce se zaměřuje na dráhu speciální, tedy metro.¹ Jedná se o kapacitní prostředek městské hromadné dopravy, který je provozován na oddělené kolejové dráze vedené zpravidla pod úrovní terénu v tunelu. Celý systém metra tedy může být v provozu zcela nezávisle na ostatních druzích dopravy, což mu přidává na provozní spolehlivosti.

Hlavním úkolem metra je rychlá přeprava velkého množství cestujících v rámci určité aglomerace. Rozvoj metra započal koncem 19. století v Evropě, odkud se následně šířil do celého světa. V Československé socialistické republice byl první systém metra uveden do provozu dne 9. května 1974 v Praze. V současné době jsou v Praze v provozu tři linky (A, B, C), které dohromady měří 65 km. Momentálně zažívá metro velký rozvoj v asijských zemích. Pohon metra je řešen elektricky (zpravidla pomocí přírodního proudu), z důvodu provozu v téměř uzavřeném prostředí. V současné době je mnohdy tento dopravní prostředek plně automatizován, kdy se využívá provoz na segregované dopravní cestě, kde samotný provoz není ovlivňován tolika okolními parametry, jako je tomu u velké železnice.

¹ Pojmeme metro se souhrnně označuje vše, co souvisí s provozem dráhy speciální. Patří sem samotné stavby, celý dopravní systém a drážní soupravy.

3.1.1 Členění metra

Metro se dá neoficiálně členit podle několika hledisek.

Podle technicko-dopravní koncepce:

- lehké metro (princip tramvaje, z čeho plynou menší profil tunelů, malá vzdálenost stanic, menší přepravní kapacita, lehké soupravy),
- standartní metro (železniční koncept, vzdálenost stanic do 2 km),
- metro se zrychlenými úseky (možný průjezd některých stanic),
- rychlé metro (velký rozestup stanic, vyšší přepravní rychlost, velká přepravní kapacita).

Tato práce se zabývá standartním metrem.

Podle umístění v terénu:

- uzavřený systém (uzavřený tubus metra, není zde vliv povětrnostních podmínek),
- otevřený systém (vliv povětrnostních podmínek).

Podle způsobu řízení:

Zde se využívá dělení do jednotlivých stupňů automatizace (GOA) definované Mezinárodní asociací pro veřejnou dopravu (UITP).

- GOA0 – ruční řízení bez automatického dohledu nad vlakem
- GOA1 – ruční řízení s automatickým dohledem nad vlakem
- GOA2 – poloautomatický provoz vlaku
- GOA3 – automatický provoz vlaku, obsluha může obsluhovat vlakové dveře
- GOA4 – bezobslužný provoz vlaku

Rozlišovat mezi jednotlivými stupni automatizace je z pohledu problematiky brzdění důležité. Je rozdíl v tom, zda strojvedoucí ovládá provozní i nouzovou brzdu sám (GOA0), nebo zda ovládá pouze provozní brzdu a nouzovou brzdu ovládá systém automaticky (GOA1), nebo zda nouzovou i provozní brzdu ovládá systém automaticky (GOA2, GOA3, GOA4). Z toho vyplývá, že brzdňý model musí dle příslušné varianty (vyjma GOA0, kde není zabezpečovací ani řídicí systém) reflektovat různé reakční doby strojvedoucího nebo systému. Podrobněji jsou jednotlivé stupně automatizace popsány v kapitole 3.3.

3.1.2 Požadavky na brzdění vozidel dráhy speciální

Tím, že se jedná o dráhu speciální, tak jsou na drážní vozidla provozované na této dráze kladeny jiné požadavky než na vozidla provozované na jiných dráhách. Prvotní podmínky na brzdy vozidel dráhy speciální stanovuje Vyhláška číslo 173/1995 Sb., konkrétně Část třetí, Hlava druhá (Dráha speciální), §42 Brzdění vlaku.

Ten uvádí:

„(1) Vlaky musí být dostatečně a spolehlivě brzděny. Účinek brzd a druh brzdění musí odpovídat traťovým poměrům, druhu a sestavě vlaku, jeho zatížení a stanovené traťové rychlosti.

(2) Účinek brzd musí být takový, aby zábrzdná dráha byla nejvýše rovna zábrzdné vzdálenosti.

(3) Vlaky pro přepravu cestujících musí být vybaveny samočinnou průběžnou brzdou.

(4) Pro činnosti při sestavování a způsobu brzdění vlaků platí jednotné technologické postupy dopravce.“ (MDČR, 2018, s. 121)

Dále požadavky na brzdy vozidel dráhy speciální upřesňuje Příloha č.3 k vyhlášce 173/1995 Sb., Požadavky na drážní vozidla, Část III., Drážní vozidla dráhy speciální. Především důležité z pohledu této práce jsou požadavky na brzdy uvedené v části III. body 4 až 11.

Ty konkrétně uvádí:

„4. Každé hnací drážní vozidlo pro přepravu cestujících musí být vybaveno

a) nejméně dvěma na sobě nezávislými brzdami s brzdícím účinkem působícím na kola drážního vozidla, z nichž jedna je brzdou provozní,

b) mechanickou brzdou zajišťovací; touto brzdou může být jedna z brzd uvedených v písmenu a)

5. Brzdy uvedené v bodě 4 musí samostatně nebo ve vzájemné součinnosti zabezpečit brzdění

a) provozní,

b) nouzové,

c) zajišťovací.

Pozn.: Všechny tyto typy brzdění budou popsány v další kapitole.

6. Provozní brzda (elektrodynamická) musí umožnit zastavení drážního vozidla zatíženého nejvíce 0,5 t se středním zpožděním nejméně 0,9 m.s-2.

7. Při závadě provozní brzdy musí být uvedena automaticky do činnosti brzda druhá podle bodu 4 písm. a). Účinnost této brzdy nesmí být závislá na trakčním napětí. Brzdící účinek musí být stejný jako u provozní brzdy.

8. Nouzová brzda (pneumatická, průběžná) musí umožnit zastavení drážního vozidla zatíženého nejvíce 0,5 t se středním zpožděním nejméně 1,1 m.s-2. Brzdící účinek nesmí být závislý na dodávce elektrického proudu z trakčního vedení.

9. Zajišťovací brzda (mechanická - střadačová) musí udržet v klidu plně zatížené drážní vozidlo na největším sklonu trati.

10. Nouzová brzda musí být provedena tak, aby při roztržení vlaku byla uvedena do činnosti samočinně.

11. Při použití provozní nebo nouzové brzdy musí dojít k rozpojení jízdních obvodů. “ (MDČR, 2018, s. 121)

Z těchto požadavků je zřejmé, že soupravy metra musí mít pro bezpečný provoz plně funkční elektrodynamickou a pneumatickou (resp. elektropneumatickou) průběžnou brzdu.

Předpis o brzdění elektrických vozů V 2/1 vydaný DPP se zmiňuje o délkách zábrzdných drah, při použití jednotlivých způsobů brzdění. Zábrzdné délky jsou uvedeny pro prázdné soupravy a pro hodnoty sklonu do 3 ‰. Hodnoty v metrech jsou souhrnně uvedeny v tabulce.

Tabulka 3: Délky zábrzdných drah DPP

Rychlost [km/h]	Nouzové brzdění [m]	Brzdění elektrodynamickou brzdou [m]
50	90	110
80	215	265

Zdroj: autor na základě předpisu V2/1 DPP

Důležité je vysvětlit pojmy jako jsou provozní, zajišťovací a nouzová brzda.

Provozní brzda

Provozní brzda je využívána k provoznímu brzdění, a tedy k běžnému zastavování (nejčastěji ve stanici) nebo ke snižování rychlosti. Jedná se o nejvyužívanější způsob brzdění. Provozní brzda může být ovládána strojvedoucím, nebo systémem automatického řízení v případě existence ATO (resp. AVV/ACBM), nebo ATP jako předstupeň nouzové brzdy (systém LZA na lince A v Praze).

Hlavní provozní brzdou je u souprav metra použita elektrodynamická brzda. Jak již výše zaznělo, elektrodynamická brzda není sama schopná zastavit vlak, protože její účinek je pod rychlostí 4 km/h minimální, a proto se k úplnému zastavení používá elektropneumatická brzda. Elektropneumatická brzda se tedy v rámci provozního brzdění používá jako dobrzdňovací brzda pomáhající elektrodynamické brzdě zastavit vozidlo. Další funkce elektropneumatické brzdy je nouzové brzdění a taktéž náhrada elektrodynamické brzdy v případě poruchy. To je v provozu dráhy speciální důležité, neboť jsou u ní brzdné vzdálenosti (dráhy) podstatně kratší, než je tomu u velké železnice. Je to dáno intenzitou provozu (provozním intervalem) a vzdáleností zastávek.

Podle normy ČSN EN 16185-1 odstavce 5.9 je provozní brzda definována takto.

„Provozní brzda vyžaduje spolupráci brzd jako součinnost těch brzd, které jsou navrženy pro používání během provozního brzdění. V takovém případě může na jedno dvojkolí působit více než jeden brzdový systém.

U provozní brzdy je zásadou řízení brzdy optimalizace používání těch brzd, které pracují rekuperačním způsobem, nebo se neopotřebovávají.

Podřízené brzdové systémy se musí aktivovat až po svou maximální brzdící sílu podle následující hierarchie:

- *rekuperační elektrodynamická brzda z důvodu dosažení nejvyšší možné úrovně převodu brzdící energie na energii elektrickou,*
- *odporová elektrodynamická brzda,*
- *další systémy pracující bez opotřebení, pokud jsou k dispozici,*
- *adhezní brzda,*
- *volitelné: uspořádání pro výhradní aktivaci elektrodynamické/dynamické brzdy, pokud se požaduje pro udržování rychlosti.*

Výše uvedená hierarchie definuje tzv. preferenční režim, ve kterém musí řídicí systém pracovat za normálních provozních podmínek.“ (ČSN EN 16185-1, 2015, s. 51)

Zajišťovací brzda

Zajišťovací brzda zabraňuje pohybu vozidla, především při dlouhodobém odstavení vozidla. Jako zajišťovací brzda slouží u souprav metra brzda střadačová, která je ovládána elektropneumatikou. Popis střadačové brzdy je uveden v kapitole 2.5. Zajišťovací brzda je taktéž definována normou ČSN EN 16185-1 odstavcem 5.11.3 takto:

„Účelem zajišťovací brzdy je:

- *udržet EMU/DMU v klidové poloze při maximální brzděné hmotnosti po dobu nejméně dvě hodiny v případě, kdy je napájecí brzdící energii přerušeno nebo při výpadku napájení.*

Zajišťovací brzda musí být schopná udržet vlak na spádu 35 ‰, pokud není stanoveno jinak.

Zajišťovací brzda se běžně uvádí do činnosti použitím úplné provozní brzdy nebo záchranné brzdy. Brzdu nesmí být možno uvolnit, pokud je napájení energií nedostatečné pro následné plné provozní zabrzdění.

Je přípustné místo zajišťovací brzdy použít parkovací brzdu, pokud automaticky zabrzdí při výpadku energie ve vlaku pro provozní brzdu.“ (ČSN EN 16185-1, 2015, s. 51)

Zajišťovací brzda není důležitá z pohledu cílů této práce, její popis je zde ale uveden pro přehlednost a kompletnost.

Nouzová brzda

Nouzová brzda je využívána k nouzovému brzdění, někdy označovaného jako rychločinné brzdění. Za normální provozní situace se nevyužívá, k jejímu použití tedy dochází pouze v nouzových situacích, kdy je třeba předejít vzniku hrozícího nebezpečí (např. po překročení povolené rychlosti, kdy předtím selhala provozní). Její funkce musí být zajištěna i v případě výpadku napájecího napětí. Nouzová brzda může být ovládána strojvedoucím, nebo systémem automatického řízení v případě existence ATO (resp. AVV/ACBM).

Hlavní nouzovou brzdou je u souprav metra použita elektropneumatická brzda. Norma ČSN EN 16185-1 odstavec 6.2 se o nouzové brzdě zmiňuje takto.

„Zábrzdná vzdálenost nouzového brzdění nesmí být větší než při plném provozním brzdění. Účinek nouzového brzdění použitelný v provozu se musí vztahovat pouze k požadavku pro maximální součinitel adheze μ .“ (ČSN EN 16185-1, 2015, s. 51)

Další definici nouzové brzdy popisuje norma IEEE 1474-1 pojednávající o systému CBTC.

„Systém nouzových vlakových brzd musí být schopný zastavit vlak uvnitř předpokládané zastavovací vzdálenosti stanovené modelem bezpečného brzdění.“ (IEEE 1474-1, 2004, s. 56)

Provozní předpis o brzdění elektrických vozů V 2/1 vydaný DPP popisuje nouzovou brzdu takto:

„Nouzová brzda musí být vždy neprodleně použita při ohrožení bezpečnosti provozu nebo bezpečnosti osob.“ (DPP, 2009, s. 15)

Předpis V 2/1 DPP je zmíněn z toho důvodu, že DPP je jediným provozovatelem dráhy speciální v České republice.

U souprav M1 pražského dopravního podniku je při nouzovém brzdění zpoždění brzd maximálně $0,5 \text{ s} \pm 10 \%$. Právě zpoždění reakce brzd je důležitým parametrem pro určení samotných brzdných křivek a výrazně se do nich projevuje.

Při provozním i nouzovém brzdění je důležitá korekce tlaku podle aktuálního obsazení, která se využívá u souprav metra. Z důvodu rozdílných zatížení jednotlivých vozů, dochází i ke změně brzdné síly. Pokud by při brzdění nedocházelo ke korekci tlaku, nebyla by zaručena požadovaná brzdná vzdálenost, plný vůz by měl příliš malé zpomalení a nebyl by schopný zastavit na požadované vzdálenosti. U prázdného vozu by zase mohlo dojít k překročení meze adheze a následnému smyku kol při brzdění. Plně ložený vůz je až o 77 % těžší než prázdný vůz. Garantované odrychlení udávané DPP pro soupravy 81-71M je $0,94 \text{ m/s}^2$, tato hodnota je ovšem počítána pro situaci, kdy by jeden z pěti vozů soupravy nebrzdil. Pokud by brzdily všechny vozy, tak by hodnota odrychlení byla cca $1,2 \text{ m/s}^2$.

3.2 Popis zabezpečovacího systému ETCS

ETCS (European Train Control System) je evropský vlakový zabezpečovací systém, který tvoří jednu ze dvou hlavních součástí ERTMS – evropského systému řízení železniční dopravy. Tou druhou hlavní součástí je komunikační systém GSM-R.

Vývoj systému ETCS započal v první polovině 90. let. V té době používaly evropské železniční správy přes 20 rozdílných zabezpečovacích zařízení, které spolu navzájem nespolupracovaly. Z toho plynula potřeba výměny hnacích vozidel na hranicích jednotlivých států, což výrazně prodlužovalo cestovní časy a železniční doprava tak pro mezistátní cestování ztrácela na atraktivitě. Postupně se tento problém snažili výrobci hnacích vozidel (na popud železničních dopravců) obcházet instalací více zabezpečovacích zařízení přímo na vozidlo, aby získali možnost zajíždění vozidel na síť jiných železničních správ. Není ovšem konstrukčně možné umístit na vozidlo úplně všechny zabezpečovací zařízení používané v Evropě.

Právě proto se jedním z cílů evropské unie a příslušných železničních institucí stal vývoj systému ETCS, jakožto jednotného vlakového zabezpečovacího systému pro celou Evropu. Tím by bylo dosaženo tzv. interoperability, tedy stavu, kdy lokomotiva jednoho výrobce, resp. provozovatele dráhy, by mohla bez zbytečných proluk zajíždět na území státu jiného provozovatele (např. z Portugalska do Polska). V dnešní době probíhá postupné zavádění a rozšiřování systému ETCS (mj. i v České republice) a dá se tak označit za nejperspektivnější a nejvíce se rozvíjející vlakový zabezpečovací systém v Evropě.

Systém ETCS umožňuje do jisté míry přizpůsobení se různým potřebám a požadavkům jednotlivých evropských železničních správ.

Hlavním posláním systému ETCS je zajištění bezpečnosti vlakové dopravy prostřednictvím dohledu nad jízdami jednotlivých vlaků. V případě ohrožení bezpečné jízdy vlaku systém ETCS patřičně zasáhne do řízení vlaku (např. typicky zavede nouzové brzdění vlaku). V rámci systému ETCS se vlak může pohybovat na základě vydaného oprávnění k jízdě (MA), které obsahuje informaci o tom, do jakého místa vlak může bezpečně dojet a jakou maximální rychlostí se v tomto úseku může pohybovat. Mezi hlavní funkce systému ETCS tedy patří neustálá kontrola nepřejetí tzv. hranice povolení k jízdě, neustálá kontrola maximální povolené rychlosti vlaku a neustálá kontrola správného směru jízdy vlaku dle MA. Systém ETCS je navržen jako nadstavba nad konvenčními systémy zabezpečení provozu (stavědla), a proto s nimi musí tvořit rozhraní. Stavědla se nadále starají o stavění vlakových cest a dohled nad nimi.

Systém ETCS je podrobně definovaný specifikacemi, které jsou spravovány Evropskou železniční agenturou – ERA. Specifikace jsou zveřejňovány ve formě dokumentů označovaných jako SUBSET. Hlavní SUBSET, který popisuje systém ETCS a jeho funkční chování, je SUBSET-026 skládající se z devíti částí (resp. dokumentů). Jelikož dochází k neustálému zdokonalování systému ETCS, bývají jednotlivé SUBSETy průběžně aktualizovány (tou nejaktuálnější verzí specifikací je BL3R2, neboli Baseline 3 Release 2, přičemž v platnosti jsou stále i starší specifikace BL2 a BL3MR1).

3.2.1 Fyzické rozdělení systému ERTMS/ETCS

Stejně jako jiná zabezpečovací zařízení se ETCS skládá z mobilní a traťové části.

Mobilní část ERTMS/ETCS

Mobilní část se nachází přímo na vozidle a v závislosti na úrovni aplikace může být složena z:

- palubního zařízení ERTMS/ETCS,
- palubní části radiového systému GSM-R.

Palubní zařízení ERTMS/ETCS je počítačový systém s bezpečným logickým jádrem (EVC), který dohlíží nad bezpečnou jízdou vlaku na základě informací vyměňovaných s traťovou částí (konkrétně s RBC). Mezi tyto informace patří informace o trati, o oprávnění k jízdě a k nim se přidá informace, které vloží strojvedoucí (např. informace o délce soupravy, úroveň módu atd.). Na základě těchto informací dochází ke generování dynamického rychlostního profilu, čili dohledové brzdné křivky. Následně je aktuální rychlost vlaku porovnávána s touto brzdou křivkou, a pakliže dojde k jejímu překročení, tak je typicky aktivováno nouzové brzdění.

Rádiová komunikační síť GSM-R se používá pro obousměrnou komunikaci (konkrétně výměnu zpráv a paketů) mezi EVC na vlaku a RBC (resp. RBCC).

Traťová část ERTMS/ETCS

Traťová část se nachází mimo vozidlo (na trati, nebo v technologických místnostech) a v závislosti na úrovni aplikace může být traťový systém složen z:

- balízy,
- traťové elektronické jednotky (LEU),
- eurosmyčky,
- radiové komunikační sítě GSM-R,

- radioblokové centrály (RBC),
- doplňkového rádiového obvodu.

Balíza je bodový prvek v kolejišti sloužící jako jeden ze zdrojů informace k určení polohy vlaku. Po projetí balízy vlakem (resp. po jejím minutí balízovou anténou) se ve čtečce balíz zpracují načtená data (resp. balízový telegram) a ta se dále posílají do EVC. Tato balíza se dále stává referenčním bodem, ke kterému se vztahují veškeré informace o poloze. Balízy jsou buďto přepínatelné (používané v ETCS L1), nebo nepřepínatelné (používané v ETCS L2 a L3). Přepínatelná balíza umožňuje změnu odesílaného telegramu a je připojena k traťové elektronické jednotce (LEU). Nepřepínatelná balíza poskytuje jeden neměnný telegram. Balízy se umísťují v ose kolejí a bývají seskupeny do balízových skupin, tedy více balíz u sebe. Soustava balízových skupin dohromady tvoří koordinační systém, ve kterém se vlak pohybuje a ve kterém se dokáže zorientovat.

Traťová elektronická jednotka (LEU) vytváří telegramy na základě informací ze staničního, nebo traťového zabezpečovacího zařízení a ty následně posílá do přepínatelných balíz. LEU je používáno pouze v ETCS L1.

Eurosmyčka umožňuje liniový přenos informace o návěstidle na vozidlo. Jedná se o doplňkový systém k balízám. Eurosmyčka je používána pouze v ETCS L1.

Traťová část rádiové komunikační sítě GSM-R se používá pro obousměrnou komunikaci (konkrétně výměnu zpráv a paketů) mezi RBC (resp. RBCC) a CVC na vlaku.

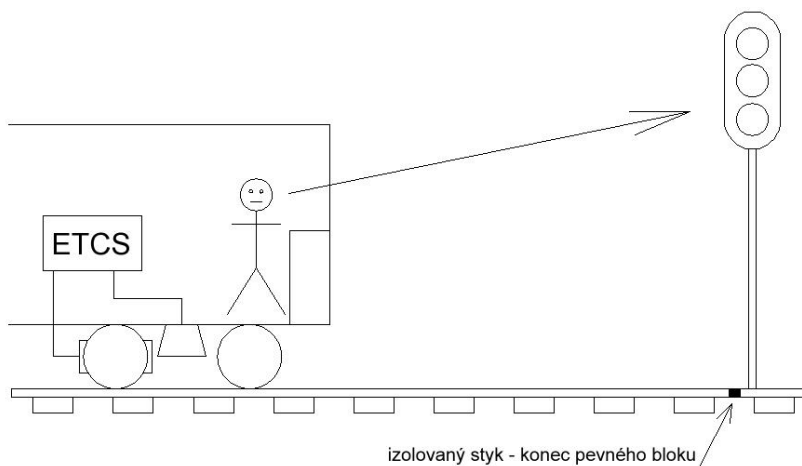
Radiobloková centrála (RBC) je počítačový systém, který vydává povolení k jízdě jednotlivým vlakům na základě informací získaných z vnějších traťových systémů (stavědel, např. informace o volnosti kolejového úseku) a na základě informací získaných z palubních zařízení jednotlivých vlaků (např. hlášení o poloze vlaku). Jedna RBC je odpovědná za bezpečnou jízdu vlaků vždy pouze v určité definované oblasti dané omezujícími parametry RBC (např. maximální počet vlaků, se kterými zvládne komunikovat).

Doplňkový rádiový obvod zajišťuje podobně jako eurosmyčka přenos informace o návěstidle na vozidlo.

3.2.1 Aplikační úrovně systému ERTMS/ETCS

Zabezpečovací zařízení ETCS je tvořeno navzájem oddělenými prvky (viz kap. 3.2.1), které svými kombinacemi a zapojením do stávajícího zabezpečovacího zařízení umožňuje dosažení různých aplikačních úrovní. Anglicky se taková úroveň označuje jako Level (zkratka L), přičemž se k tomu přidává příslušné číselné označení (L0, LNTC, L1, L2 nebo L3). Jednotlivé aplikační úrovně umožňují vyjádřit různé možné provozní vztahy mezi tratí a vlakem. Definice úrovní se vztahují k použitému traťovému zařízení, ke způsobu, jakým se traťové informace dostanou k palubním zařízením a jaké informace se zpracovávají v traťovém a palubním zařízení. Jednotliví provozovatelé drah se mohou sami rozhodnout, která úroveň, je vhodná pro jimi spravované tratě

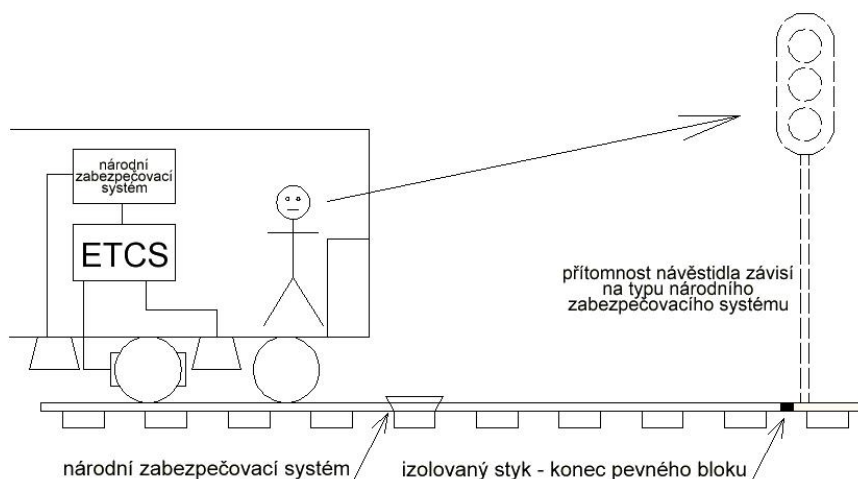
Aplikační úroveň L0 zahrnuje provoz vlaků vybavených technologií ETCS na tratích, které nejsou vybaveny traťovou částí ETCS, nebo jakýmkoliv jiným vlakovým zabezpečovačem. Zařízení tedy hlídá pouze nepřekročení stanovené rychlosti vozidla v neřízené oblasti. Stanovená rychlost pro tuto úroveň v České republice je 100 km/h. Strojvedoucí má na starosti řízení rychlosti vlaku a sledování návěstidel.



Obrázek 6: Aplikační úroveň L0

Zdroj: autor

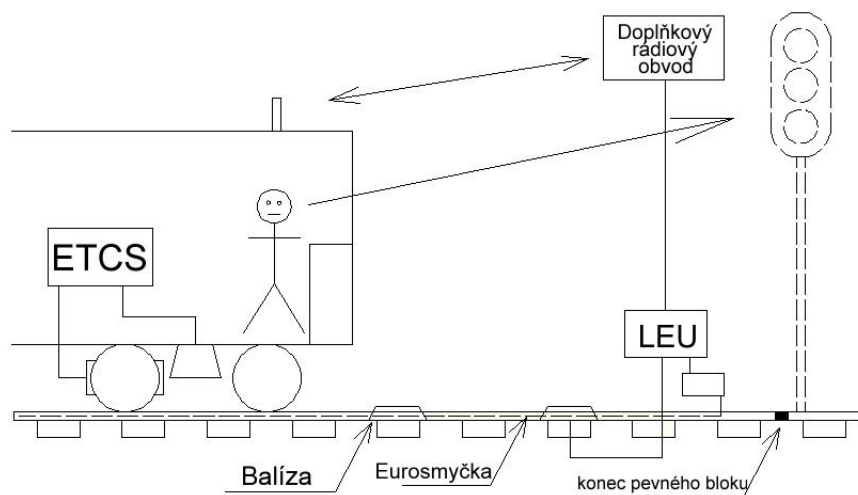
Aplikační úroveň LNTC (dříve LSTM) se využívá k provozování vlaků vybavených systémem ETCS na tratích vybavenými národními zabezpečovacími zařízeními, které nejsou součástí systému ETCS. Zařízení hlídá pouze maximální povolenou rychlost vlaku. Palubní část systému zajišťuje funkci národního vlakového zabezpečovacího zařízení. Pro správnou funkci musí být vozidlo vybaveno specifickým transmisním modulem STM. Strojvedoucí má na starosti řízení rychlosti vlaku a sledování návěstidel, pokud jsou návěstidla přítomna. To závisí na typu národního zabezpečovače.



Obrázek 7: Aplikační úroveň LNTC

Zdroj: autor

Aplikační úroveň L1 primárně využívá přepínatelných balíz k přenosu informací mezi mobilní a traťovou částí. Přepínání balíz je zajištěno traťovou elektronickou jednotkou LEU. Zařízení pracuje podobně jako bodový vlakový zabezpečovač, ovšem může být využito i eurosmyček, nebo doplňkových rádiových obvodů. Palubní část systému generuje brzdné křivky a hlídá jejich dodržování. Tato aplikační úroveň umožňuje nepřetržité sledování povolené rychlosti vlaku.

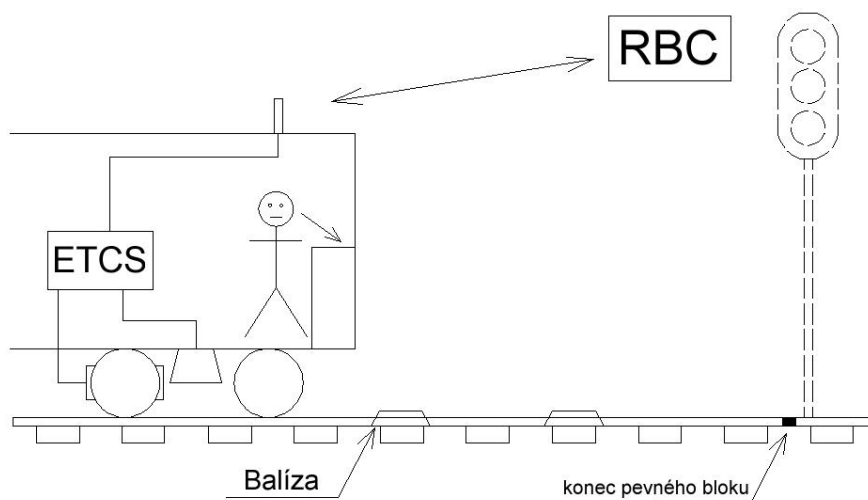


Obrázek 8: Aplikační úroveň L1

Zdroj: autor

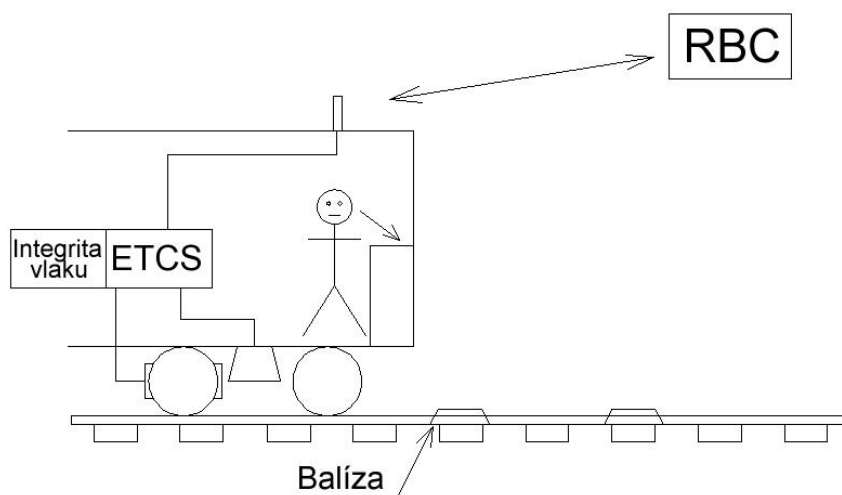
Aplikační úroveň L2 používá nepřepínatelné balízy, které slouží jako referenční bod k určení polohy a k přenosu neproměnných informací. Balízový telegram je načten balízovou čtečkou umístěnou na vozidle a slouží jako jedna z informací, z kterých se následně určí konkrétní poloha vlaku. Povolení k jízdě (MA) a popis trati je na vozidlo přenášeno pomocí GSM-R z radioblokové centrály RBC. Mobilní část ETCS (konkrétně odometrie) měří ujetou

vzdálenost od poslední načtené balízové skupiny. Po zpracování těchto informací EVC vytvoří hlášení o poloze vlaku a pošle ho přes GSM-R do RBC. Palubní část systému generuje brzdné křivky a hlídá jejich dodržování. Tato aplikační úroveň již nevyžaduje přítomnost návěstidel, ale trať je neustále rozdělená na pevné oddíly. Strojvedoucí veškeré informace dostává z palubního počítače.



Obrázek 9: Aplikační úroveň L2
Zdroj: autor

Aplikační úroveň L3 je rádiový systém řízení vlaku. Přenos povolení k jízdě (MA) je na vozidlo přenášen pomocí GSM-R. Balízy slouží jako referenční bod k určení polohy a k přenosu neproměnných informací. V této aplikační úrovni jsou pevné bloky (resp. traťové oddíly) nahrazeny tzv. pohyblivým blokem. U pohyblivého bloku je volnost vlakové cesty dána pohybujícím se koncem předchozího vlaku. Bezpečný rozestup mezi dvěma po sobě jedoucími vlaky je dán délkou zábrzdne dráhy předchozího vlaku (závisící mj. na parametrech vlaku a na parametrech infrastruktury) při zohlednění všech reakčních časů a zpoždění jednotlivých zařízení včetně komunikace. Výsledné zkrácení bezpečných rozestupů mezi vlaky umožňuje zvýšení kapacity trati. Palubní část systému generuje brzdné křivky a hlídá jejich dodržování. Podrobnější popis pohyblivého bloku je uveden v kapitole 3.3. Trať není vybavena návěstidly a strojvedoucí veškeré informace dostává z palubního počítače.



Obrázek 10: Aplikační úroveň L3

Zdroj: autor

Zařízení, které není izolováno (vyloučeno z činnosti) v rámci systému ETCS, vždy pracuje v jedné z výše uvedených aplikačních úrovní. Všechny přechody mezi jednotlivými aplikačními úrovněmi se provádí podle definovaných postupů.

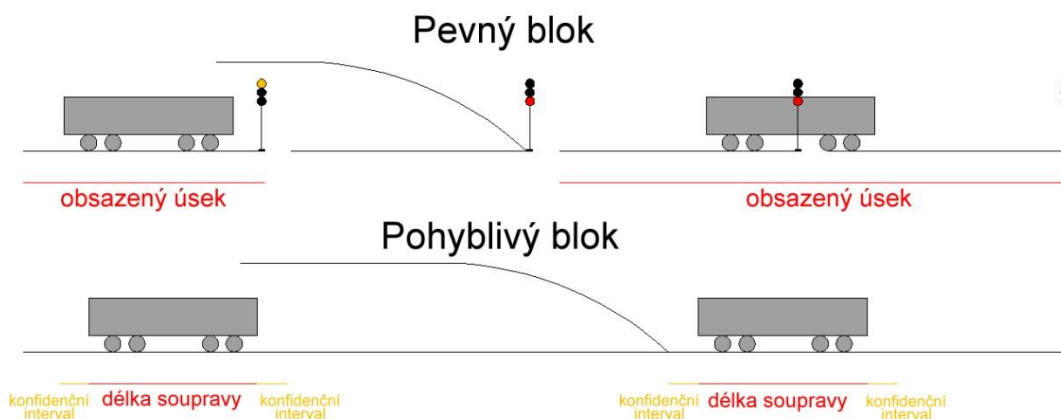
3.3 Popis zabezpečovací části systému CBTC

Systém CBTC (Communications-based train control), neboli řízení vlaků založené na komunikaci, je komplexní železniční zabezpečovací a automatizačně-řídící systém (pro účely této práce je stěžejní zabezpečovací část), který využívá telekomunikace mezi vlakovým a traťovým zařízením pro řízení provozu a řízení infrastruktury. Tento systém je primárně určený pro tratě městské hromadné dopravy s vyhrazenou vodící dráhou (zejména pro dráhu speciální – metro), která je oddělena od silniční a pěší dopravy. Technické řešení CBTC umožňuje jízdu vlaků v krátkých intervalech, a proto lze přepravit velké množství, z toho důvodu je nutné vypravovat vlaky s co největší obsaditelností a v co nejkratším možném intervalu mezi jednotlivými spoji. To vše při zachování bezpečného provozu ve zvoleném stupni automatizace. Systém CBTC má všechny technické předpoklady tak vysoké nároky zvládnout.

V současné době existuje ve světě již mnoho dopravních systémů vybavených systémem CBTC a to v různých stupních automatizace. Mnohdy se jedná o systémy s krátkými tratěmi, systémy s omezeným počtem vozidel, nebo systémy s několika provozními režimy. Zároveň je systém CBTC provozován na rozsáhlých sítích metra s více než milionem přepravených cestujících za den a s více než stovkou souprav v provozu. Mnohdy je systém CBTC zaváděn na již provozovaných linkách metra, kde nahrazuje dosavadní konvenční zabezpečovací zařízení. V Evropě je systém CBTC provozován např. v Londýně, Paříži, Madridu, Budapešti a na dalších místech. V České republice tento systém dosud není nikde aplikovaný, nicméně se uvažuje jeho využití na plánované lince D pražského metra.

Systém CBTC umí přesněji určit polohu vlaku, než je tomu u konvenčních zabezpečovacích zařízení, které pracují na principu pevných bloků. V pevném bloku je každý blok ohraničen počítači náprav, nebo izolovanými styky kolejových obvodů. Zpravidla jsou jednotlivé bloky ohraničeny návěstidly. Návěstidla umožňují vjezd vlaku do úseku (bloku). V systému CBTC se pracuje s pohyblivými bloky, kdy každý vlak neustále posílá pomocí rádiové komunikace informace o své aktuální poloze traťové části. Podobně tomu je i u systému ETCS Level 3. Z těchto informací je možné stanovit hranici povolení k jízdě pro následující vlak a vydat příslušnému vlaku povolení k jízdě. Každý vlak má tedy neustále informaci o vzdálenosti kam až může jet. Tuto informaci se dozví z povolení k jízdě (MA). Je tedy zřejmé, že u pohyblivého bloku není nutné vybavovat trať návěstidly. Návěstidla zde mohou sloužit pouze jako prostředek pro zajištění provozu např. v případě

výpadku komunikace mezi mobilní a stacionární částí CBTC. Princip pevného a pohyblivého bloku je znázorněn na obrázku 11.



Obrázek 11: Princip pevného a pohyblivého bloku

Zdroj: autor

Křivka na obrázku znázorňuje ATP brzdnu křivku daného vlaku a místo, kde musí vlak bezpečně zastavit, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti provozu.

Konfidenční interval uvedený na obrázku udává nepřesnost určení polohy, závisí zejména na přesnosti odometrie vlaku (čili měření ujeté dráhy). Konfidenční interval je vždy vztažen k poslední relevantní balízové skupině (LRBG), kterou vlak projel. Po určení nové LRBG se odchylka měření ujeté dráhy vynuluje a o to se konfidenční interval skokově zmenší, kdy dále s rostoucí ujetou vzdáleností opět narůstá. Absolutní velikost konfidenčního intervalu závisí na vzájemné vzdálenosti vázaných balízových skupin. Čím je vzdálenost mezi vázanými balízovými skupinami větší, tím je jeho absolutní velikost větší.

Výsledkem použití tohoto systému je efektivnější způsob řízení železniční dopravy. Cílem systému je tedy zvýšení kapacity trati a snížení časového intervalu mezi jednotlivými vlaky tím, že systém sníží vzdálenost (bezpečný rozestup) mezi dvěma po sobě jedoucími vlaky.

Hlavními vlastnostmi systému CBTC jsou především:

- využití pohyblivého bloku a určení volnosti tratě nezávisle na kolejových obvodech či počítačích náprav,
- neustálá, vysokokapacitní a obousměrná datová komunikace mezi mobilní a traťovou (stacionární) částí CBTC,
- vlakové a traťové procesory provádějí neustálý dohled nad provozem vlaků (relevantní informace jsou přenášeny dispečerovi, který může celý provoz sledovat).

System CBTC je podrobně definován normami IEEE 1474 a IEC 62290 (ČSN EN 62290). Evropská norma IEC 62290 (ČSN 62290) nazývá systém CBTC jako UGTMS, ale jedná se o jeden stejný systém pro řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou.

Fyzicky se systém CBTC dělí na mobilní část (CBTC-OB) a stacionární část (CBTC-TS). Mobilní část obsahuje zařízení umístěné na vlaku. Stacionární část obsahuje zařízení umístěné na trati a taktéž řídicí část.

Funkčně se systém CBTC dělí na následující celky:

- ATP – automatický vlakový zabezpečovač – je zabezpečovací zařízení, které dohlíží nad bezpečnou jízdou jednotlivých vlaků a nad celkovým bezpečným provozem všech vlaků. ATP se stará zejména o stavění vlakových cest, o vydávání povolení k jízdě, o určování polohy vlaků, o dohled, zda aktuální rychlost vlaku odpovídá povolené rychlosti (v případě jejího překročení ATP aktivuje nouzové brzdění),
- ATO – automatický provoz vlaků – je systém, který slouží k automatickému řízení jednotlivých jízd vlaků. Zajišťuje regulaci rychlosti a cílové brzdění vlaku včetně časové a energetické optimalizace jízdy vlaku, otevírání dveří a obdobné provozní funkce,
- ATS – automatický dohled nad vlaky – zajišťuje monitorování vlaků, regulaci provozu vlaků (stanovení jízdnicích řádů včetně sledu vlaků), umožňuje zadávat dispečerské povely do systému.

Subsystem ATP má vždy přednost před ATO a ATS, jelikož bezpečnost provozu je vždy na prvním místě.

Pokud se skloubí fyzické a funkční dělení, dostaneme funkční celky (ATP, ATO, ATS), které se dají dělit na stacionární a mobilní část. Podobně se dá dělit i komunikační subsystem (RC).

Subsystemy stacionární části (CBTC-TS) jsou:

- ATP-TS (Automatic Train Protection - Trackside) - stacionární část vlakového zabezpečovače,
- ATO-TS (Automatic Train Operation - Trackside) - stacionární část automatického řízení vlaku,
- ATS (Automatic Train Supervision) - dispečerský dohled a řízení provozu,
- RC-TS (Radio Communication - Trackside) - stacionární část komunikačního subsystemu.

Subsystém mobilní části (CBTC-OB) jsou:

- ATP-OB (Automatic Train Protection - Onboard) - mobilní část vlakového zabezpečovače,
- ATO-OB (Automatic Train Operation - Onboard) - mobilní část automatického řízení vlaku,
- RC-OB (Radio Communication – Onboard) - mobilní část komunikačního subsystému.

Vazby jednotlivých subsystémů jsou uvedeny na následujícím obrázku.

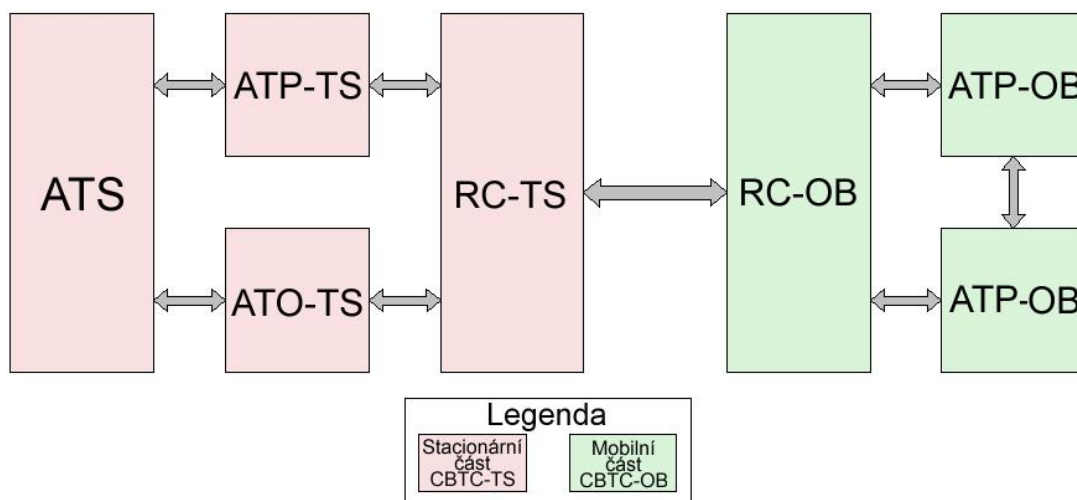


Schéma 4: Schéma architektury obecného systému CBTC

Zdroj: autor podle interní dokumentace AŽD

Norma IEC 62290-1 (ČSN 62290-1) umožňuje provozovat systém CBTC při různých stupních automatizace označované jako GoA. Ta je definuje takto:

„stupně automatizace (grade of automation)

Úroveň automatizace provozu vlaků, při níž může být provozován systém městské hromadné dopravy s vyhrazenou vodící dráhou (UGT), vyplývající ze sdílení odpovědnosti za dané základní provozní funkce vlaků mezi provozním personálem a systémem.“ (ČSN 62290-1, 2015, s. 13)

Ačkoliv je systém CBTC považován za technologii pro automatické řízení, není přímo určený pouze pro systémy bez obsluhy. Dostupných je pět stupňů automatizace GoA 0 až GoA 4. Čím vyšší číslo GoA je, tím musí být vyšší úroveň bezpečnosti, funkčnosti a výkonu. Systém může pro daný stupeň automatizace vykonávat také nepovinné základní funkce provozu vlaku. Stupeň automatizace pak ovlivňuje požadavky na provoz, provozní prostředky, drážní vozidla a personál. V požadavcích je důležité brát v úvahu i chování

cestujících. U jednoho vlaku mohou být na různých místech téže tratě použity různé stupně automatizace.

Jednotlivé stupně automatizace jsou definovány:

- **GoA 0** – stupeň automatizace 0 – provoz vlaku podle rozhledu
 - Strojvedoucí má plnou zodpovědnost a není přítomen žádný systém pro dohled nad jeho činností,
- **GoA 1** – stupeň automatizace 1 - neautomatizovaný provoz vlaku
 - Strojvedoucí sleduje trať a zastavuje vlak v případě nebezpečné situace. Zrychlování a zpomalování provádí strojvedoucí podle návěstidel. Činnost strojvedoucího je pod dohledem systému. Provozní personál odpovídá za bezpečný odjezd vlaku ze stanice, včetně zavření dveří,
- **GoA 2** – stupeň automatizace 2 – poloautomatizovaný provoz vlaku
 - Strojvedoucí sleduje trať a zastavuje vlak v případě nebezpečné situace. Zrychlování a zpomalování je automatizované a rychlost je pod trvalým dohledem systému. Provozní personál odpovídá za bezpečný odjezd vlaku ze stanice. Zavírání a otevírání dveří může být řešeno automaticky,
- **GoA 3** – stupeň automatizace 3 – provoz vlaku bez strojvedoucího
 - Není zde přítomen strojvedoucí, který by sledoval trať a zastavil vlak v případě nebezpečné situace. Ve vlaku je přítomen pouze pracovník provozního personálu, který může zodpovídat za bezpečný odjezd vlaku ze stanice, včetně zavírání dveří, nebo toto může být prováděno automaticky,
- **GoA 4** – stupeň automatizace 4 – provoz vlaku bez obsluhy
 - Ve vlaku není přítomen žádný personál. Bezpečný odjezd ze stanice a zavírání dveří je řešeno automaticky. Automatický systém zajišťuje i řešení nebezpečných podmínek a nouzových situací, jako je evakuace cestujících.

System CBTC musí podporovat stupeň automatizace GoA 1 až GoA 4. GoA 0 nemusí být do systému CBTC zařazený, může se však používat jako nižší stupeň řízení.

3.4 Projekt NGTC

Z předchozích kapitol je zřejmé, že zabezpečovací část systému CBTC je v mnoha ohledech shodná se systémem ETCS Level 3 (rádiový přenos dat, pohyblivý blok). Systém ETCS byl sice vytvořen primárně pro železniční provoz, zatímco systém CBTC pro automatické provozování městských drah, ale potřeba nalézt řešení snižující náklady na životní cyklus zařízení vedl k iniciativě sblížení těchto dvou systémů. Proto vznikl projekt NGTC (systém řízení vlaků nové generace), který byl organizovaný mezinárodní unií veřejné dopravy (UITP). Jeho účelem bylo porovnávat společné znaky a rozdílnosti systémů ETCS a CBTC, dále navrhnout jejich sblížení a určit jejich funkční požadavky zvlášť pro každou oblast železniční dopravy. Cílem systému NGTC bylo vytvořit předpoklady pro standardizované systémy řízení vlaků jak na celostátních tratích, tak i na městských drahách zahrnujících všechny tři úrovně zabezpečení: ATP, ATO a ATS. Projekt započal v září 2013 a byl ukončen říjnu 2016. Vyhodnocením projektu bylo však zjištěno, že dosažený stupeň konvergence mezi ETCS a CBTC byl vyšší, než se očekávalo.

Hlavní rozdíly mezi ETCS a CBTC jsou následující:

- interoperabilita - využívá se u ETCS, u CBTC není potřebná (většinou se jedná o uzavřené dopravní systémy typu metra),
- flexibilita – ETCS umožňuje hladký přechod z národních zabezpečovacích systémů, CBTC to neumožňuje,
- automatický provoz vlaků (ATO) – k dispozici pouze u systému CBTC, ETCS ATO nezahrnuje (v současnosti se teprve definuje rozhraní mezi ETCS a externím ATO),
- pohyblivý blok – k dispozici u systému CBTC, u ETCS stále ve vývoji (úroveň L3 stále není plně specifikována).

4. BRZDNÉ MODELY IEEE A ERA

Hlavní náplní této práce je porovnání brzdných modelů IEEE a ERA a návrh brzdného modelu na dráze speciální. Tyto modely pracují s dohledovými brzdnými křivkami vlaků. Jak již bylo v předchozích kapitolách popsáno, existují dva systémy, jež pracují s brzdnými křivkami, a to systém ETCS, který k výpočtu brzdných křivek využívá brzdný model ERA a systém CBTC, který využívá ke stanovení brzdných křivek brzdný model IEEE.

Brzdné křivky se určují pro ucelené soupravy, tedy vlakové soupravy, jež mají pevně dané neměnné řazení a pro soupravy sestavené z hnacího vozidla a různých vozů. Podle toho, o jaký typ soupravy se jedná, rozlišujeme tzv. gamma a lambda metodu.

V případě ucelených souprav (jednotek) je možné určit, zda brzdná síla je závislá na obsazenosti (počet cestujících) vlaku. U takovýchto souprav mluvíme o tzv. gamma přístupu/metodě. U vozidel dráhy speciální se vždy jedná o gamma metodu, neboť to jsou ucelené jednotky.

Přístup gamma nelze uplatnit u souprav typu lokomotiva plus vozy, tedy různé sestavy vozidel. U různě složených souprav mluvíme o tzv. lambda přístupu/metodě. Pro jednotlivá vozidla totiž není známá závislost brzdné síly na rychlosti a závislost brzdné síly na čase. Tyto závislosti, jak již bylo psáno výše, jsou důležité pro stanovení brzdné křivky. U náhodně sestavených souprav je známé pouze brzdící procento, které udává podíl brzdící váhy napsané na vozidle a hmotnosti vlaku. Díky brzdícímu procentu se snadno stanoví reálné brzdící schopnosti vlaku. Složitější je ovšem převod brzdícího procenta na závislost brzdné síly na rychlosti a závislost brzdné síly na čase.

„Přepočít brzdícího procenta (lambda) na průběh poměrné brzdné síly v závislosti na rychlosti a čase (gama) není snadný, neboť z nápisů na vozidlech není k dispozici funkce dvou proměnných ($F=f(v,t)$), ale jen jedno číslo – brzdící procento. Obecně platí, že různá vozidla s různě působícími brzdami mohou z určité rychlosti dosáhnout stejnou brzdnou dráhu, tedy je jim přiděleno stejné brzdící procento. Zpětně však nelze z brzdícího procenta (zábrzdné dráhy) jednoznačně určit hodnoty jednotlivých parametrů brzdění. Pro umožnění transformace brzdících procent (lambda) na brzdný účinek (gama) slouží konverzní modely. Jejich zpracovatelé jsou si vědomi reálného rozptylu vlastností různých systémů brzd železničních vozidel, a proto přidávají další přírážky. Obecně tedy platí, že metoda lambda vede k pozvolnějším brzdným křivkám než metoda gama, neboť navíc obsahuje přírážky na nejistotu konverzního modelu.“ (Hruban a kol., 2015, s.13)

4.1 Rychlostní profily

Rychlost, kterou se smí vlak pohybovat, je dána několika faktory. Hlavní faktory, které ji ovlivňují, jsou maximální konstrukční rychlost vlaku, ta je dána výrobcem vozidla a je to rychlost, na kterou je vozidlo konstruováno. Dále je to povolená rychlost vlaku ovlivněna traťovou rychlostí, což je maximální rychlost, kterou smí být projížděn určitý úsek tratě. Vlak může dále mít maximální povolenou rychlost, kterou vlaku udává například zabezpečovací zařízení. Tato rychlost může být nižší než konstrukční a traťová rychlost. Pro traťovou rychlost se používá označení statický rychlostní profil a pro brzdovou křivku se používá označení dynamický rychlostní profil. Systém ETCS i CBTC skládá a vypočítává na základě nejvíce omezujících rychlostních profilů jednotlivé dynamické rychlostní profily. Systém CBTC stanovuje jízdní rychlostní profil podle následujících parametrů:

- údajů o infrastruktuře,
- parametrů vozidel,
- dynamického rychlostního profilu,
- kritických provozních parametrů, vztahujících se k místům zastavení ve stanicích, na manipulačních kolejích, povolení k vjezdu do stanice, k podmínkám pro odjezd.

Systém CBTC volí nejvíce odpovídající jízdní rychlostní profil na základě požadavku (např. zkracování jízdní doby, úsporná jízda).

4.1.1 Statické rychlostní omezení

Povolená rychlost, kterou může vlak jet, musí být omezena různými druhy statického rychlostního omezení. Statické rychlostní omezení pro ETCS je v SUBSET-026-3 definováno takto:

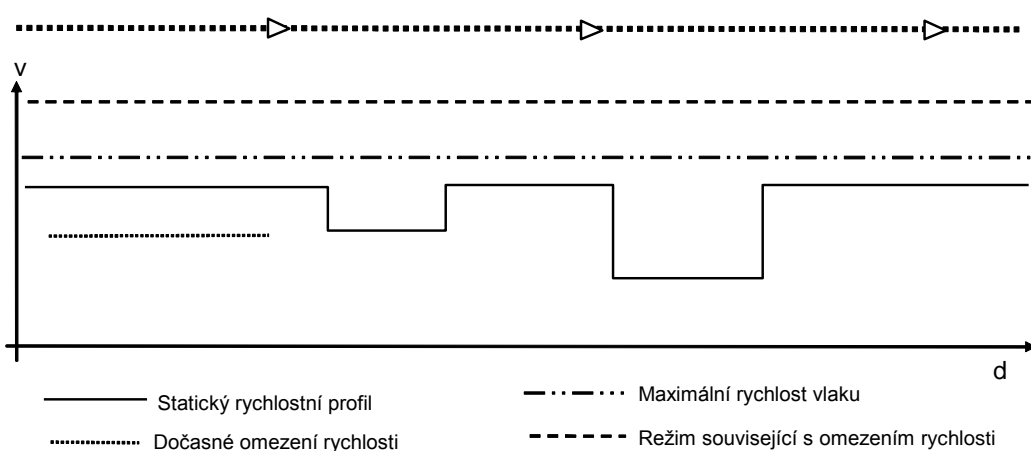
„Statické rychlostní omezení je stanoveno traťovou infrastrukturou, vlastnostmi vlaku, signalizací a režimem palubního zařízení.

Existuje jedenáct kategorií statického rychlostního omezení:

- *statický rychlostní profil (SSP),*
- *rychlostní profil podle zatížení nápravy (ASP),*
- *dočasné omezení rychlosti (TSR),*
- *maximální rychlost vlaku,*
- *omezení rychlosti podle návěstidel (pouze Level 1),*
- *omezení rychlosti podle konkrétního módu,*
- *maximální rychlost STM (podrobnosti viz SUBSET-035),*

- rychlost systému STM (podrobnosti viz SUBSET-035),
- omezení rychlosti na přejezdu (LX SR),
- funkce související s přepsáním rychlostního omezení,
- rychlostní omezení pro zajištění povolené brzdné dráhy (PBD SR).“
(SUBSET-026-3, 2016, s. 211)

Kategorie statického rychlostního omezení jsou na sobě nezávislé. To znamená, že jedna kategorie statického rychlostního omezení nemůže ovlivnit žádnou jinou kategorii.



Obrázek 12: Příklad statických omezení rychlosti na části trati

Zdroj: SUBSET-026-3, v360, str. 73

Statický rychlostní profil (SSP) popisuje pevné rychlostní omezení na daném úseku trati. Omezení rychlosti se může týkat např. maximální rychlosti tratě, výhybky, oblouku, určitého místa, tunelu, nebo mostu. Pro každý vlak může být individuální statický rychlostní profil, ten je pak dán vztahem mezi vlastnostmi tratě a vlaku.

Statický rychlostní profil (SSP) může být rozdělen do dvou kategorií:

- základní statický rychlostní profil (Basic SSP),
- specifický statický rychlostní profil (Specific SSP),
 - statický rychlostní profil při nedostatku převýšení (Cant Deficiency SSP),
 - ostatní specifické statické rychlostní profily (Other specific SSP) – záleží na mezinárodní kategorii vlaků.

Pro každou část trati musí palubní systém ETCS vybrat statický rychlostní profil, který nejlépe vyhovuje jeho kategorii vlaku.

Statické rychlostní omezení pro systém CBTC je v normě ČSN EN 62290-2 definováno takto:

„Funkce určení statického rychlostního profilu určuje statické rychlostní profily, které jsou založeny na parametrech infrastruktury, například na směrové poloze koleje a její přesnosti, na omezeních daných infrastrukturou (tunely, mosty, nástupiště atd.).

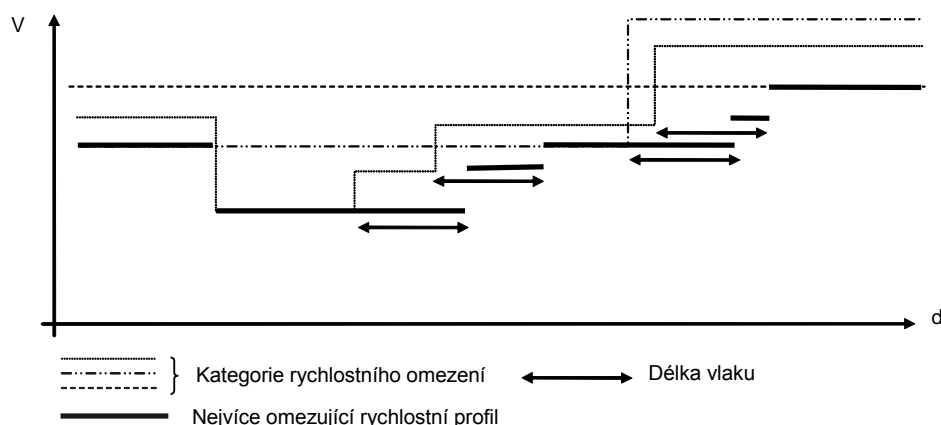
Pro každé místo vodící dráhy musí CBTC určit maximální povolenou rychlost.

Pro různé druhy vlaku a pro různé režimy řízení musí CBTC umožnit určení různých rychlostních profilů.“ (ČSN EN 62290-2, 2015, s. 56)

Z tohoto je patrné, že oba systémy jak ETCS, tak CBTC stanovují statický rychlostní profil na základě shodných informací o trati, vlaku a úrovně (módu) řízení.

Nejvíce omezující rychlostní profil MRSP

Na základě statického rychlostního profilu (SSP) se stanovuje nejvíce omezující rychlostní profil (MRSP). Profil MRSP se stanovuje jak u systému ETCS, tak i u systému CBTC. Popisuje nejpřísnější omezení rychlosti, které musí vlak dodržovat na určitém úseku tratě. Nejvíce omezující rychlostní profil se vypočítá ze všech omezení rychlosti výběrem nejvíce omezujících částí každého úseku. Mezi omezující rychlosti se počítá i dočasné rychlostní omezení (TSR), které může být dáno špatným stavem infrastruktury. Profil MRSP se přepočítá, když se změní některý z prvků, z nichž se skládá.

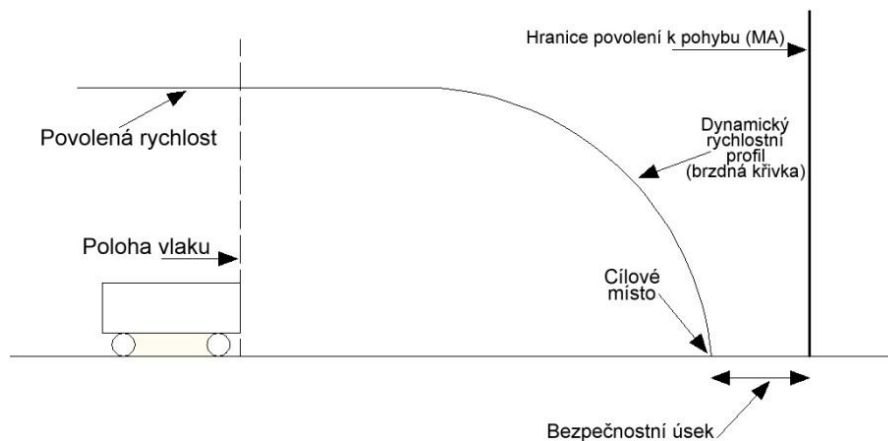


Obrázek 13: Příklad nejvíce omezujícího rychlostního profilu na části trati
Zdroj: SUBSET-026-3, v360, str. 116

4.1.2 Dynamický rychlostní profil (DSP)

Na základě MRSP vypočítává mobilní část vlakového zabezpečovače ETCS i CBTC dynamický rychlostní profil, který mj. zohledňuje dynamiku brzdění vlaku a charakteristiku tratě (gradient profile). DSP lze prezentovat soustavou limitů maximální povolené rychlosti a brzděných křivek viz obrázek 14.

Brzdná křivka znázorňuje závislost rychlosti vlaku na vzdálenosti do místa, kam až vlak může jet (EOA), případně do místa, kde začíná nenulové rychlostní omezení (LOA). Brzdná křivka je závislá na parametrech vlaku i na parametrech infrastruktury. Jinou brzdnou křivku bude mít nákladní vlak a jinou elektrická jednotka. Z brzděné křivky je možné určit zábrzdnou dráhu, tedy vzdálenost, kterou vlak bude potřebovat k zastavení. Brzdná křivka představuje grafické znázornění výpočtu diferenciální rovnice brzdění. Výpočet diferenciální rovnice je základem pro převedení statického rychlostního profilu na dynamický rychlostní profil, čímž vznikne brzdná křivka. Pro stanovení brzděné křivky je potřeba znát závislost brzděné síly na rychlosti a závislost brzděné síly na čase (a tedy z nich vyplývající výsledná hodnota odrychlení). Bezpečné logické jádro musí stanovit brzděné křivky tak, aby nebylo překročeno povolení k jízdě. Tato předpověď poklesu rychlosti v závislosti na vzdálenosti se nazývá brzdná křivka. Z této předpovědi palubní počítač neustále vypočítává v reálném čase potřebnou vzdálenost na zastavení vlaku z aktuální rychlosti.



Obrázek 14: Příklad dynamického rychlostního profilu – brzdné křivky

Zdroj: autor

Dynamické rychlostní omezení pro systém CBTC je v normě ČSN EN 62290-2 definováno takto:

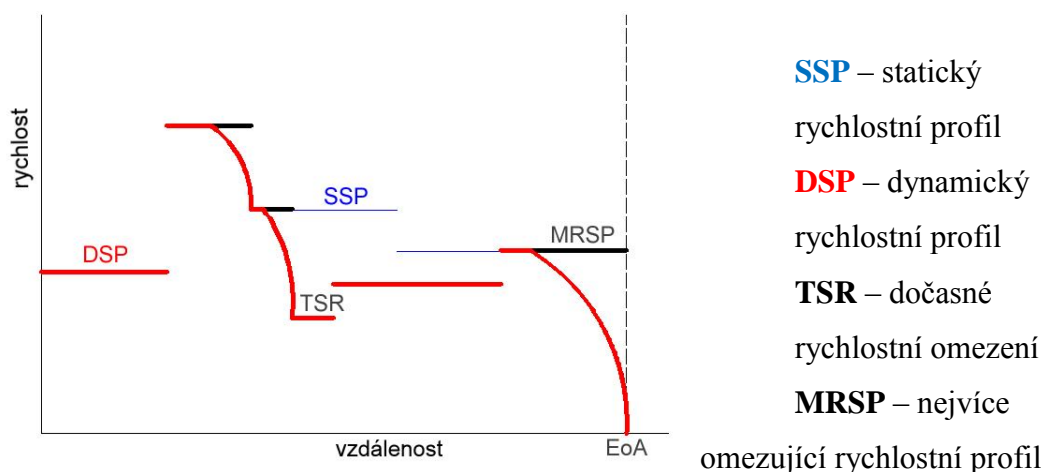
„Funkce dynamického rychlostního profilu určuje všem vlakům dynamický rychlostní profil, který zajistí, že nebudou nikde překročeny hranice povolení k jízdě a povolená rychlost.“

Dynamický rychlostní profil končí v cílovém místě. Pro určení dynamického rychlostního profilu musí být použit příslušný bezpečný model brzdění.

Bezpečný model brzdění je analytickým vyjádřením schopnosti vlaku zpomalovat až do úplného zastavení, který bere v úvahu kombinaci nejnejpříznivějších vlivů a poruchových scénářů. Brzdná dráha vlaku se CBTC je rovna nebo kratší než brzdná dráha zaručená bezpečným modelem brzdění.

CBCT musí při zohlednění statických rychlostních profilů, parametrů vlaku a infrastruktury (např. sklonu trati, délky traťových oddílů, umístění výhybek) pro každý vlak řízený CBTC určit dynamický rychlostní profil a hranici povolení k jízdě.“ (ČSN EN 62290-2, 2015, s. 56)

První a druhý odstavec definice je graficky znázorněn v obrázku číslo 14 - Příklad dynamického rychlostního profilu – brzdné křivky. Třetí odstavec je znázorněn v obrázku číslo 15 - Příklad rychlostních profilů, který znázorňuje určení dynamického rychlostního profilu na základě statických rychlostních profilů a omezujících rychlostních profilů.



Obrázek 15: Příklad rychlostních profilů

Zdroj: autor na základě interních materiálů firmy AŽD

Na obrázku 15 je znázorněno, jak se skládají a stanovují jednotlivé rychlostní profily. Základem je statický rychlostní profil SSP, z kterého je následně stanovován nejvíce omezující rychlostní profil MRSP. Profil MRSP zohledňuje i dočasné omezení rychlosti TSR. Ze všech těchto rychlostních profilů je následně určen dynamický rychlostní profil DSP, podle kterého se následně vlak pohybuje.

4.2 Brzdny model IEEE

System CBTC pracuje s tzv. modelem bezpečného brzdění, což je metoda, která slouží k bezpečnému zastavení vlaku před nebezpečným místem (koncem povolení k jízdě). Model bezpečného brzdění musí být vyvinut pro každou aplikaci CBTC.

Přesně tento model definuje norma IEEE 1474-1, kde je napsáno:

„safe braking model: (model bezpečného brzdění) Analytické vyjádření vlakového výkonu při snižování rychlosti až do úplného zastavení, připouštějící kombinaci vlivů faktorů nejhorsího případu a scénáře závady. Zařízení vlaku CBTC zastaví ve vzdálenosti stejné nebo menší, než je zaručeno brzdým modelem pro bezpečnost.“ (IEEE 1474-1, 2004, s. 56)

Volně je možné tuto definici interpretovat tak, že bezpečný brzdny model je vypočtená vzdálenost k bezpečnému zastavení vlaku, i v případě selhání a zabránění kolize s předchozím vlakem.

4.2.1 Vstupní parametry

Aby bylo možné vytvořit bezpečný model brzdění, je potřeba znát tzv. vstupní parametry. V normě IEEE 1474-1 jsou vstupní parametry zmíněny takto:

„Model bezpečného brzdění musí jako minimum zahrnovat následující:

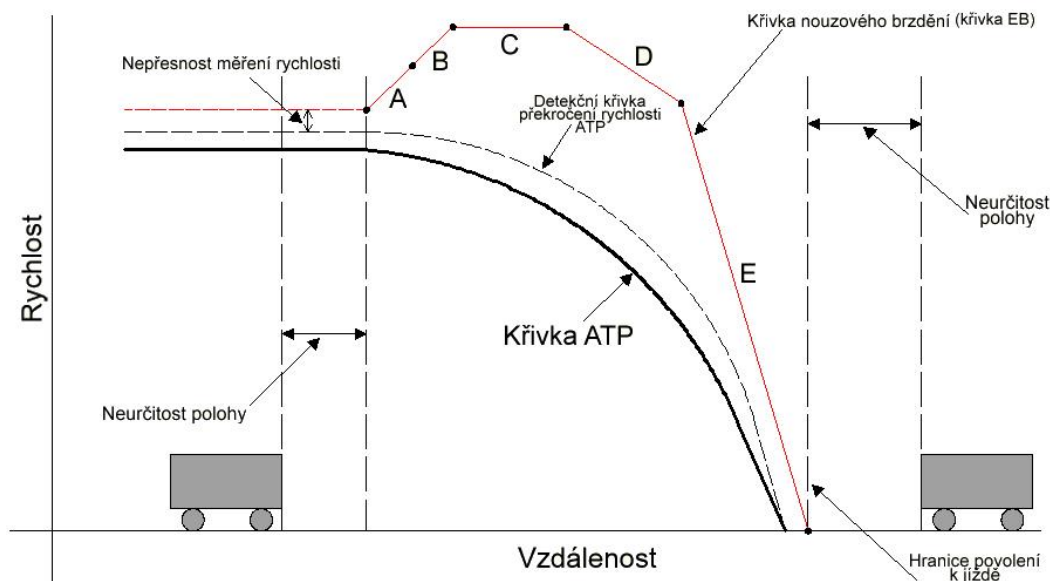
- a) Nejistou polohu předchozího vlaku (včetně tolerance zpětného pohybu)*
- b) Nejistou polohu následujícího vlaku*
- c) Délku vlaku*
- d) Konfiguraci vlaku*
- e) Přípustné překročení rychlosti povolené systémem CBTC*
- f) Maximální odchylku (chybu) měření rychlosti CBTC*
- g) Časy reakce systému CBTC a jeho zpoždění*
- h) Maximální možný poměr zrychlení vlaku, za podmínek detekování překročení rychlosti, systémem CBTC*
- i) Nejhorší případ časů reakce, který vyřadí pohonný systém a aplikuje nouzové brzdy následně po detekci překročení rychlosti systémem CBTC*
- j) Zaručený poměr nouzového brzdění GEBR*
- k) Sklon (trati)“* (IEEE 1474-1, 2004, s. 56)

Pro výpočet brzdných křivek jsou důležité tyto vstupní parametry:

- délka soupravy,
- maximální dovolená rychlost soupravy,
- hodnota odrychlení soupravy,
- doba zastavování pohonu,
- doba prodlevy brzd,
- doba závady při zrychlování,
- procento překročení rychlosti,
- rychlost překročení dle IEEE.

Výše uvedené vstupní parametry jsou použity pro výpočet brzdných křivek. Model vypočítává 3 brzdné křivky. Jedná se o křivku ATP, detekční křivku překročení rychlosti ATP a křivku nouzového brzdění EB.

Norma IEEE 1474-1 v dodatku D graficky znázorňuje model bezpečného brzdění.



Obrázek 16: Model bezpečného brzdění
Zdroj: autor na základě IEEE 1474-1 dodatek D.

4.2.2 Křivka ATP (Dynamický rychlostní profil ATP)

Hlavní křivkou bezpečného brzdného modelu je křivka ATP. Tato křivka určuje maximální rychlost, kterou se může vlak pohybovat. Je generována systémem ATP, který ji sestavuje na základě informací o trati a aktuálních informací o vlaku. Systém ATO-OB se prostřednictvím řídicího systému vlaku snaží, aby křivku ATP v žádném případě nepřekročil.

4.2.3 Detekční křivka překročení rychlosti ATP

Aktuální rychlost vlaku by se měla neustále držet křivky ATP a neměla by se dostat nad ní. Pokud přesto dojde k jejímu překročení, existuje zde tzv. detekční křivka překročení rychlosti ATP. Pokud dojde k jejímu překročení, uvede se do činnosti nouzová brzda. Kdyby k zásahu nedošlo, tak by vlak pokračoval v jízdě nebezpečnou (nedovolenou) rychlostí, která může mít za následek vznik nebezpečné situace. Detekční křivka překročení rychlosti ATP je vypočítána tak, že zohledňuje nepřesnost měření rychlosti (počítá se s tolerancí cca 3-5 km/h nad křivkou ATP).

4.2.4 Křivka nouzového brzdění (křivka EB)

Nejrychlejší způsob zastavení vlaku je pomocí křivky nouzového brzdění, zároveň je to nejhorší případ, který může nastat. Křivka nouzového brzdění počítá i s poruchou, kdy by i při požadavku na brzdění souprava dále zrychlovala. Křivka nouzového brzdění musí být vždy menší, nebo rovna křivce ATP. Počáteční bod křivky nouzového brzdění je kousek nad bodem, kde rychlost vlaku překročila detekční křivku překročení rychlosti ATP. Toto posunutí bodu zahrnuje nepřesnosti, které mohou vzniknout v rychloměru, nebo ve snímačích rychlosti. Například, když jede vlak 55 km/h, tak výchozí bod křivky nouzového brzdění je na hodnotě 57 km/h v momentě, kdy dojde k překročení rychlosti. Následně je křivka nouzového brzdění rozdělena do pěti částí.

Část A – Čas odezvy řídicího systému ATP – v této části je zahrnuto zpoždění (vytvořeno zpožděnou reakcí hardwaru a softwaru) předtím, než řídicí jednotka zjistí překročení rychlosti a vydá povel k brzdění. V této části model předpokládá s rychlým zrychlováním vlaku. To vychází z předpokladu, že k překročení rychlosti došlo v důsledku poruchy pohonu (akcelerace).

Část B – Čas pro vypnutí pohonu po vydání povelu k nouzovému brzdění – je čas na vypnutí pohonu, tedy na přerušení vývinu tažné síly. Vypnutí pohonu zajistí řídicí jednotka vlaku poté, co zadá příkaz k nouzovému brzdění. Je tedy zabráněno situaci, kdy by vlak vyvíjel tažnou sílu (zrychloval) a zároveň by byla zavedena nouzová brzda.

Část C – Čas výběhu – během tohoto času jede vlak výběhem, při dosažení maximální rychlosti po odpojení pohonu. Zároveň je to doba, než začne účinkovat nouzové brzdění. I když byla nouzová brzda aktivována v části B, jak již v předchozích kapitolách zaznělo, existuje určité zpoždění náběhu brzděného účinku, které je právě zahrnuto do tohoto času výběhu.

Část D – Čas zvyšování účinku nouzové brzdy – brzdy jsou již aktivovány, ale ještě není dosaženo plného brzdného účinku. Intenzita nouzového brzdění bude v tomto čase narůstat z 0 % až k nejméně GEBR, tedy do plného náběhu nouzové brzdy. Vlak zpomaluje, ale ne v požadovaném GEBR.

Část E – Plné nouzové brzdění při zajištění GEBR – v této poslední části dosáhla nouzová brzda plného účinku a vlak pokračuje ve snižování rychlosti až do úplného zastavení zaručeným poměrem GEBR. Zaručený poměr nouzového brzdění (GEBR) nepředstavuje maximální brzdnou schopnost nouzové brzdy, ale je to poměr, kdy je zajištěna schopnost nouzové brzdy i v případě poruchy, například z osmi vozů jeden nebrzdí.

4.2.5 Neurčitost polohy

Při aplikaci nouzové brzdy se vlak zastaví v místě, kde končí část E. Tedy v tak bezpečném místě, aby nebyla ohrožena bezpečnost a dva po sobě jedoucí vlaky se nepřiblížily na nebezpečnou vzdálenost, případně aby nedošlo například k projetí výhybky. Hlášení o poloze vlaku nemůže být uvedeno přesně, neboť z důvodu nepřesnosti (odchylky) rychloměru, různého opotřebení kol, různého umístění radiových majáků vzniká vzdálenostní odchylka, která musí být započtena v neurčitosti polohy (pojistný úsek). Nejistota polohy je spojena jak s čelem, tak i s koncem vlaku. V modelu bezpečného brzdění je tato nejistota zřejmá na křivce nouzového brzdění, kdy část A začíná v jiné vzdálenosti, než se nachází čelo jedoucího vlaku. Do této rozdílové vzdálenosti jsou započteny výše uvedené faktory nepřesnosti měření.

4.3 Brzdný model ERA

Mobilní část systému ETCS dohlíží na aktuální polohu a rychlost vlaku tak, aby bylo zajištěno, že se bude pohybovat v rámci povolených rychlostních a vzdálenostních limitů. Pokud by došlo k překročení těchto limitů, zasáhne ETCS do brzdového systému a zabrání dalšímu překračování limitů. Systém ETCS je výlučně zodpovědný za včasnou aplikaci nouzové brzdy a zajištění bezpečnosti železničního provozu. Palubní počítač ETCS musí předvídat budoucí změnu rychlosti vlaku a tu určí z matematického modelu dynamiky brzdění vlaku a z charakteristiky tratě. Výsledek tohoto matematického modelu je brzdná křivka nouzového brzdění a další dohledové křivky, které se dopočítávají. V systému ETCS jsou brzdné křivky určovány pomocí brzdného modelu, který je počítán podle metodiky Evropské železniční agentury ERA, odtud název brzdný model ERA. Tento brzdný model je podrobně popsán v dokumentu ERA ERTMS 040026 (Introduction to ETCS braking curves) a v dokumentu ERA GUI 05 (ERA BRAKING CURVES TOOL HANDBOOK). Tyto dokumenty společně s programem na výpočet brzdných křivek ve formátu „xlsx“ jsou volně dostupné na stránkách Evropské železniční agentury (ERA).

4.3.1 Vstupní parametry

Pro výpočet a stanovování brzdných křivek potřebuje mít systém ETCS množství vstupních parametrů, které se dají rozdělit do čtyř kategorií.

- 1. kategorie – informace o aktuální poloze, o rychlosti a o zrychlení,
- 2. kategorie – pevné hodnoty, které jsou neměnné (např. reakční doba strojvedoucího),
- 3. kategorie - hodnoty o cílové poloze, parametry infrastruktury (sklon trati) a národní hodnoty ETCS (ty jsou dány provozovatelem infrastruktury),
- 4. kategorie - palubní parametry (vlaková data ETCS), týkají se především samotného brzdového systému kolejových vozidel.

Jako vstupní údaje se do systému ETCS vkládají tyto konkrétní parametry:

- typ brzdné modelu lambda/gamma. Záleží, zda je jako vstupní údaj zadáno pouze brzdné procento (metoda lambda), nebo je zadáno zpomalení v závislosti na rychlosti (metoda gama),
- parametry o trakci a o brzdě vlaku ETCS,
- délka vlaku,
- nepřesnost měření rychlosti,
- nepřesnost měření vzdálenosti,
- zrychlení vlaku.

Kromě toho lze zadat ještě národní hodnoty, které jsou dány potřebou jednotlivých provozovatelů infrastruktury. Tyto hodnoty mohou být například:

- v případě použití gama modelu se udává Hmotnostní faktor pro dostupnou adhezi ($M_{NVAVADH}$),
- v případě lambda modelu jsou použity Integrované korekční faktory,
- tři maximální hodnoty zpomalení za snížených podmínek adheze ($A_{MAXREDADH1, 2, 3}$),
- povolení pro palubní systém, aby mohl používat provozní brzdu při sledování cílové rychlosti ($Q_{NVSBTSMPerm}$),
- povolení používat naváděcí křivku GUI ($Q_{NVGUIPerm}$),
- povolení pro palubní systém, aby zabránil kompenzaci nepřesnosti měření rychlosti ($Q_{NVINHSMICPerm}$).

Výsledná křivka EBD musí splňovat potřebnou bezpečnost, která je potřebná pro provoz vlaků na dané infrastruktuře. Toto je v brzděném modelu zohledněno tzv. Korekčními faktory. Ty se týkají především samotných kolejových vozidel a závisí na:

- rozptylu výkonu jednotlivých brzdových prvků,
- spolehlivosti jednotlivých částí brzdového systému,
- konstrukci brzdového systému,
- účinnosti brzdového systému na mokré kolejnici.

Je poměrně snadné stanovit brzděný model pro suché kolejnici. Nicméně stanovit tento model v případě mokrých kolejníc je podstatně náročnější a z toho důvodu jsou vytvořeny dva odlišné korekční faktory, aby bylo zajištěno zaručené zpomalení nouzové brzdy. Tyto dva korekční faktory se jmenují K_{dry_rst} a K_{wet_rst} . V této práci se s možností mokré koleje neuvažuje, neboť v systému dráhy speciální, která je vedena pod zemí, panují téměř konstantní adhezní podmínky.

Schéma 5 zobrazuje, jak postupuje brzděný model ERA při výpočtu brzděné křivky.

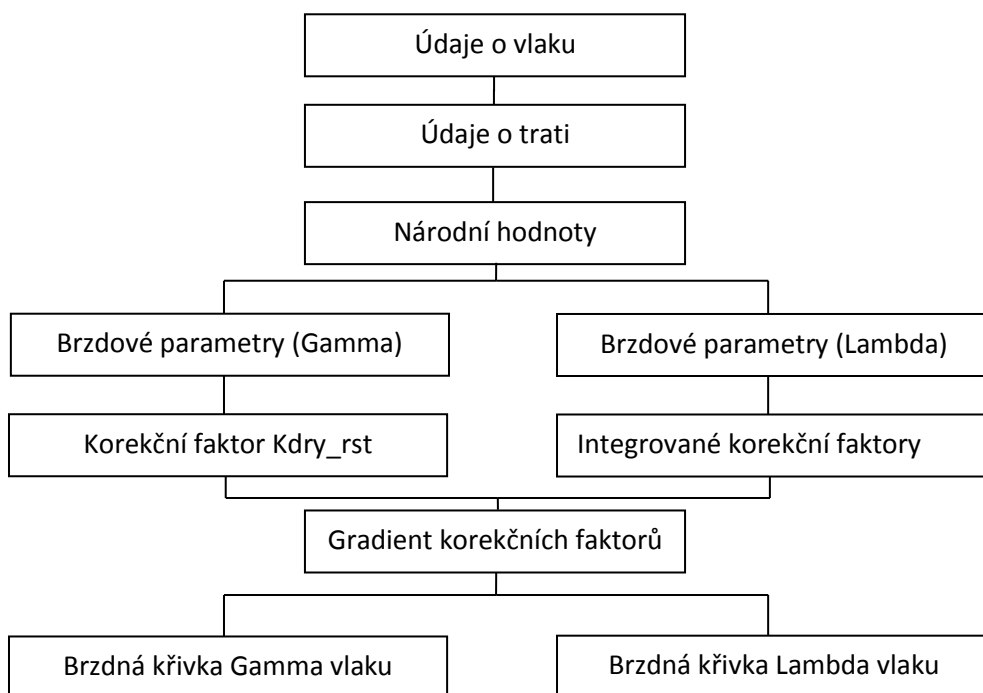
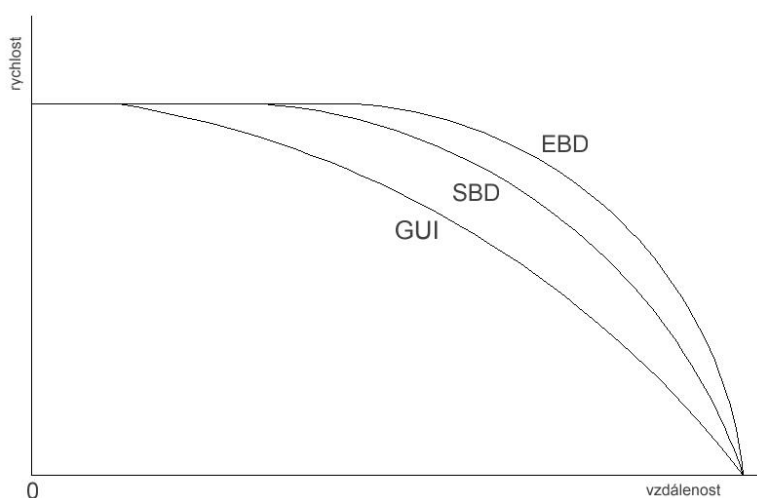


Schéma 5: Uspořádání brzdného modelu ERA z pohledu uživatele

Zdroj: ERA GUI 05 (ERA BRAKING CURVES TOOL HANDBOOK)

Všechny výše uvedené parametry, korekční faktory a jejich nastavení, je popsáno v ERA BREKING CURVES TOOL HANDBOOK, který je příručkou pro správnou práci s brzdným model ERA.

Výše uvedené vstupní parametry jsou použity pro výpočet brzdných křivek. Model vypočítává tři brzdné křivky a příslušné limity dohledu. Jedná se o křivku nouzového brzdění (EBD), křivku provozního brzdění (SBD) a naváděcí křivku (GUI).



Obrázek 17: Brzdné křivky modelu ERA

Zdroj: autor

4.3.2 Křivka nouzového brzdění (EBD)

Křivka nouzového brzdění závisí na vlastnostech vlaku (brzdící procenta) a charakteristice trati. Představuje průběh zpomalení při aplikaci nouzového brzdění. Palubní počítač ETCS několikrát za sekundu vypočítá vzdálenost potřebnou k zastavení od okamžiku, kdy by palubní počítač mohl aktivovat nouzovou brzdu.

4.3.3 Křivka provozního brzdění (SBD)

Křivka provozního brzdění znázorňuje průběh zpomalení při aplikaci provozního brzdění. Pokud je cílem jízdy hranice povolení k jízdě (EoA), musí palubní počítač ETCS vypočítat na základě očekávaného zpomalení křivku provozního brzdění tak, aby v místě EoA dosáhl vlak nulové rychlosti.

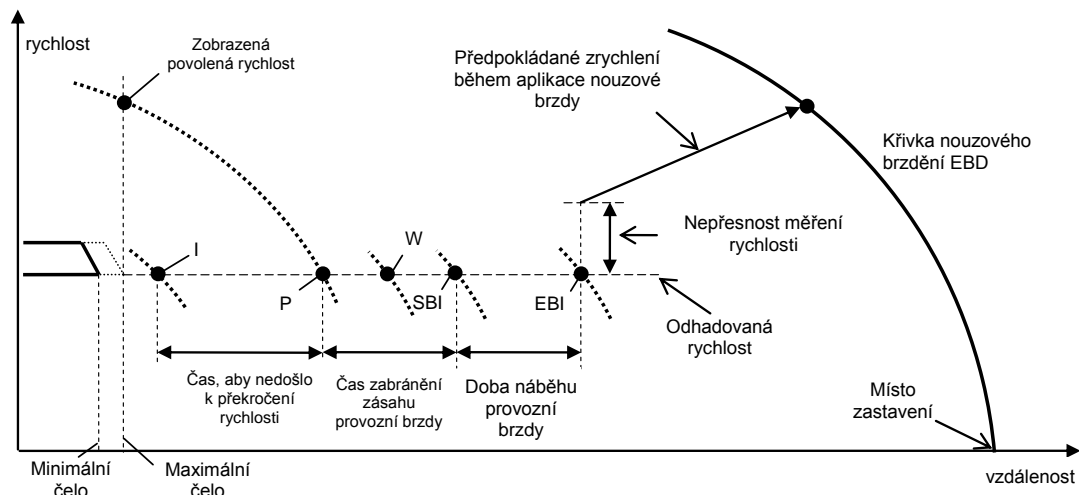
4.3.4 Naváděcí křivka (GUI)

Naváděcí křivka znázorňuje strojvedoucímu průběh plynulého brzdění tak, aby se zabránilo nadměrnému opotřebení brzd a zároveň se ušetřila trakční energie. Palubní počítač ETCS vypočítává naváděcí křivku pro určený cíl na základě normálního provozního brzdění. Určený cíl může být hranice povolení k jízdě (EoA), nebo konkrétní místo na trati (zastávka). Tato křivka má nejdelší brzdnou dráhu ze všech tří křivek.

4.3.5 Dohledové křivky

Účel limitu dohledu je informovat zejména strojvedoucího a zabránit zásahu nouzové brzdy. Strojvedoucí má tak z jednotlivých limitů přesnou informaci o aktuální poloze vůči křivce nouzového brzdění (EBD). Ví tedy, jak uzpůsobit jízdu/brzdění vlaku, aby nedošlo k zásahu nouzové brzdy. Palubní část ETCS neustále vypočítává v reálném čase limity dohledu. Limitů dohledu je definovaných celkem šest:

- zásah nouzové brzdy (EBI),
- zásah provozní brzdy (SBI),
- varování (W),
- povolená rychlost (P),
- indikace (I),
- počáteční místo monitorování rychlosti.



Obrázek 18: Křivka EBD a limity dohledu.

Zdroj: ERA ERTMS 040026 (Introduction to ETCS braking curves)

V místě, kde aktuální rychlost vlaku protne dohledovou křivku **EBI** dojde k zásahu nouzové brzdy. Je to bod, za kterým přebírá systém ETCS funkci strojvedoucího a aplikuje nouzovou brzdu. Křivka EBD a limit dohledu EBI jsou prvky funkce systému ETCS, které monitorují rychlost a vzdálenost, což při překročení způsobuje aplikaci nouzové brzdy.

V místě, kde aktuální rychlost vlaku protne dohledovou křivku **SBI** dojde k zásahu provozní brzdy. Je to bod, kde je aplikována provozní brzda a zohledňuje dobu nárůstu účinku provozní brzdy, tím zabraňuje, aby bylo dosaženo limitu dohledu EBI. Rychlost je stále regulována provozní brzdou. Dále zabraňuje příliš častému aktivování nouzové brzdy, což by mohlo vést k negativnímu vlivu na plynulost dopravy, případně poškození vozidla nebo tratě.

V místě, kde aktuální rychlost vlaku protne dohledovou křivku **W**, dojde k varování strojvedoucího. Strojvedoucího akusticky upozorní, že došlo k překročení varovného bodu W.

Povolená rychlost (P) je bod, kdy po překročení rychlosti má strojvedoucí dodatečný čas na aktivaci provozní brzdy tak, aby nepřekročil bod EBI, za kterým by systém ETCS zasáhl do brzdění aplikováním nouzové brzdy.

Indikace (I) je bod, po jehož překročení má strojvedoucí čas na aplikaci provozní brzdy tak, aby nepřekročil povolenou rychlost. Umožňuje strojvedoucímu dosáhnout povolené rychlosti bez nutnosti překročení této hranice.

U systému ETCS má strojvedoucí všechny potřebné informace zobrazeny na displeji, ten vyzívá strojvedoucího k udržování rychlosti vlaku co nejbližší povolené rychlosti. Ovšem pokud by strojvedoucí překročil povolenou rychlost, dává mu systém ETCS časový prostor na snížení rychlosti, než přebere odpovědnost za brzdění. Překročení povolené rychlosti se projeví viditelným a akustickým signálem a dodatečným časem na aplikování provozní brzdy.

5. SIMULACE BRZDNÝCH KŘIVEK

Pro simulaci brzdných křivek byla zvolena referenční souprava typu M1, kterou provozuje DPP. Jedná se o pěti vozovou soupravu metra, která byla vyrobena konsorciem ČKD Dopravní systémy, ADtranz a Siemens mezi lety 2000 až 2005. V současné době se jedná o nejmodernější provozovanou soupravu metra v České republice.

Tato souprava byla vybrána, jelikož se technicky a parametrově blíží dnešním moderním soupravám metra. Účelem této práce nebylo porovnání dvou souprav, ale srovnat brzdné modely a stanovit ideální brzdný model. Z toho důvodu byla zvolena tato referenční souprava. Je zřejmé, že soupravy od různých výrobců se budou lišit svou trakční charakteristikou a ta ovlivní výsledné brzdné dráhy. Nicméně rozdíly mezi moderními soupravami jsou minimální.



Obrázek 19: Souprava metra M1

Zdroj: <https://www.metroweb.cz/metro/M1/P000001.JPG>

Tabulka 4: Základní parametry soupravy M1

Počet vozů:	5
Trakční výkon:	20 x 141,5 kW
Hmotnost prázdné soupravy:	133 t
Délka soupravy:	96,6 m
Jmenovité trakční napětí:	750 V
Maximální obsaditelnost:	8 os/m ²
Nejvyšší dovolený sklon kolejí:	40 ‰
Maximální provozní rychlost:	80 km/h

Zdroj: <https://www.metroweb.cz/metro/M1/M1.htm>

Statické charakteristiky trakce/brzda soupravy M1 se nacházejí v příloze A.

K simulaci brzdných křivek ETCS byl použit oficiální nástroj „ERA Braking Curves Simulation Tool“ ve verzi 4.2 („xlsx“ soubor), který je veřejně dostupný na webových stránkách ERA. Výpočty jsou v souladu m.j. se SUBSETem-026 ve verzi 3.6.0.

K simulaci brzdných křivek CBTC byl použit interní program firmy AŽD, jehož výpočty jsou založeny na brzděném modelu IEEE popsáném v normě IEEE 1474.1.

5.1 Nastavení brzdných modelů

Nastavení jednotlivých brzdných modelů je základním předpokladem k získání věrohodných dat. Důležitým krokem pro simulaci je podrobné seznámení s jednotlivými brzdnými modely.

Jako vstupní parametry do brzdných modelů je potřeba znát:

- délku soupravy,
- maximální hodnotu odrychlení,
- hodnotu sklonu tratě.

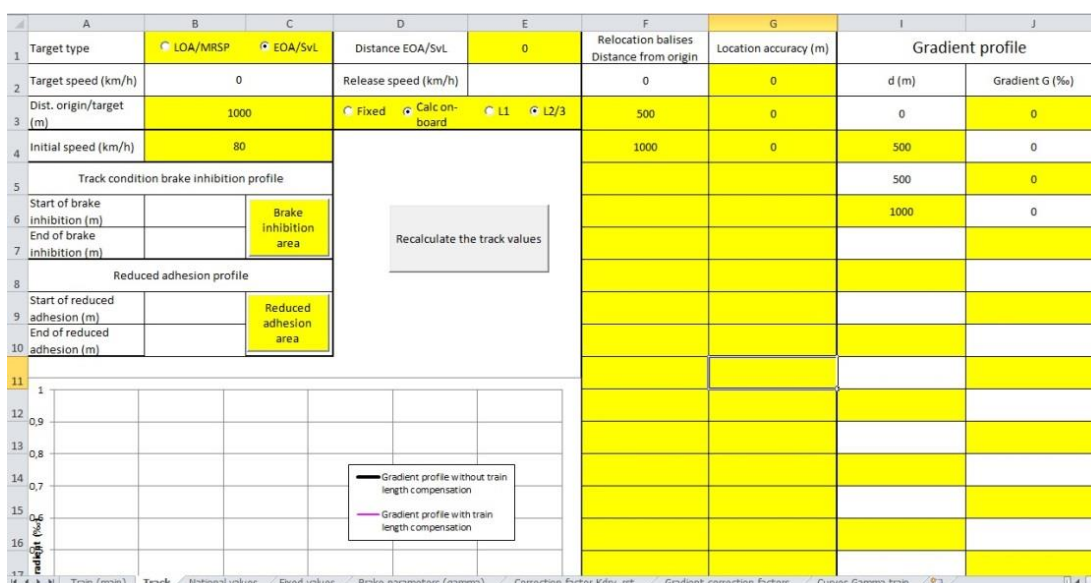
5.1.1 Nastavení brzdného modelu ERA

Brzdný model ERA obsahuje velké množství nastavitelných vstupních parametrů. Pro simulaci je potřeba znát hodnotu odrychlení, délku soupravy, hodnotu sklonu tratě, délku sklonu tratě a rozmístění balíz v kolejišti. Další parametry se nastavují přímo v programu a velké množství parametrů je pevně daných, neměnných. Je třeba správně nastavit parametry vlaku (typ vlaku, délka vlaku), parametry trati (délka úseku, sklon, maximální rychlost), národní hodnoty, parametry brzd a další. Na obrázku 22 je zobrazeno nastavení brzdných parametrů nouzové brzdy. Pro nastavení reálného průběhu nouzového brzdění byly využity tzv. garantované parametry soupravy M1. Následující obrázky ukazují nastavitelné rozhraní programu ERA.

Train type	<input checked="" type="radio"/> Gamma train <input type="radio"/> Lambda train	
Brake position	<input checked="" type="radio"/> Passenger train in P <input type="radio"/> Freight train in P <input type="radio"/> Freight train in G	
Traction model: T_traction_cut_off (seconds)	0,5	
Service brake interface ?	<input type="radio"/> No <input checked="" type="radio"/> Yes	
Traction cut off interface ?	<input type="radio"/> No <input checked="" type="radio"/> Yes	
Special/additional brake independent from wheel/track adhesion?	<input checked="" type="radio"/> No <input type="radio"/> Yes	
Speed inaccuracy (%)	<input type="radio"/> Fixed (Enter) <input checked="" type="radio"/> Subset-041	
Position inaccuracy (m + %)	5 5	<input type="radio"/> Abs. value + <input checked="" type="radio"/> Rel. value <input type="radio"/> Subset-041
Train length (m)	97	
Nominal rotating mass (%)	<input type="radio"/> Fixed (Enter) <input checked="" type="radio"/> Unknown	
Distance antenna - train front (m)	2	
Acceleration (m/s ²)	0	

Obrázek 20: Nastavení parametrů vlaku – model ERA – ilustrační případ
Zdroj: ERA Braking Curves Simulation Tool

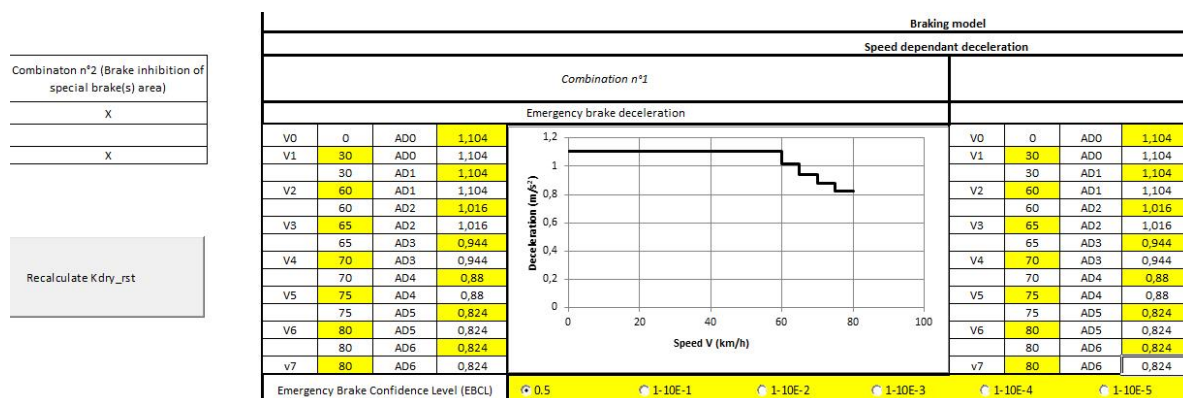
Při nastavování parametrů vlaku lze zvolit typ vlaku (Train type), buďto gamma, nebo lambda vlak (viz kap. 4). Dále je možné nastavit režim brzdění (Brake position), čas potřebný k zastavení trakčního pohonu (T_traction_cut_off), rozhraní provozní brzdy (Service brake interface), rozhraní vypnutí pohonu (Traction cut off interface), délku vlaku a zrychlení. Parametry jako rychlostní nepřesnost (Speed inaccuracy) a polohovou nepřesnost (Position inaccuracy), lze zadat buďto ručně, nebo nechat hodnotu danou Subset-041. Podobně to je i s rotujícími hmotami (Nominal rotating mass), ty lze zadat ručně a pokud tak není učiněno, model použije pevnou hodnotu M_rotating_max pro stoupání, nebo M_rotating_min pro klesání. To, která hodnota se použije, závisí na zvoleném sklonu tratě.



Obrázek 21: Nastavení parametrů tratě – model ERA – ilustrační případ
Zdroj: ERA Braking Curves Simulation Tool

Dalším krokem je nastavení parametrů tratě. Jako první se volí typ cíle (Target type) a to buď LOA/MRSP, nebo EOA/SvL. Pokud je zvoleno LOA/MRSP je potřeba zadat cílovou rychlost (Target speed) a počáteční rychlost (Initial speed). Jestliže je zvoleno EOA/SvL, tak je cílová rychlost (Target speed) automaticky nastavena na nulu a je potřeba zadat vzdálenost mezi EOA a SvL a uvolňovací rychlost (Release speed). Uvolňovací rychlost je možno zadat ručně (fixed), nebo vypočteno palubní částí systému ETCS (calculated on-board). Pokud je zvolen výpočet pomocí palubní části, je potřeba zvolit úroveň řízení (L1, L2/3). Též je možné zadat parametry ovlivňující adhezi (Reduced adhesion profile) a inhibici brzd (Track condition brake inhibition profile). Dále je možné zadat vzdálenost balíz (Relocation balises) a jejich přesnost umístění (Location accuracy). Podstatnou nastavitelnou položkou v traťové části je nastavení sklonu tratě (Gradient profile).

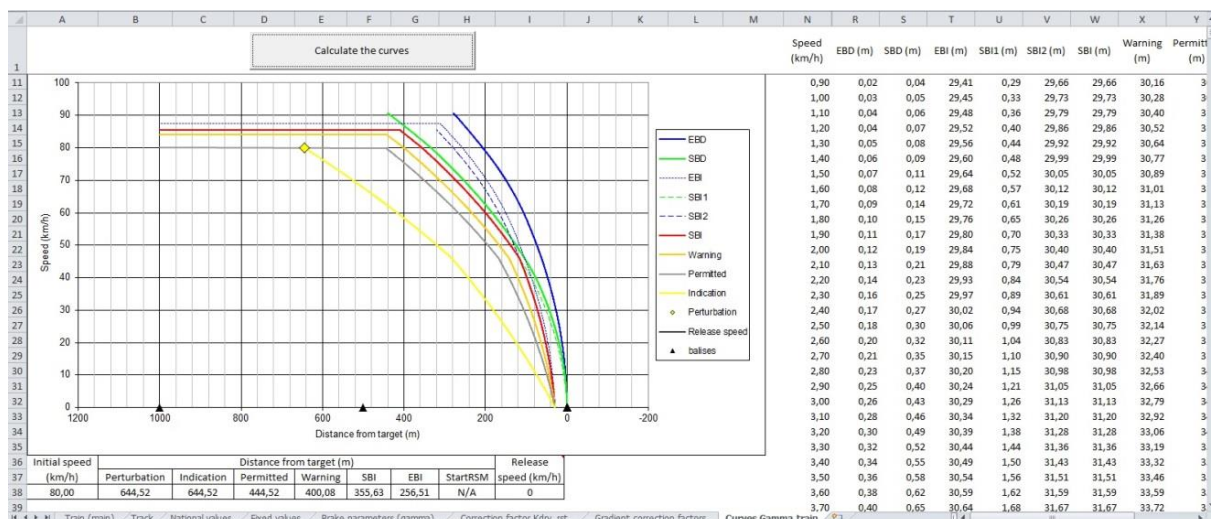
V záložce národních hodnot jsou téměř všechny parametry pevně dané. Nastavuje se pouze hodnota odrychlení při zhoršené adhezi, povolení k použití naváděcí křivky a povolení k použití provozního brzdění při sledování cílové rychlosti.



Obrázek 22: Nastavení brzdových parametrů nouzové brzdy – model ERA – ilustrační případ
Zdroj: ERA Braking Curves Simulation Tool

Nastavení brzdových parametrů nouzové brzdy se provádí podle hodnot odrychlení dané soupravy metra (pro účely této práce viz parametry soupravy M1).

Po nastavení všech parametrů je možné vygenerovat výsledné brzděné křivky, což je znázorněno na obrázku 23.



Obrázek 23: Výsledné brzděné křivky – model ERA – ilustrační případ

Zdroj: ERA Braking Curves Simulation Tool

Brzdňý model vygeneruje všechny dohledové křivky a křivku nouzového brzdění EBD. Model počítá i s vyšší počáteční rychlostí, než je rychlost povolená. V tomto případě je maximální povolená rychlost 80 km/h, ale model počítá s počáteční rychlostí až 90,7 km/h (pro křivky EBD a SBD). Je to dáno jednak nepřesností měření a také časem potřebným k zastavení trakčního pohonu v případě překročení rychlosti při zrychlování. Navíc systém ETCS uvažuje pouze s tím, že vlak brzdí, nebo nebrzdí. Není zde počítáno s časovou změnou odrychlí, jako je tomu u modelu IEEE.

Výsledkem brzdňého modelu ERA je několik brzdňých křivek, které jsou podrobněji popsány v kapitole 4.3. Nejdůležitější je ovšem křivka EBI, která určuje moment zásahu nouzové brzdy. Pokud se pohybujeme pod křivkou EBI, využívá se pouze provozního brzdění. Po překročení této křivky již dojde k aplikaci nouzové brzdy. Průběh této křivky je důležitý pro následné porovnání obou brzdňých modelů.

Průběh křivek vypočítaných brzdňým modelem ERA je počítán pro zastavení v konkrétním místě, takže znázorňuje, jakou vzdálenost dopředu je potřeba začít brzdít, aby vlak bezpečně zastavil na požadovaném místě. Z toho se zpětně dá stanovit výsledná brzdňá dráha z určité rychlosti.

5.1.2 Nastavení brzdňého modelu IEEE

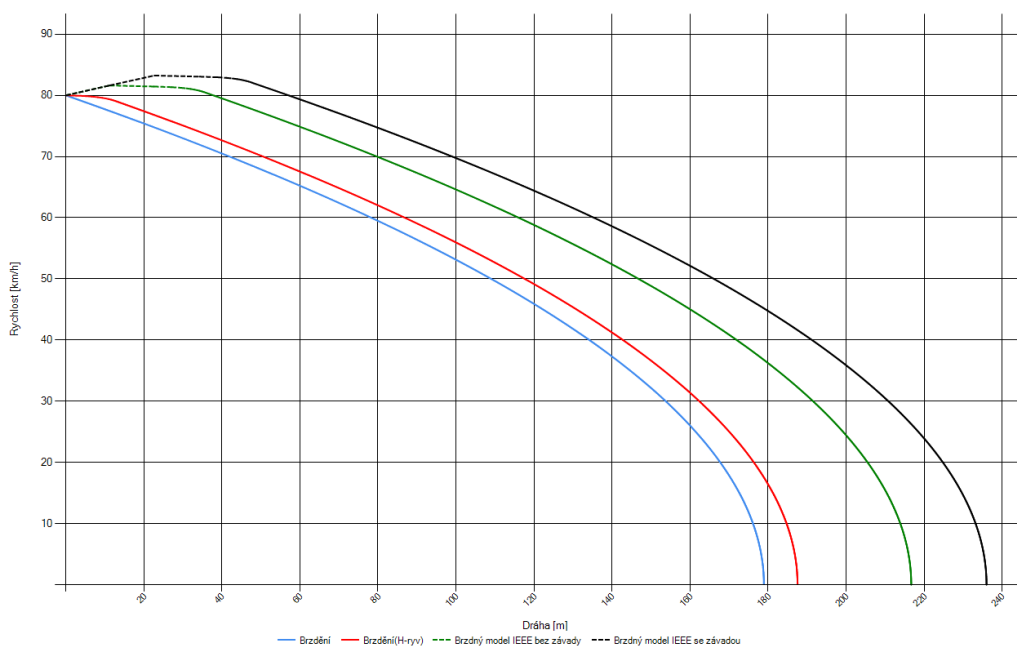
Firma AŽD Praha s.r.o. disponuje programem pro výpočet brzdňých křivek podle brzdňého modelu IEEE. Tento brzdňý model je v porovnání s brzdňým modelem ERA podstatně jednodušší, neboť je primárně určen pro dráhu speciální, kde není potřeba znát tolik vstupních parametrů jako u ERA modelu.

Ze vstupních parametrů je nutné pro stanovení brzdných křivek znát hodnotu odrychlení, počáteční rychlost soupravy, dobu zastavování pohonu a dobu prodlevy brzd.

Koncová rychlost	Počáteční rychlost
0,0 Km/h	80,0 Km/h
Odrychlení	Provozní brzdění 1
	Provozní brzdění 2
Nouzové brzdění 1	Nouzové brzdění 2
	Nouzové 3
Volba parametrů	
Odrychlení [m/s ²]	1,38
Procento překročení rychlosti	0
Volba parametrů IEEE	
Rychlost překročení dle IEEE [km/h]	0,0
Nová výchozí rychlost [km/h]	
Zrychlení (max) [m/s ²]	0,90
Odrychlení (výběh) [m/s ²]	0,10
Doba závady (při zrychlování) [s]	0,5
Doba zastavování pohonu [s]	0,5
Doba prodlevy brzd (příprava) [s]	0,5
Doba náběhu brzdy (ryv) [s]	1,5

Obrázek 24: Nastavení vstupních parametrů modelu – model IEEE – ilustrační případ
Zdroj: program firmy AŽD

Při nastavení vstupních parametrů se dá dále nastavit, o kolik bude překročena rychlost na počátku brzdění (± 5 km/h), případně procento překročení rychlosti. V případě potřeby je možné dále nastavovat dobu závady při zrychlování (0 – 10 s), dobu zastavování pohonu (0,1 – 2,0 s), nebo dobu prodlevy brzd (0,1 – 2,0 s). Model uvažuje i nastavení počtu vozů soupravy a celkový počet funkčních vozů. Je možné tedy brát v úvahu i průběh brzdění při vyřazení určitého vozu z brzděné činnosti. Dále je možné nastavit hodnotu sklonu trati (± 40 ‰), větší hodnota sklonu se na dráze speciální nevyskytuje.



Obrázek 25: Výsledné brzděné křivky – model IEEE – ilustrační případ
Zdroj: program firmy AŽD

Výsledné brzdné křivky jsou znázorněny čtyři:

- modrá křivka znázorňuje průběh brzdění bez zohlednění doby náběhu brzd,
- červená křivka již zohledňuje náběh brzd², prvních několik metrů nedochází ke snížení rychlosti,
- zelená křivka znázorňuje brzdny model IEEE bez závady při zrychlování, její počáteční překročení maximální rychlosti je dáno dobou potřebnou k zastavení pohonu,
- černá křivka znázorňuje taktéž brzdny model IEEE, jen je v ní započtena doba závady při zrychlování, dojde tedy k výraznějšímu překročení rychlosti, než je tomu u zelené křivky, to se odrazí v délce brzdny dráhy, která je nejdelší ze všech křivek.

Pro další porovnávání se uvažuje zelená křivka. Jelikož u ní není počítáno s dobou závady při zrychlování, stejně jako to není uvažováno u modelu ERA.

Průběh křivek vypočítaných brzdny modelem IEEE je počítán pro zjištění brzdny dráhy od počátku brzdění až do zastavení. Ujetá vzdálenost se tedy u tohoto modelu přičítá. V tomto je podstatná odlišnost výsledných brzdny křivek od brzdny modelu ERA.

System CBTC zná vzdálenost ke konci povolení k jízdě EoA a podle toho neustále vypočítává potřebné brzdny křivky, z čehož následně ví, kdy je potřeba zasáhnout do brzdy, resp. začít brzdit.

5.2 Porovnání brzdny modelů

V následující kapitole je porováno množství modelových situací, které mohou nastat v provozu dráhy speciální. Podstatný vliv na výsledné brzdny křivky bude mít sklon trati, jenž je v provozu metra podstatně větší než na klasické železnici. Normálně se dosahuje hodnot až $\pm 40\%$. Z toho důvodu je potřeba simulovat několik hodnot sklonu, a to jak pro stoupání, tak i pro klesání. Konkrétně v této práci je počítáno se sklony 0% , $\pm 20\%$ a $\pm 40\%$. Dále je potřeba zohlednit počet provozních vozů v soupravě, jelikož vlivem poruchy může dojít k vyřazení některého vozu z činnosti a tím se změní i výsledná hodnota odrychlení, z čehož plyne i změna výsledné brzdny dráhy. Pro vzájemné porovnávání je u modelu ERA důležitá křivka nouzového brzdění EBD a u modelu IEEE křivka nouzového brzdění EB.

² Uvažuje se s fyzikální veličinou ryv (anglicky „jerk“), která popisuje časovou změnu odrychlení/zrychlení.

5.2.1 Jízda po rovině

Všechny vozy provozní

První situace k vzájemnému porovnání je jízda soupravy po rovině, tedy po trati se sklonem 0 ‰. Tento modelový případ je nejvhodnější k vzájemnému porovnání, neboť při stejné situaci udává zábrzdě vzdálenosti i předpis V2/1 DPP, takže lze porovnávat získané zábrzdě vzdálenosti z brzdých modelů s reálnými hodnotami z provozu. Oba brzdě modely byly nastaveny na hodnotu odrychlení $1,38 \text{ m/s}^2$, délku soupravy 97 metrů (5 vozů), počáteční rychlost 80 km/h, doba zastavení pohonu 0,5 s a všechny vozy provozní (bez poruchy).

Výstupní brzdě křivka z brzděho modelu ERA pro všechny provozní vozy je znázorněna v příloze B. S výše uvedenými vstupními parametry dosahuje brzdě dráha EBD křivky 206,48 m.

Tabulka 5: Brzdě dráha modelu ERA – jízda po rovině, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdě dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	644,52	355,63	333,41	256,51	206,48

Zdroj: autor

Se stejnými vstupními parametry a při provozních všech vozech dosahuje brzdě křivka EB modelu IEEE brzdě dráhy 208,3 m. Tato křivka je znázorněna v příloze D.

Tabulka 6: Brzdě dráha modelu IEEE – jízda po rovině, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdě dráha (m)
	EB
80	208,3

Zdroj: autor

Z výsledných brzdě drah lze pozorovat, že brzdě dráha ani v jednom případě nepřesahuje 215 metrů, což je hodnota stanovená DPP viz Tabulka 3 – Délky zábrzdě drah DPP. Oba brzdě modely jsou tedy na rovném úseku tratě schopny zastavit v mezích požadované vzdálenosti. Rozdíl v brzdě vzdálenosti obou modelů je především v algoritmu výpočtu jednotlivých brzdě křivek a v podstatně větším množství vstupních parametrů pro model ERA.

Neprovozní vůz v soupravě

Při jízdě po rovině je zapotřebí zohlednit i situaci, kdy by byl některý vůz ze soupravy vyřazen z činnosti. Vyřazením jednoho vozu z činnosti se zásadně změní hodnota odrychlení celé soupravy. Konkrétně nová hodnota odrychlení bude v případě vyřazení jednoho vozu z činnosti činit $1,104 \text{ m/s}^2$ a při vyřazení dvou vozů z činnosti již bude dosahovat pouze hodnoty $0,828 \text{ m/s}^2$. Vzhledem k tomu, že je velmi malá pravděpodobnost, že by vypověděly činnost dva vozy zároveň, bude dále počítáno pouze s variantou vyřazení z činnosti jednoho vozu (navíc po zjištění závady alespoň na jednom z vozů je souprava odstavena do depa k servisní prohlídce). Další vstupní hodnoty jako délka soupravy 97 metrů (5 vozů), počáteční rychlost 80 km/h a doba zastavení pohonu 0,5 s budou stále stejné.

Brzdné křivky modelu ERA pro případ 4 provozních vozů z 5 jsou uvedeny v příloze C. Lze pozorovat, že při výpadku jednoho vozu z činnosti se brzdná dráha křivky EBD prodlouží na 258,1 metrů. Což je téměř o 52 metrů více, to odpovídá délce téměř dvou a půl vozů soupravy M1 (délka vozu 19,5 m). U modelu ERA se při výpadku jednoho vozu z činnosti prodlužuje pouze zásahová křivka EBI a křivka nouzového brzdění EBD. Zbylé křivky se nemění. Lze tedy říci, že nefunkčnost jednoho vozu se projeví pouze pro případ nouzového brzdění, ale pokud by vlak brzdil provozní brzdou, tak se zábrzdná vzdálenost nijak nemění.

Tabulka 7: Brzdná dráha modelu ERA – jízda po rovině, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdná dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	644,52	355,63	333,41	312,95	258,1

Zdroj: autor

Podobnou hodnotu jako brzdný model ERA ukazuje i brzdný model IEEE. U něho vychází délka brzdné dráhy při výpadku jednoho vozu z činnosti 256,9 metrů. Rozdíl oproti brzdné dráze při činnosti všech vozů je 48,6 metrů. Rozdíl je tedy menší než u brzdného modelu ERA a zároveň celková brzdná dráha je u modelu IEEE nižší o 1,2 metru, než je tomu u modelu ERA. Brzdná křivka modelu IEEE při vyřazení jednoho vozu z činnosti je uvedena v příloze D.

Tabulka 8: Brzdná dráha modelu IEEE – jízda po rovině, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdná dráha (m)
	EB
80	256,9

Zdroj: autor

Z výše uvedeného je možné říci, že brzdné modely se při jízdě po rovině liší minimálně. Rozdíly ve vzdálenostech jsou do dvou metrů, což je vzdálenost, která je zahrnuta v konfidenčním intervalu a je relativně zanedbatelná.

5.2.2 Jízda po spádu 20 ‰

Všechny vozy provozní

Další modelový příklad pro porovnání obou brzdných modelů je jízda soupravy po spádu 20 ‰. Stejně jako při porovnání jízdy po rovině, i zde budu uvažovat situaci, kdy brzdí všechny vozy v soupravě, a kdy je jeden vůz vyřazen z činnosti, aby se lépe ukázalo, o kolik se prodlužuje zábrzdá vzdálenost, při nečinnosti některého z vozů soupravy. Sklon 20 ‰ je v provozu dráhy speciální zcela běžný, oproti klasické železnici. Vstupní parametry jsou stále stejné, jako byly nastaveny v kapitole 5.2.1. Při všech provozních vozech bude hodnota odrychlení opět $1,38 \text{ m/s}^2$.

Brzdné křivky modelu ERA jsou uvedeny v příloze E. Brzdá dráha se se změnou sklonu tratě mění, v tomto konkrétním případě se brzdá dráha prodloužila o 40 metrů oproti jízdě po rovině. Dochází také k prodloužení brzdé vzdálenosti pro jednotlivé křivky. Při použití provozního brzdění (křivka SBD) se brzdá dráha oproti jízdě po rovině prodlužuje o více než 100 metrů, což je více než délka soupravy M1.

Tabulka 9: Brzdá dráha modelu ERA – jízda po spádu 20 ‰, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdá dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	762,02	473,13	450,91	320,68	246,81

Zdroj: autor

U modelu IEEE dojde taktéž k prodloužení zábrzdé dráhy, ale opět ne tak výrazně jako u modelu ERA. Rozdíl při jízdě po sklonu 20 ‰ a jízdě po rovině je 33 metrů. Brzdé křivky modelu IEEE pro jízdu po spádu jsou uvedeny v příloze G.

Tabulka 10: Brzdá dráha modelu IEEE – jízda po spádu 20 ‰, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdá dráha (m)
	EB
80	241,3

Zdroj: autor

Rozdíly při jízdě po sklonu 20 ‰ se již začínají více zvětšovat, oproti jízdě po rovině. Důvodem je zejména tíhová síla soupravy, která působí při jízdě po spádu jako urychlující síla. Při samotném brzdění je tedy potřeba působit proti této síle, což prodlužuje samotnou brzdící dráhu.

Neprovozní vůz v soupravě

I při jízdě po spádu je pro ukázkou simulována situace, kdy by byl vyřazen z činnosti jeden vůz soupravy. Opět se změní hodnota odrychlení soupravy a zbylé vstupní parametry jsou ponechány stejné.

Stejně jako při jízdě po rovině i zde se výrazně projeví vliv výpadku jednoho vozu z činnosti. Model ERA dokonce počítá s brzdou dráhou o 77,6 metrů delší než je tomu při jízdě po spádu se všemi provozními vozy. Ostatní brzdé křivky se nemění, jen křivka EBI se prodlužuje v závislosti na prodloužení brzdé dráhy křivky EBD. Brzdé křivky modelu ERA jsou uvedeny v příloze F.

Tabulka 11: Brzdá dráha modelu ERA – jízda po spádu 20 ‰, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdá dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	762,02	473,13	450,91	406,26	324,43

Zdroj: autor

Model IEEE taktéž vypočítává podstatně delší brzdou vzdálenost při výpadku jednoho vozu. Rozdíl oproti činnosti všech vozů činí necelý 70 metrů. Opět i zde je pro danou situaci lepší brzdá křivka podle modelu IEEE. Brzdé křivky při jízdě po spádu se čtyřmi provozními vozy jsou uvedeny v příloze G.

Tabulka 12: Brzdá dráha modelu IEEE – jízda po spádu 20 ‰, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdá dráha (m)
	EB
80	310,9

Zdroj: autor

Stejně jako rozdíl při jízdě po rovině mezi 5 provozními vozy a 4 provozními vozy, tak i při jízdě po spádu je tento rozdíl dosti viditelný a vlivem sklonu se začíná postupně zvětšovat až o 20 metrů oproti jízdě po rovině. Jeden neprovozní vůz při jízdě soupravy po spádu představuje už zvýšené riziko vzniku nebezpečné situace vlivem prodloužení brzdé dráhy.

5.2.3 Jízda po spádu 40 ‰

Všechny vozy provozní

Jak již bylo zmíněno, tak v provozu dráhy speciální se vyskytují poměrně velké sklony v porovnání s klasickou železnicí. Ten největší, jakého je možné dosáhnout je ± 40 ‰. Již v předchozí kapitole je názorně vidět, jak se do brzděné dráhy promítne spád 20 ‰. Brzděná dráha se začíná podstatně prodlužovat. Pro simulaci při jízdě po spádu 40 ‰ byly opět ponechány stejné vstupní parametry jako v předchozích případech.

V tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty zábrzdých drah modelu ERA při jízdě po spádu 40 ‰ a v příloze H jsou znázorněny brzděné křivky. Dochází k prodlužování zábrzdých drah pro křivku Indication, která dosahuje délky přes 1 kilometr a taktéž se prodlužuje brzděná dráha v případě provozního brzdění, a to o více než 240 metrů oproti jízdě po polovičním spádu 20 ‰. Dochází taktéž k prodloužení zábrzděné dráhy při použití nouzové brzdy. V porovnání s jízdou po polovičním spádu se brzděná dráha prodlouží o více než 60 metrů a v porovnání s jízdou po rovině to je více než o 100 metrů. Nicméně délka brzděné dráhy pro křivku EBD je menší, než je tomu v případě jízdy po spádu 20 ‰ při nečinnosti jednoho vozu v soupravě.

Tabulka 13: Brzděná dráha modelu ERA – jízda po spádu 40 ‰, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzděná dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	1003,39	714,5	692,28	377,44	307,36

Zdroj: autor

Podstatně příznivěji opět vychází zábrzděná vzdálenost počítána pomocí brzděného modelu IEEE. Zde dochází k prodloužení zábrzděné dráhy o 46 metrů, což je opět méně, než přes 60 metrů u modelu ERA. Brzděná křivka modelu IEEE pro jízdu po spádu 40 ‰ je uvedena v příloze J.

Tabulka 14: Brzděná dráha modelu IEEE – jízda po spádu 40 ‰, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzděná dráha (m)
	EB
80	287,8

Zdroj: autor

Je zřejmé, že při jízdě po spádu 40 ‰, bude zábrzdna dráha jedna z nejdelších. Nicméně pokud se podíváme na jízdu po spádu 20 ‰ při nečinnosti jednoho vozu, vidíme, že je zábrzdna dráha delší, a to až o několik desítek metrů. Oproti jízdě po rovině je rozdíl 80 až 100 metrů podle typu použitého modelu. Dostáváme se tedy téměř o celou délku jednotky, tj. 97 metrů dále. Z toho je pěkně vidět vliv sklonu na výslednou délku zábrzdné dráhy.

Neprovozní vůz v soupravě

Situaci, kdy je neprovozní vůz v soupravě při jízdě po spádu 40 ‰, lze označit jako za nejvíce závažnou ze všech simulovaných situací. Již při jízdě po spádu 40 ‰ se všemi činnými vozy se zábrzdá dráha podstatně prodloužila a v případě neprovozního vozu toto prodloužení zábrzdě dráhy bude ještě větší. I zde jsou stejné vstupní parametry jako v předchozích případech a hodnota odrychlení je nastavena na $1,104 \text{ m/s}^2$.

U modelu ERA se poprvé dostáváme na hodnotu zábrzdě dráhy křivky EBD nad 400 metrů, konkrétně na 438,6 metrů. V příloze I jsou uvedeny zábrzdě křivky modelu ERA. Výrazně se v této situaci prodloužují všechny sledované křivky a poprvé se u křivky Indication dostáváme na zábrzdě dráhu přes jeden kilometr. Při porovnání s jízdou po spádu 20 ‰, dochází k prodloužení zábrzdě dráhy o více než 100 metrů.

Tabulka 15: Brzdá dráha modelu ERA – jízda po spádu 40 ‰, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdá dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	1008,56	719,67	697,45	523,55	438,62

Zdroj: autor

Zábrzdě dráha modelu IEEE se taktěž výrazněji prodloužila, ale nedošlo k překročení 400 metrů, takže je opět výhodnější model IEEE. Křivka modelu ERA je uvedena v příloze J. V této situaci je taktěž největší rozdíl mezi jednotlivými modely, a to více než 40 metrů.

Tabulka 16: Brzdá dráha modelu IEEE – jízda po spádu 20 ‰, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdá dráha (m)
	EB
80	395,3

Zdroj: autor

Tato modelová situace je nejzávažnější ze všech simulovaných situací. Kombinace jízdy po největším možném spádu a nečinnost jednoho vozu v soupravě, vytváří až téměř nebezpečnou situaci, kdy může dojít při jízdě souprav v krátkém intervalu za sebou k ohrožení bezpečnosti z důvodu podstatně prodloužené zábrzdě vzdálenosti jedné soupravy. Je tedy zřejmé, že provozovatel dráhy by měl předcházet situaci, kdy by nebyl činný jeden vůz v soupravě. Tato situace by měla být řešena vnitřními předpisy, které stanoví, jak postupovat při nečinnosti jednoho vozu.

5.2.4 Jízda do stoupání 20 ‰

Všechny vozy provozní

Stejně jako pro jízdu po spádu, tak i pro jízdu do stoupání je potřeba simulovat dvě hodnoty sklonu. Hodnoty jsou stejné jako při jízdě po spádu, ale jen jde o kladné hodnoty sklonu. První situace pro jízdu do stoupání 20 ‰. Vstupní parametry zde zůstávají stejné jako v předchozích situacích a hodnota odrychlení bude $1,38 \text{ m/s}^2$.

Vliv stoupání se u modelu ERA projeví podstatným zkrácením zábrzdě vzdálenosti. V příloze K jsou uvedeny křivky pro jízdu do stoupání 20 ‰. Zábrzdě vzdálenost se snižuje pod 200 metrů a zároveň se zkrátily vzdálenosti pro všechny křivky.

Tabulka 17: Brzdě dráha modelu ERA – jízda do stoupání 20 ‰, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdě dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	581,99	293,1	270,88	230,73	180,44

Zdroj: autor

Podobně je tomu i u modelu IIEEE, kde se vlivem stoupání zkrátily zábrzdě vzdálenost. V příloze M je uvedena brzdě křivka modelu ERA při jízdě do stoupání 20 ‰. Při jízdě do stoupání se zábrzdě vzdálenost zkrátily o 25 metrů oproti jízdě po rovině.

Tabulka 18: Brzdě dráha modelu IIEEE – jízda do stoupání 20 ‰, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdě dráha (m)
	EB
80	183,6

Zdroj: autor

Při jízdě do stoupání je zřejmé, že zábrzdě dráha soupravy bude kratší, než je tomu při jízdě po rovině, jelikož zde působí tíhová síla soupravy, která působí při jízdě do stoupání jako zpomalující síla. Při porovnání obou modelů vychází výhodněji při jízdě do stoupání model ERA, což je změna, jelikož při jízdě po spádu vycházel výhodněji model IIEEE. Nicméně rozdíl obou modelů jsou pouhé tři metry, takže i zde by tato rozdílová vzdálenost šla zahrnout do neurčitosti polohy a tím by se oba modely vyrovnaly. Jízda do stoupání je tedy z pohledu zábrzdě drah nejlepší provozní situací, jelikož dochází k podstatnému zkrácení zábrzdě vzdálenosti.

Neprovozní vůz v soupravě

Stejně jako v předchozích simulovaných situacích i zde, je uvažováno s jedním neprovozním vozem v soupravě. Pro jízdu do stoupání je předpoklad, že jeden neprovozní vůz v soupravě bude mít na výslednou zábrzdnu vzdálenost menší vliv, než je tomu při jízdě po spádu. Opět jsou vstupní parametry zachovány.

V případě jízdy do stoupání se všemi provozními vozy, se zábrzdna dráha zkrátila pod 200 metrů a byla tedy menší než při jízdě po rovině. Pokud dojde k výpadku jednoho vozu z činnosti, model ERA vypočítal zábrzdnu dráhu na 218,7 metrů, což je o 38 metrů více než při všech provozních vozech. Odpor ze stoupání má tedy přímý vliv na zkrácení zábrzdne vzdálenosti. Brzdné křivky modelu ERA pro jízdu do stoupání 20 ‰ s jedním neprovozním vozem jsou uvedeny v příloze L. Zábrzdna dráha nouzové křivky EBD se tedy prodloužila o 38 metrů, ale zábrzdna dráha křivky Indication se posunula o necelé dva metry. Je tedy zřejmé, že křivka Indication stanovuje dostatečnou rezervu při brzdění a vliv změny odrychlení na ni nemá velký vliv.

Tabulka 19: Brzdná dráha modelu ERA – jízda do stoupání 20 ‰, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdná dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	583,38	294,49	270,88	272,27	218,67

Zdroj: autor

Model IEEE opět stanovuje zábrzdnu dráhu o něco delší, než je tomu u modelu ERA. Rozdíl je opět minimální a v tomto konkrétním případě pouze jeden metr. U modelu IEEE je rozdíl oproti jízdě do stoupání se všemi provozními vozy menší než u modelu ERA a to pouze 36 metrů. Brzdná křivka modelu IEEE je uvedena v příloze M.

Tabulka 20: Brzdná dráha modelu IEEE – jízda do stoupání 20 ‰, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdná dráha (m)
	EB
80	219,6

Zdroj: autor

Pokud bude v soupravě při jízdě do stoupání 20 ‰ jeden neprovozní vůz, tak se zábrzdna dráha výrazněji prodlouží, nicméně prodloužení zábrzdne dráhy není tak velké, jako je tomu při jízdě po spádu.

5.2.5 Jízda do stoupání 40 ‰

Všechny vozy provozní

Poslední simulovanou situací je jízda do stoupání 40 ‰. Zde je předpoklad, že tato situace bude vykazovat nejkratší zábrzdnu vzdálenost ze všech situací. Neboť odpor z jízdy do stoupání bude zde největší a bude působit proti samotnému pohybu soupravy. Vstupní parametry zůstávají opět stejné, jako je tomu v předchozích případech.

Brzdny model ERA dosahuje nejkratší zábrzdné vzdálenosti a to pouhých 160 metrů. Což je při délce jednotky 97 metrů ani ne dvojnásobek. Brzdné křivky pro jízdu do stoupání 40 ‰ jsou uvedeny v příloze N. Je zřejmé, že stoupání má příznivý vliv na výsledné zábrzdné vzdálenosti jednotlivých křivek.

Tabulka 21: Brzdná dráha modelu ERA – jízda do stoupání 40 ‰, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdná dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	539,23	250,34	228,12	210,59	160,29

Zdroj: autor

Brzdny model IEEE dosahuje opět o něco delší zábrzdné vzdálenosti, než je tomu u modelu ERA. Délka zábrzdné vzdálenosti je 164,5 metrů, což je o 4 metry více než u modelu ERA. Brzdná křivka modelu IEEE je uvedena v příloze P.

Tabulka 22: Brzdná dráha modelu IEEE – jízda do stoupání 40 ‰, 5 provozních vozů

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdná dráha (m)
	EB
80	164,5

Zdroj: autor

Oba modely pro jízdu do stoupání 40 ‰ stanovují velmi krátké zábrzdné vzdálenosti. Oproti jízdě po rovině je rozdíl více než 40 metrů u obou modelů a tato zábrzdná vzdálenost je tedy nejkratší jaké lze v provozu dráhy speciální dosáhnout.

Neprovozní vůz v soupravě

Poslední modelovou situací je jízda do stoupání 40 ‰ s jedním neprovozním vozem. Z předchozí situace je zřejmé, že i při jízdě s jedním neprovozním vozem bude zábrzdňá dráha podstatně kratší a bude se pohybovat pod 200 metrů. Vstupní parametry jsou opět stejné a hodnota odrychlení je $1,104 \text{ m/s}^2$.

Model ERA vypočítává zábrzdňou dráhu při neprovozním voze v soupravě na 189,7 metrů, což je stále výrazně pod 200 metrů. Oproti všem provozním vozům, zde dochází k prodloužení zábrzdňé vzdálenosti křivky EBD a křivky Indication, ale zábrzdňá vzdálenost při použití provozní brzdy, tedy křivka SBD je stále stejná. Pokud by se brzdilo pouze provozní brzdou, tak vliv nečinnosti jednoho vozu v soupravě nemá při jízdě do stoupání 40 ‰ žádný podstatný vliv. Brzdňé křivky modelu ERA pro jízdu do stoupání 40 ‰ jsou uvedeny v příloze O.

Tabulka 23: Brzdňá dráha modelu ERA – jízda do stoupání 40 ‰, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdňá dráha (m)				
	Indication	SBI	SBD	EBI	EBD
80	552,99	264,1	228,12	241,88	189,77

Zdroj: autor

Podle modelu IEEE je zábrzdňá vzdálenost 192 metrů, což je opět více než vypočítává model ERA. Oproti všem provozním vozům se zábrzdňá dráha prodloužila o necelých 28 metrů. Brzdňá křivka modelu ERA je uvedena v příloze P.

Tabulka 24: Brzdňá dráha modelu IEEE – jízda do stoupání 40 ‰, 4 provozní vozy

Počáteční rychlost (km/h)	Brzdňá dráha (m)
	EB
80	192,2

Zdroj: autor

Pokud je v soupravě jeden neprovozní vůz, tak se prodlužuje zábrzdňá dráha, nicméně při jízdě do stoupání 40 ‰ jsou zábrzdňé dráhy příznivější a ani v jednom případě nedojde k překročení 200metrové vzdálenosti. Nedochozí tedy k žádnému vzniku nebezpečné situace, jako tomu bylo při jízdě po spádu 40 ‰. Rozdíl mezi brzdňými modely je opět v řádech několika metrů, konkrétně necelé 3 metry. Opět by se tedy dalo říct, že tato vzdálenost se dá zahrnout do neurčitosti polohy a výsledky obou modelů by se posléze rovnaly.

5.3 Návrh brzdného modelu

Porovnání jednotlivých brzdných modelů v předchozí kapitole ukazuje klady a nedostatky jednotlivých modelů. Zatímco brzdný model ERA má množství vstupních parametrů pevně nastavených, které není možné měnit, tak brzdný model IEEE udává doporučení, jak postupovat při stanovování brzdných křivek. Tímto se modely od sebe odlišují a z jejich porovnání je zřejmé, že se liší i v jednotlivých modelových situacích.

Brzdý model ERA má výhodu v přesném nastavení hodnot odrychlení v závislosti na rychlosti. Tím se celý model zpřesňuje, ovšem parametry odrychlení jednotlivých souprav se postupně mění, dochází tak ke skokům ve výsledných brzdných křivkách. Toho si lze všimnout například v příloze E, kdy se křivka EBI při rychlosti 75 km/h posune. To je právě zapříčiněno změnou odrychlení soupravy během zpomalování. Model ERA dále uvažuje jen dvě situace a to, že souprava brzdí, nebo nebrzdí. Náběh brzdy zde není zohledněn. Dále má model ERA výhodu, že pracuje s koeficienty adheze, takže zohledňuje i aktuální povětrnostní podmínky, které ovšem v provozu dráhy speciální nehrají až takovou roli. Nicméně je dokázáno, že souprava, která vjíždí z venkovního prostředí, do prostředí tunelu dráhy speciální, je schopna na svých kolech přenést venkovní vlhkost a nečistoty až několik set metrů dovnitř tunelu (tato situace ale nebyla v rámci této práce uvažována). Samotná adheze má při určování zábrzdných vzdáleností značný vliv na klasické železnici, kde se adhezní podmínky mnohdy mění během chvíle dle povětrnostní situace a v každém úseku trati mohou být jiné. V tom je právě dráha speciální odlišná, jelikož v tunelu panují téměř konstantní adhezní podmínky a je možné vždy počítat s tím, že zábrzdné vzdálenosti budou v jednotlivých úsecích tratě stejné. Jedinou výjimkou mohou být průsaky spodní vody, které vytvoří vlhké prostředí v určité části tratě (ale ani tuto situaci tato práce neuvažuje).

Brzdý model IEEE nepracuje s takto přesným nastavením. Jako vstupní údaj se nastavuje pouze největší hodnota odrychlení a model si již sám dopočítá zbytek. V tomto je model dosti zjednodušen, nicméně při porovnání výsledných brzdných křivek s modelem ERA jsou rozdíly mnohdy téměř minimální. Model má naopak výhodu, že pracuje s možností vzniku závady na pohonu během požadavku na brzdění. To se může výrazně promítnout do výsledné zábrzdné vzdálenosti a zavinit její prodloužení.

Jednotlivé modelové situace ukázaly, že brzdý model ERA je výhodnější pro jízdu po rovině a pro jízdu do stoupání a to buď +20 ‰, nebo +40 ‰. V těchto případech stanovoval vždy kratší zábrzdné vzdálenosti. Ovšem rozdíl ve vzdálenostech proti modelu IEEE byl v jednotkách metrů, takže by se téměř vždy dal tento minimální rozdíl zahrnout do neurčitosti polohy a tím by se oba modely srovnaly. Ovšem v případě, kdy by hrál roli

každý metr na zábrzdě vzdálenosti, jednoznačně lépe by zde vycházel model ERA. Zbylé modelové situace pro jízdu po spádu -20 ‰ a -40 ‰ naopak vycházely podstatně lépe pro brzdny model IEEE a to dokonce v řádech desítek metrů. Model ERA si při jízdě po spádu vytvářel velké rezervy v zábrzdných drahách, zatímco model IEEE s rezervami na brzdění nepočítá.

Jednoznačně tedy nelze říci, který model je výhodnější pro použití na dráze speciální. Brzdny model IEEE je sice primárně určený pro dráhy speciální, ale ve výše provedeném porovnání vychází v některých případech lépe model ERA. Nejlepší by byla kombinace obou modelů, kdyby se pro jednotlivé situace, které mohou v provozu dráhy speciální nastat, využila vždy vlastnost konkrétního modelu. To znamená pro jízdu po rovině a do stoupání využít výpočtu pomocí modelu ERA a pro jízdu po spádu výpočtu modelu IEEE. Z obrázku číslo 15 je zřejmé, že palubní část zabezpečovacího zařízení si sama neustále vypočítává jednotlivé rychlostní profily a z nich i plynoucí brzdě křivky. Toto se děje i v závislosti k reliéfu tratě, tedy zda jede vlak po spádu, stoupání, nebo rovině. Při samostatném brzdění je tedy potřeba brát v potaz i změnu sklonu tratě během samostatné zábrzdě dráhy. Změna sklonu během procesu brzdění zde nebyla uvažována, ale palubní část vlakového zabezpečovače díky nahrané mapě trati ví, ve kterém úseku se přesně nachází a v případě brzdění ví, jak má upravit proces brzdění.

Nejvhodnější by tedy byla kombinace těchto dvou modelů, ovšem brzdny model ERA je spravován evropskou železniční agenturou a je tedy určen pro evropskou klasickou železnici. Brzdny model IEEE je naopak stanoven celosvětovou normou IEEE a je možné jej použít kdekoli na světě. Toho se právě využívá v dosavadních provezech dráhy speciální, kde se při automatickém provozu téměř výhradně používá model IEEE. Jejich kombinace tedy v provozu dráhy speciální prozatím nebyla nikde použita a nejspíš ani nebude, nicméně vzájemnou kombinací modelů by se docílilo určitého zkrácení zábrzdných drah a tím by se mohl snížit interval mezi jednotlivými soupravami. Vyžadovalo by to ovšem nutnost spolupráce institutu IEEE a evropské železniční agentury ERA, které by se společně podílely na vzniku nového brzdného modelu, který by zahrnoval všechny klady jednotlivých dosavadních modelů.

Navrhovaný brzdny model, který by byl výsledkem kombinace brzdného modelu ERA a IEEE lze považovat za bezpečný, jelikož oba modely splňují při jízdě po rovině zábrzdnou dráhu maximálně 215 metrů (zábrzdě dráhy pro stoupání nebo klesání nejsou v předpisu DPP stanoveny). Při použití nouzové brzdy tuto hodnotu udává předpis V2/1 DPP jako bezpečnou.

6. ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na možnost užití brzdného modelu vlakového zabezpečovače ETCS na dráhu speciální. Cílem této práce byl především popis a použití dvou dosavadních brzdných modelů, a to modelu ERA a modelu IEEE. Pro implementaci byla záměrně vybrána dráha speciální, jelikož se dosti odlišuje od klasické železnice, především provozem v uzavřeném tubusu, kde nepůsobí povětrnostní podmínky jako ve venkovním prostředí. Dále četností zastávek, velkými hodnotami sklonu tratě (a často se střídajícími) a podstatně kratšími zábrzdými vzdálenostmi. Ty byly podstatnou sledovanou veličinou při vzájemném porovnávání a vyhodnocování těchto modelů.

První část poskytla teoretický základ o tom, co to vůbec doprava je a jak se uvádí vozidlo do pohybu včetně všech fyzikálních aspektů, které musí při rozjezdu a následném pohybu překonávat. Tato část měla za úkol čtenáře seznámit se samostatnými fyzikálními principy a popsat fyzikální aspekty, se kterými se samotný proces brzdění potýká.

Druhá část důkladněji popsala dělení brzdových systémů. Jsou v ní zahrnuty všechny brzdové systémy, se kterými se dá v současné době v drážním provozu setkat, nebo byly do nedávné doby používány. Jsou zde podrobněji včetně schémat vysvětleny činnosti přímočinné a samočinné brzdy, včetně brzdy elektropneumatické, jež je dneska nejčastěji používána brzda v provozu dráhy speciální.

Třetí část je zaměřena na popis dráhy speciální a na to, jak konkrétně definuje dráhu speciální Zákon o dráhách (č. 266/1994 Sb.), včetně dělení metra. Dále jsou popsány požadavky na brzdy vozidel dráhy speciální a vysvětleny pojmy provozní a nouzová brzda, jelikož nouzová brzda je dále používána při simulaci brzdných křivek. Součástí této kapitoly je i obecný popis zabezpečovacího zařízení ETCS a CBTC, aby bylo zřejmé, z čeho vychází jednotlivé brzdné modely, jelikož každý model je určen pro jeden typ zabezpečovacího zařízení.

Čtvrtá část se věnuje podrobnějšímu rozboru a popisu jednotlivých brzdných modelů, včetně samotného popisu brzdných křivek. Pro jednotlivé brzdné modely je důležité správné nastavení vstupních parametrů, které zajistí správnost stanovení brzdných křivek. Brzdný model ERA je pro nastavování obtížnější než model IEEE, proto je mu i věnována větší část této kapitoly a snaží se čtenáři poskytnout podrobnější informace ohledně správného nastavení modelu. Brzdný model IEEE je zde popsán taktéž pomocí programu od firmy AŽD, který má výpočet tohoto modelu zahrnutý v sobě.

V poslední části práce jsou vytvořeny jednotlivé modelové situace, jež mohou nastat v provozu dráhy speciální. K těmto modelovým situacím byla vybrána nejmodernější souprava typu M1 pražského metra a na základě známých parametrů, byly nastaveny jednotlivé brzdné modely. Výstupní brzdné křivky pro jednotlivé modelové situace byly následně navzájem porovnány, čímž se ukázaly výhody a nevýhody jednotlivých brzdných modelů při jednotlivých modelových situacích. Na základě vzájemného porovnání brzdných modelů, se v poslední podkapitole navrhuje ideální brzdný model. Tento brzdný model by měl být vzájemnou kombinací dvou použitých brzdných modelů, jelikož pro každou situaci, která může v provozu dráhy speciální nastat, je vhodný jiný model. Nelze tedy jednoznačně říci, zda je lepší model ERA, nebo model IEEE. Ovšem ukázalo se, že je v provozu dráhy speciální možné použít brzdný model ERA s výjimkou jízdy po spádu, kde se výrazně prodlužovaly jeho zábrzdné vzdálenosti. Použití modelu ERA v provozu dráhy speciální by ovšem vyžadovalo sérii měřících jízd s cílem ověření vypočtených jízdnic drah.

Tato práce ukázala vzájemné srovnání a zhodnocení dvou brzdných modelů, čímž byl splněn požadavek firmy AŽD Praha s.r.o. a může pro ni sloužit jako obecný přehled mezi dvěma brzdnými modely. Dle dostupných informací dosud nebylo takové vzájemné porovnání jednotlivých modelů v žádné práci zpracováno.

POUŽITÁ LITERATURA

ARC, 2018. *NGTC (Next Generation Train Control Systems) converges ETCS and CBTC*, [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.arcweb.com/blog/ngtc-next-generation-train-control-systems-converges-etcs-cbtc>

AUTOMATED METROS OBSERVATORY, 2019. *UITP and partners to conduct study on CBTC as part of eu project NGTC* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://metroautomation.org/uitp-and-partners-to-conduct-study-on-cbtc-as-part-of-eu-project-ngtc/>

AŽD, 2015. *interní materiály*

AŽD, 2016. *interní materiály*

AŽD, 2018. *interní materiály*

BASLAR, Josef, Jan Mrkvička, 1982. *Trakční vozidla závislá I*. 1. vyd., Praha: Nakladatelství dopravy a spojů.

ČESKO, 1995. *Vyhláška 173/1995 Sb.* Praha: Ministerstvo dopravy [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Legislativa-v-drazni-doprave/Narizeni-vlady-a-vyhlaskey-v-drazni-doprave/173-95-uplzn-k-15-1-2015.pdf.aspx?lang=cs-CZ>

ČESKO, 1994. *Zákon o drahách* Praha: Ministerstvo dopravy [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Legislativa-v-drazni-doprave/Zakony-v-drazni-doprave/266-94-k_31-8-2018-uplzneni.pdf.aspx?lang=cs-CZ

ERA, 2016. *SUBSET-026 v360* [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: https://www.era.europa.eu/node/641/1091794_en

ETCS, *Specifikace ETCS* [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <http://www.etcs.cz/>

EUROPEAN COMMISSION, 2019, *ERMTS – Change Control Management of the ERTMS technical requirements* [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/transport/modes/ertms-change-control-management-ertms-technical-requirements_en

FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY, 1983. *Služební rukověť: Popis brzd železničních vozidel*, Nakladatelství dopravy a spojů, Praha, 247 s.

FOREJTAR, Daniel, 2019. Soukromý archiv fotografií

GREGORA, Stanislav, a kolektiv, 2013. *Vozidla elektrické trakce*, 1. vyd. Univerzita Pardubice, Pardubice, 186 s

HAVRYLIUK, V. I., 2017. *An overview of the ETCS braking curves* [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/10629/1/Havryliuk.pdf>

HELLER, Petr, 2010. *Brzdy v kolejových vozidlech*. Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~pheller/ZSDM/Brzda%20v%20KV.pdf>

HODÍK, Karel, 1980. *Brzdy železničních kolejových vozidel*, 1. vyd. Nakladatelství dopravy a spojů, Praha, 192 s.

HRUBAN, I., Nachtigall, P., Štěpán, O., 2015. *Přínosy zavedení ETCS z pohledu brzdových křivek* In: *Vědeckotechnický sborník ČD* [online]. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195426/4009.pdf/1a8897f3-50f4-4c6f-8216-9071b7bc35d5>

LHOTAN, Radek, 2018. *Studie řešení brzdy pro vozy metra, bakalářská práce* [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/77406>

NAEEM, A., 2015. *Safe braking model explained*. In: *CBTC Solutions* [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.cbtc-solutions.ca/blog/2017/3/29/safe-braking-model-explained>

NEXT GENERATION OF TRAIN CONTROL SYSTEMS, 2017. *Next Generation of Train Control Systems* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://www.ngtc.eu/>

NOVÁK, Jan, 1964. *BRZDY*. 1. vyd. Nakladatelství dopravy a spojů, Praha, 176 s.

POHL, Jiří, 2018. *Brzdění nákladních vlaků samočinnou pneumatickou brzdou*. Neveřejný dokument firmy Siemens Mobility, s.r.o.

RAILWAY TECHNOLOGY, 2014. *ERTMS and CBTC Side By Side: A comparison of State-of-the-art Rail Traffic Management Systems* [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/downloads/whitepapers/testing/ertms-and-cbtc/>

WIKIPEDIE, 2018. *Bar (jednotka)* [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Bar_\(jednotka\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bar_(jednotka))

WIKIPEDIE, 2019. *Communications-based train control* [online]. [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Communications-based_train_control

ZÍTKO, Martin, 2018. *Pneumatická část brzdy kolejových vozidel* [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/pojezdy/brzda/pneumatik.html>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Doba přenosu povelu k brzdění od začátku na konec soupravy	17
Tabulka 2: Režimy brzdění a jejich plnicí a vyprazdňovací časy	17
Tabulka 3: Délky zábrzdňných drah DPP	32
Tabulka 4: Základní parametry soupravy M1	64
Tabulka 5: Brzdná dráha modelu ERA – jízda po rovině, 5 provozních vozů.....	71
Tabulka 6: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda po rovině, 5 provozních vozů.....	71
Tabulka 7: Brzdná dráha modelu ERA – jízda po rovině, 4 provozní vozy	72
Tabulka 8: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda po rovině, 4 provozní vozy.....	73
Tabulka 9: Brzdná dráha modelu ERA – jízda po spádu 20‰, 5 provozních vozů.....	74
Tabulka 10: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda po spádu 20‰, 5 provozních vozů.....	74
Tabulka 11: Brzdná dráha modelu ERA – jízda po spádu 20‰, 4 provozní vozy	75
Tabulka 12: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda po spádu 20 ‰, 4 provozní vozy.....	75
Tabulka 13: Brzdná dráha modelu ERA – jízda po spádu 40 ‰, 5 provozních vozů.....	76
Tabulka 14: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda po spádu 40 ‰, 5 provozních vozů.....	76
Tabulka 15: Brzdná dráha modelu ERA – jízda po spádu 40‰, 4 provozní vozy	78
Tabulka 16: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda po spádu 20‰, 4 provozní vozy.....	78
Tabulka 17: Brzdná dráha modelu ERA – jízda do stoupání 20 ‰, 5 provozních vozů	79
Tabulka 18: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda do stoupání 20 ‰, 5 provozních vozů.....	79
Tabulka 19: Brzdná dráha modelu ERA – jízda do stoupání 20 ‰, 4 provozní vozy	80
Tabulka 20: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda do stoupání 20 ‰, 4 provozní vozy	80
Tabulka 21: Brzdná dráha modelu ERA – jízda do stoupání 40 ‰, 5 provozních vozů	81
Tabulka 22: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda do stoupání 40 ‰, 5 provozních vozů.....	81
Tabulka 23: Brzdná dráha modelu ERA – jízda do stoupání 40 ‰, 4 provozní vozy	82
Tabulka 24: Brzdná dráha modelu IIEEE – jízda do stoupání 40 ‰, 4 provozní vozy	82

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Jednostupňový pístový kompresor.....	18
Obrázek 2: Princip funkce šroubového kompresoru	19
Obrázek 3: Brzdič DAKO-BS2.....	20
Obrázek 4: Ovladač OBE1 brzdiče DAKO-BSE.....	20
Obrázek 5: Sdružená jízdní páka.....	21
Obrázek 6: Aplikační úroveň L0	39
Obrázek 7: Aplikační úroveň LNTC	40
Obrázek 8: Aplikační úroveň L1	40
Obrázek 9: Aplikační úroveň L2	41
Obrázek 10: Aplikační úroveň L3	42
Obrázek 11: Princip pevného a pohyblivého bloku	44
Obrázek 12: Příklad statických omezení rychlosti na části trati.....	51
Obrázek 13: Příklad nejvíce omezujícího rychlostního profilu na části trati	52
Obrázek 14: Příklad dynamického rychlostního profilu – brzděné křivky	53
Obrázek 15: Příklad rychlostních profilů	54
Obrázek 16: Model bezpečného brzdění	56
Obrázek 17: Brzděné křivky modelu ERA	61
Obrázek 18: Křivka EBD a limity dohledu.	63
Obrázek 19: Souprava metra M1	64
Obrázek 20: Nastavení parametrů vlaku – model ERA – ilustrační případ	66
Obrázek 21: Nastavení parametrů tratě – model ERA – ilustrační případ	66
Obrázek 22: Nastavení brzdových parametrů nouzové brzdy – model ERA – ilustrační případ	67
Obrázek 23: Výsledné brzděné křivky – model ERA – ilustrační případ.....	68
Obrázek 24: Nastavení vstupních parametrů modelu – model IEEE – ilustrační případ.....	69
Obrázek 25: Výsledné brzděné křivky – model IEEE – ilustrační případ	69

SEZNAM SCHÉMAT

Schéma 1: Princip funkce přímočinné brzdy	22
Schéma 2: Princip funkce samočinné brzdy	24
Schéma 3: Princip funkce elektropneumatické brzdy	26
Schéma 4: Schéma architektury obecného systému CBTC	46
Schéma 5: Uspořádání brzdného modelu ERA z pohledu uživatele.....	61

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ACBM	Automatické cílové brzdění – metro (AVV upravené do metra)
ATO	Automatic train operation (automatický provoz vlaků)
ATS	Automatic train supervision (automatický dohled nad vlaky)
ATP	Automatic train protection (automatický vlakový zabezpečovač)
ASP	Axel load Speed profile (Rychlostní profil podle zatížení nápravy)
AVV	Automatické vedení vlaku
AŽD	AŽD Praha s.r.o.
CBTC	Communications-based train control (Řízení vlaku založené na komunikaci)
CVC	CBTC Vital Computer (bezpečné logické jádro CBTC)
DPP	Dopravní podnik hlavního města Prahy
EMU/DMU	Electric multiple unit/diesel multiple unit (elektrická/motorová jednotka)
ERTMS	European Rail Traffic Management System (evropský systém řízení železniční dopravy)
ERA	European Union Agency for Railways (Evropská agentura pro železnici)
EBD	Emergency Brake Deceleration Curves (Křivka nouzového brzdění)
EBI	Emergency Brake Intervention (Zásah nouzové brzdy)
EVC	European Vital Computer (bezpečné logické jádro ETCS)
GEBR	Guaranteed emergency brake rate (Zaručený poměr nouzového brzdění)
GOA	Grade of Automation (stupeň automatizace)
GUI	Guidance Curves (Dohledová křivka)
LEU	Lineside Electronic Unit (Traťová elektronická jednotka)
LOA	Limit of Authority (Limit autorizace)
LRBG	Last Relevant Balise Group (poslední vztažná balizová skupina)
LZA	Liniový vlakový zabezpečovač s automatickým vedením vlaků metra
MA	Movement Authority (povolení k jízdě)
NGTC	Next Generation Train Control (řízení vlaků nové generace)
OB	Onboard (na vlaku)
PBD SR	Speed restriction to ensure a given permitted braking distance (Rychlostní omezení pro zajištění brzdě dráhy)
RBC	Radio Block Centre (Radiobloková centrála)
RC	Radio Communication (komunikační (radiový) subsystém)
SBD	Service Brake Deceleration Curves (Křivka provozního brzdění)

SBI	Service Brake Intervention (Zásah provozní brzdy)
SRS	System Requirements Specification (Specifikace systémových požadavků)
SSP	Static speed profile (statický rychlostní profil)
STM	Specific Transmission Module (Specifický přenosový modul)
TS	Trackside (na trati)
TSR	Temporary Speed Restrictions (Dočasné omezení rychlosti)
UGTMS	Urban Guided Transport Management and Control System (System řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou)
UITP	International Association of Public Transport (Mezinárodní unie veřejné dopravy)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Garantované parametry souprav M1 – statické charakteristiky trakce/brzda

Příloha B Brzdné křivky modelu ERA – jízda po rovině, 5 vozů činných

Příloha C Brzdné křivky modelu ERA – jízda po rovině, 4 vozy činné

Příloha D Brzdná křivka modelu IEEE – jízda po rovině

Příloha E Brzdná křivka modelu ERA – jízda po spádu 20‰, 5 vozů činných

Příloha F Brzdná křivka modelu ERA – jízda po spádu 20‰, 4 vozy činné

Příloha G Brzdná křivka modelu IEEE – jízda po spádu 20‰

Příloha H Brzdná křivka modelu ERA – jízda po spádu 40‰, 5 vozů činných

Příloha I Brzdná křivka modelu ERA – jízda po spádu 40‰, 4 vozy činné

Příloha J Brzdná křivka modelu IEEE – jízda po spádu 40‰

Příloha K Brzdná křivka modelu ERA – jízda do stoupání 20‰, 5 vozů činných

Příloha L Brzdná křivka modelu ERA – jízda do stoupání 20‰, 4 vozy činné

Příloha M Brzdná křivka modelu IEEE – jízda do stoupání 20‰

Příloha N Brzdná křivka modelu ERA – jízda do stoupání 40‰, 5 vozů činných

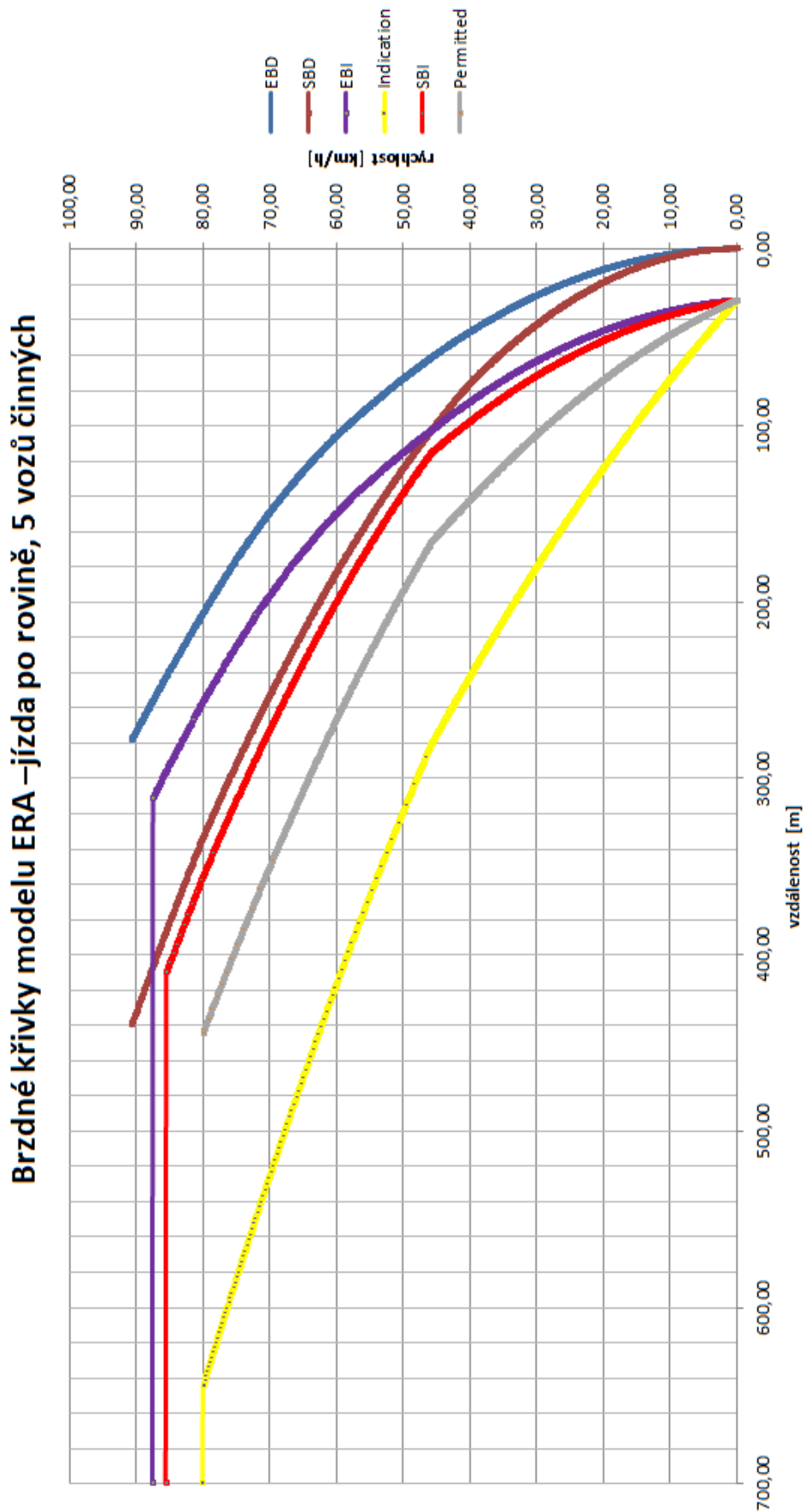
Příloha O Brzdná křivka modelu ERA – jízda do stoupání 40‰, 4 vozy činné

Příloha P Brzdná křivka modelu IEEE – jízda do stoupání 40‰

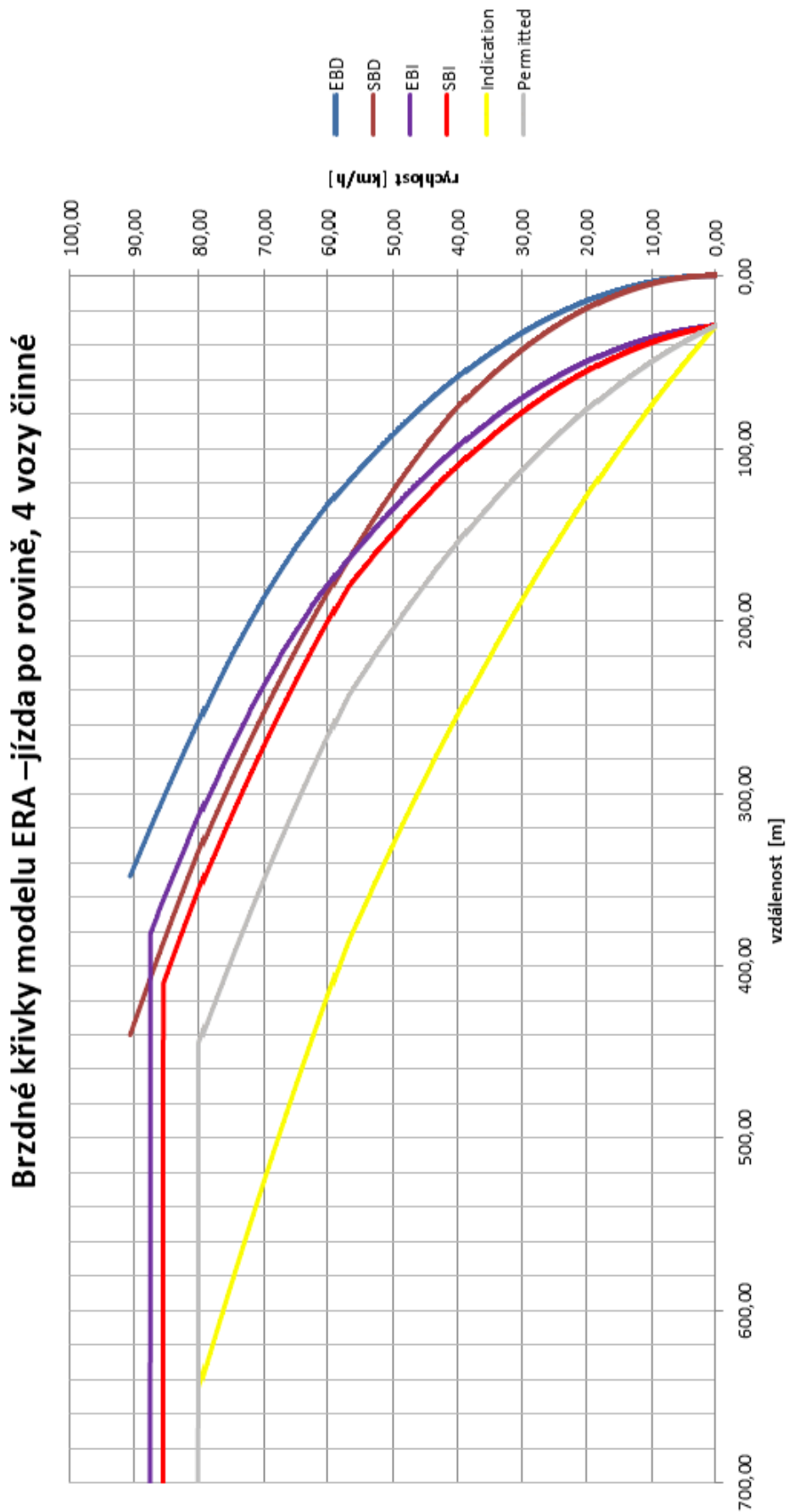
Příloha A Garantované parametry souprav M1 – statické charakteristiky trakce/brzda

v	Elektrická trakce (zrychlení)		Elektrická brzda (odrychlení)	
	[m/s ²]		[m/s ²]	
Km/h	0 os/m ²	8 os/m ²	0 os/m ²	8 os/m ²
0	1,30	1,29	1,38	1,37
2,5	1,30	1,29	1,38	1,37
5	1,30	1,29	1,38	1,37
10	1,30	1,29	1,38	1,37
15	1,30	1,29	1,38	1,37
20	1,30	1,29	1,38	1,37
25	1,30	1,29	1,38	1,37
30	1,30	1,29	1,38	1,37
35	1,11	1,11	1,38	1,37
40	0,98	0,97	1,38	1,37
45	0,87	0,86	1,38	1,37
50	0,78	0,78	1,38	1,37
55	0,71	0,70	1,38	1,37
60	0,65	0,65	1,38	1,37
65	0,60	0,60	1,27	1,26
70	0,56	0,56	1,18	1,18
75	0,52	0,52	1,10	1,10
80	0,49	0,49	1,03	1,03

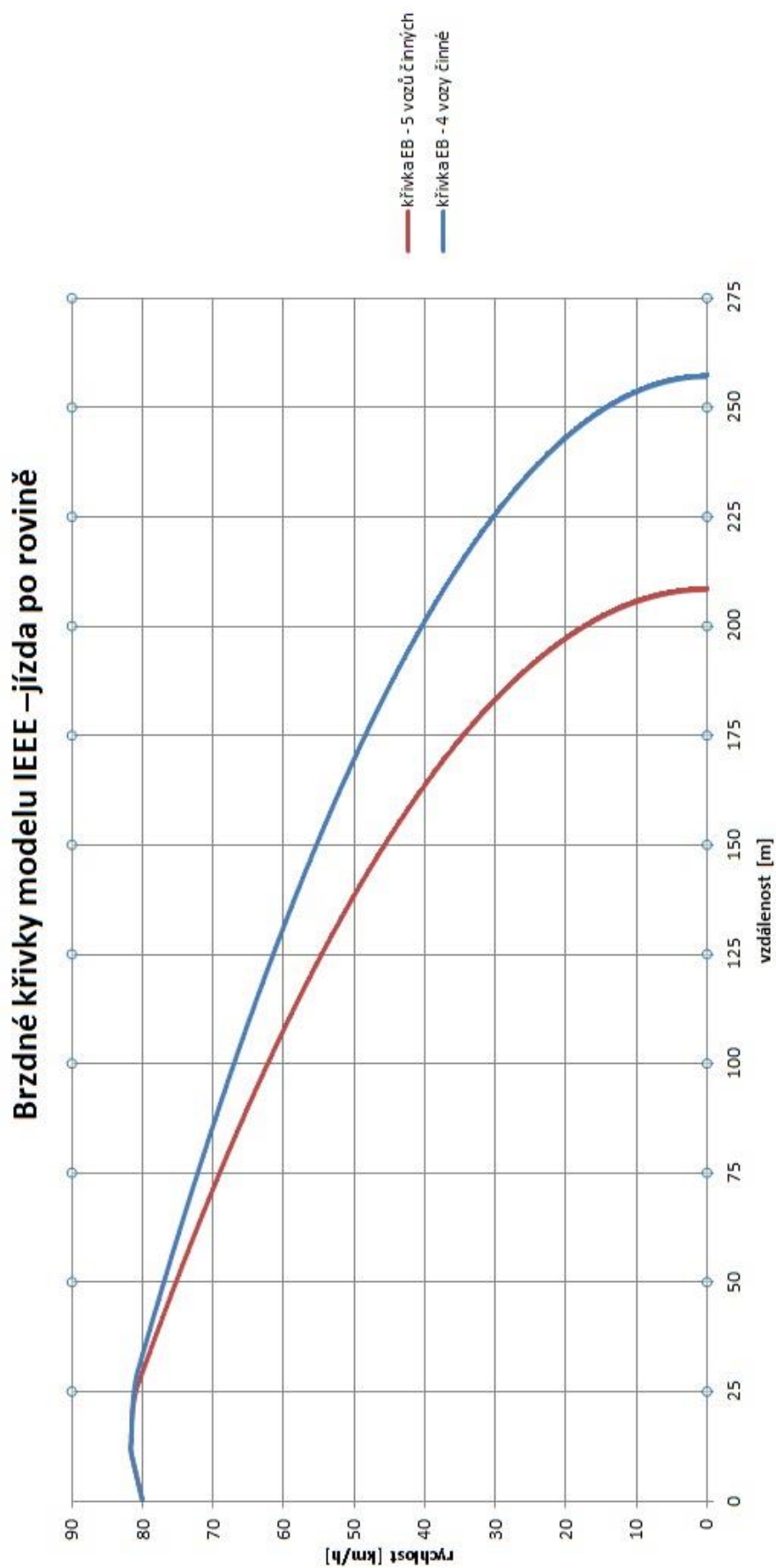
Příloha B Brzdné křivky modelu ERA – jízda po rovině, 5 vozů činných



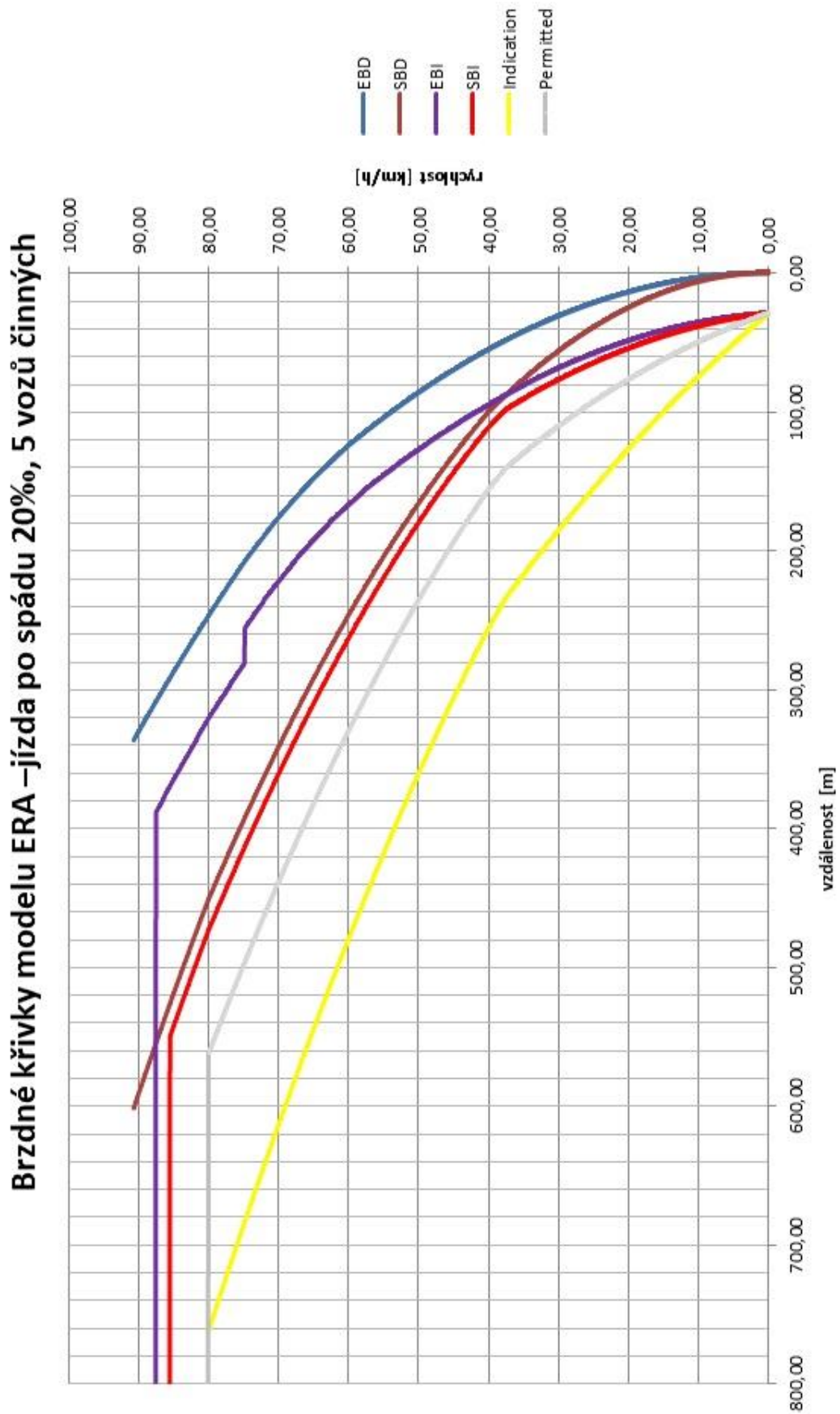
Příloha C Brzdná křivka modelu ERA – jízda po rovině, 4 vozy činné



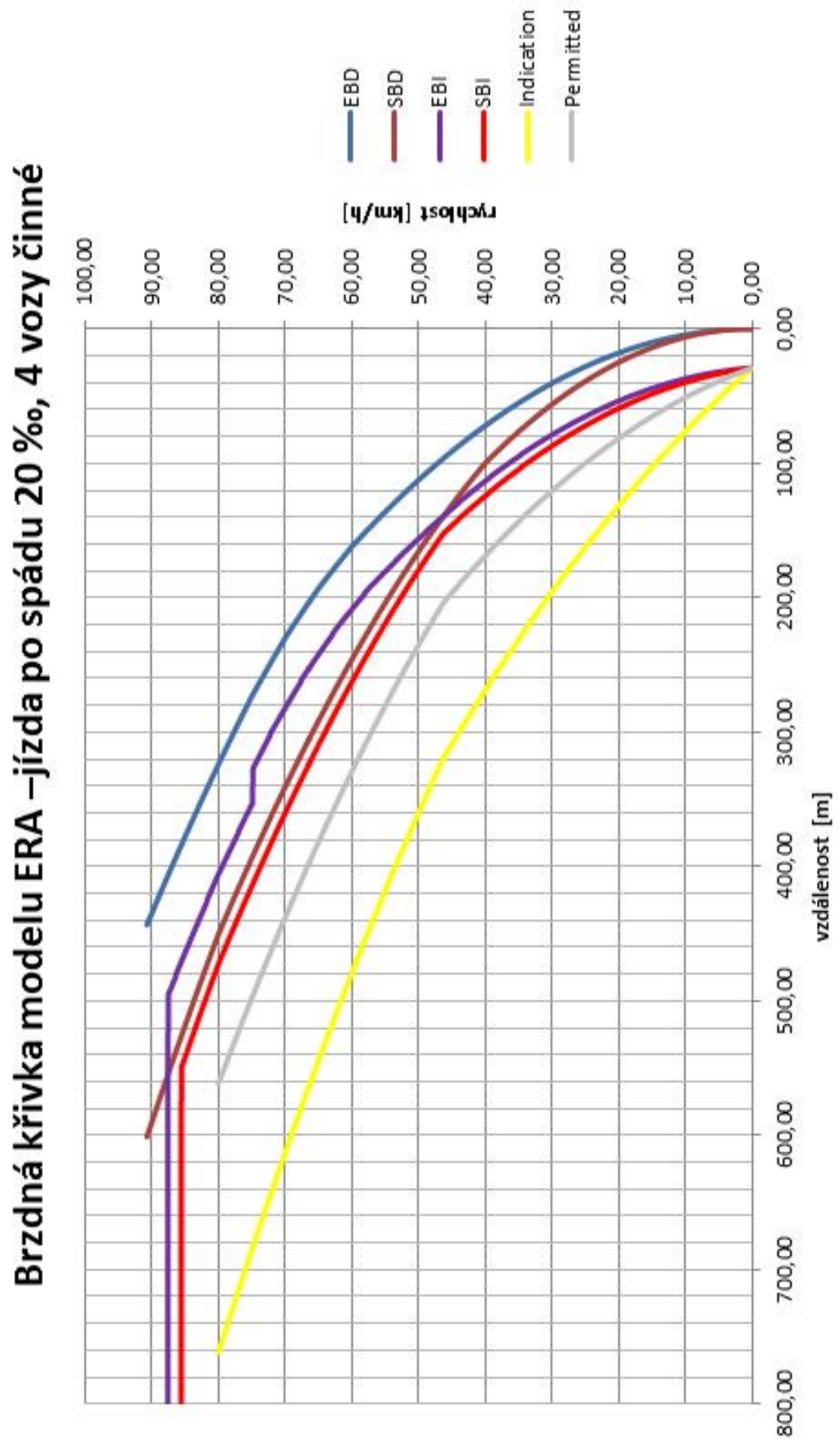
Příloha D Brzdná křivka modelu IEEE – jízda po rovině



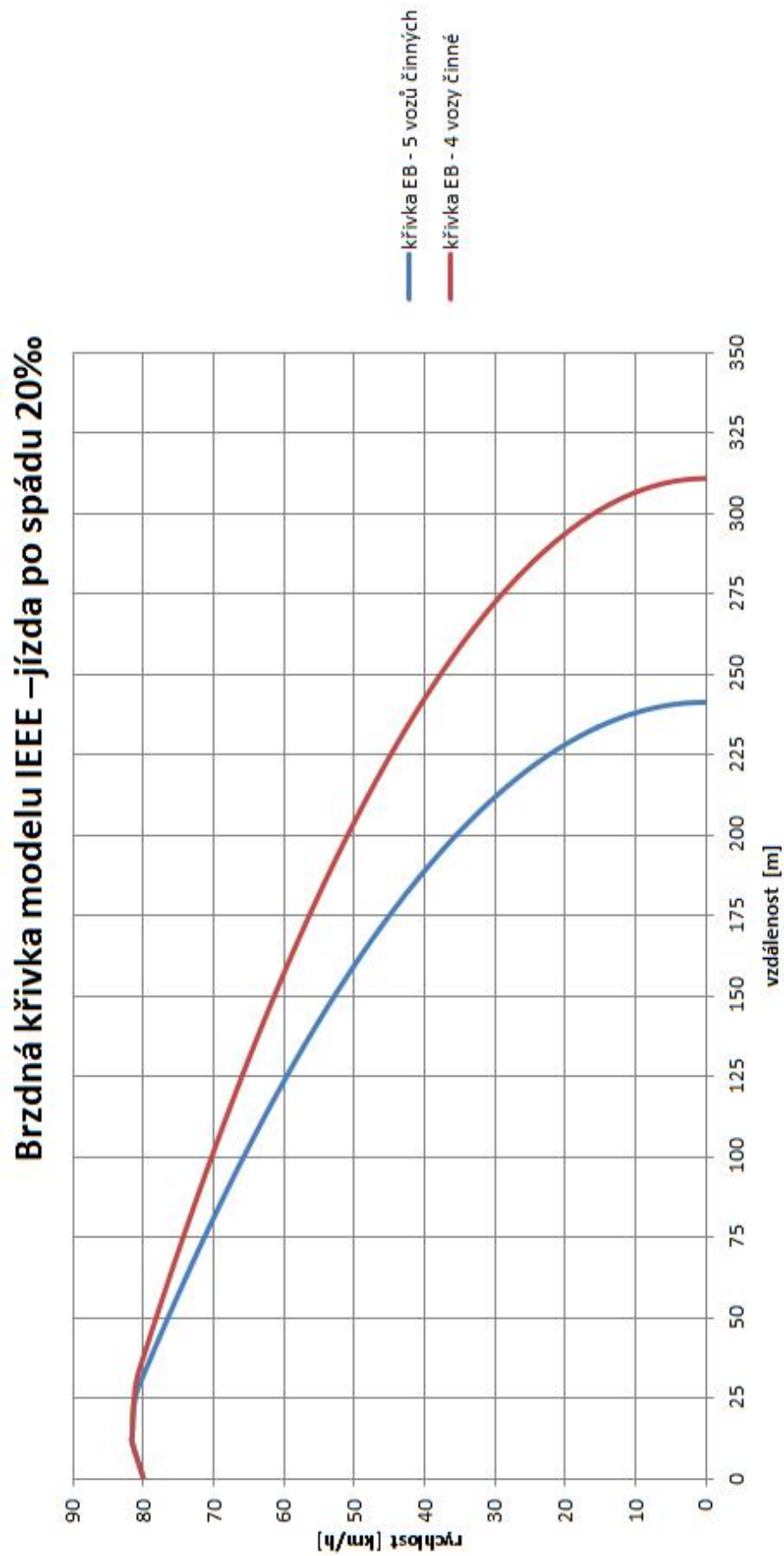
Příloha E Brzdná křivka modelu ERA – jízda po spádu 20‰, 5 vozů činných



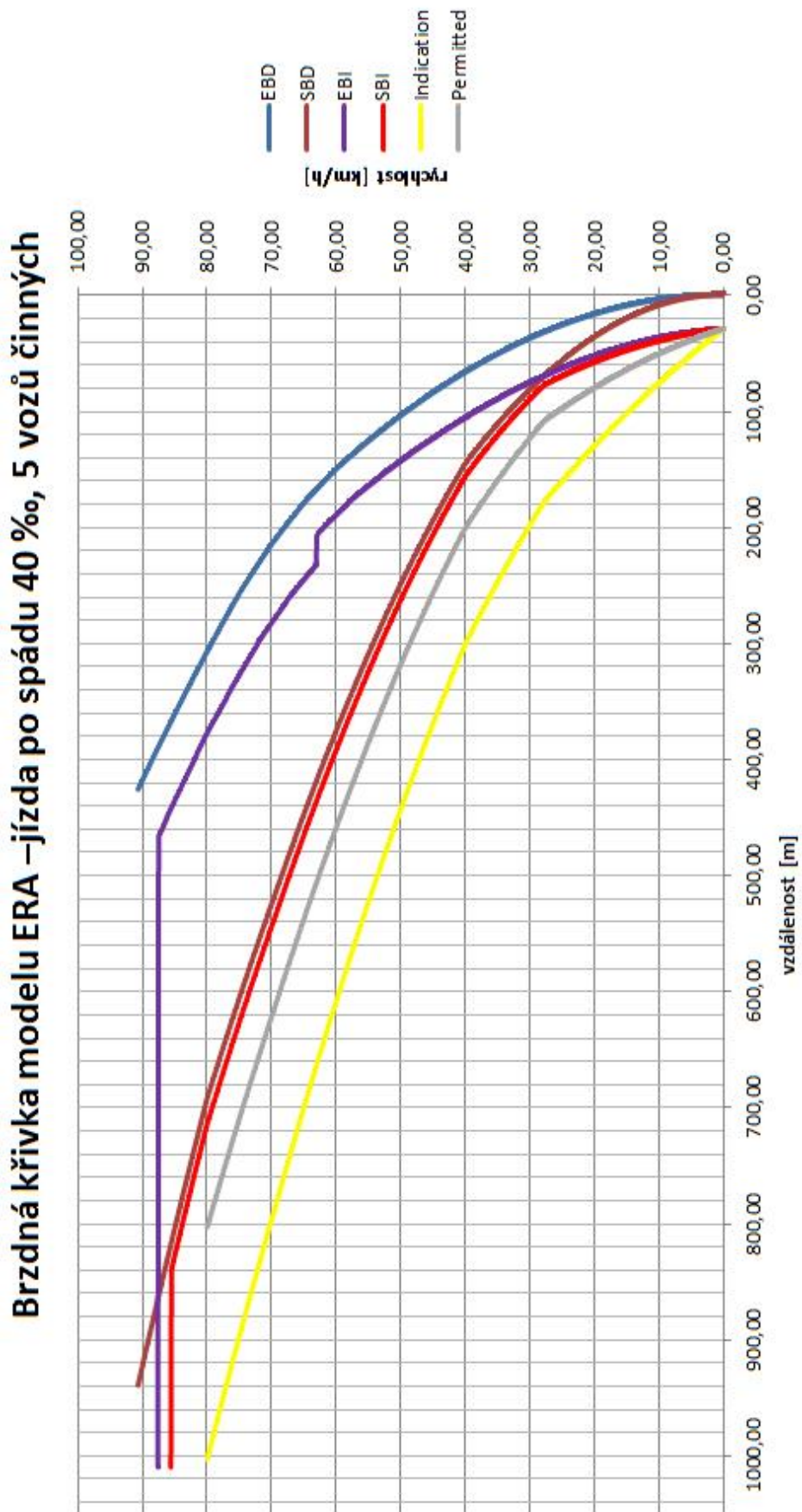
Příloha F Brzdná křivka modelu ERA – jízda po spádu 20%, 4 vozy činné



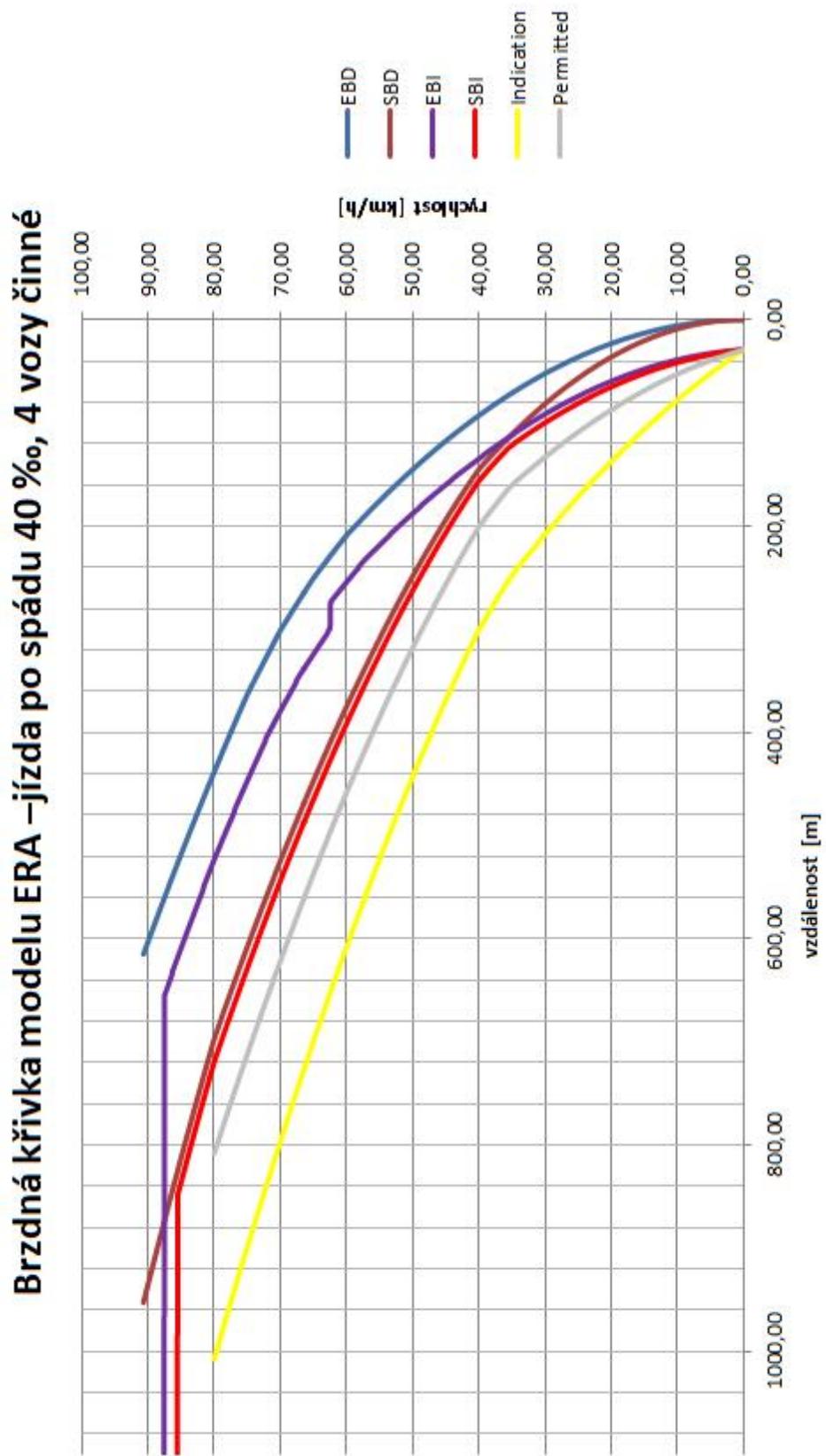
Příloha G Brzdná křivka modelu IEEE – jízda po spádu 20‰



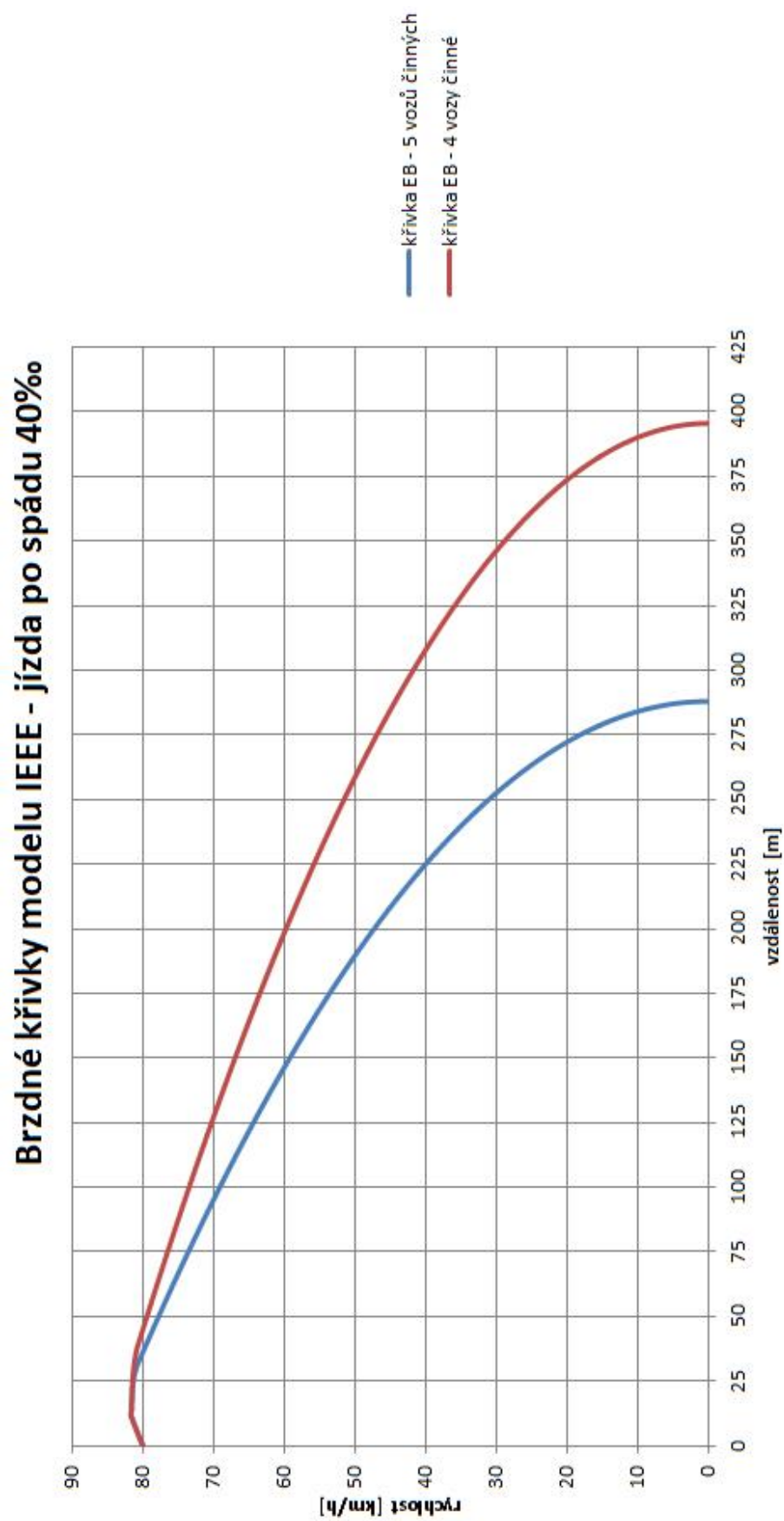
Příloha H Brzdná křivka modelu ERA – jízda po spádu 40‰, 5 vozů činných



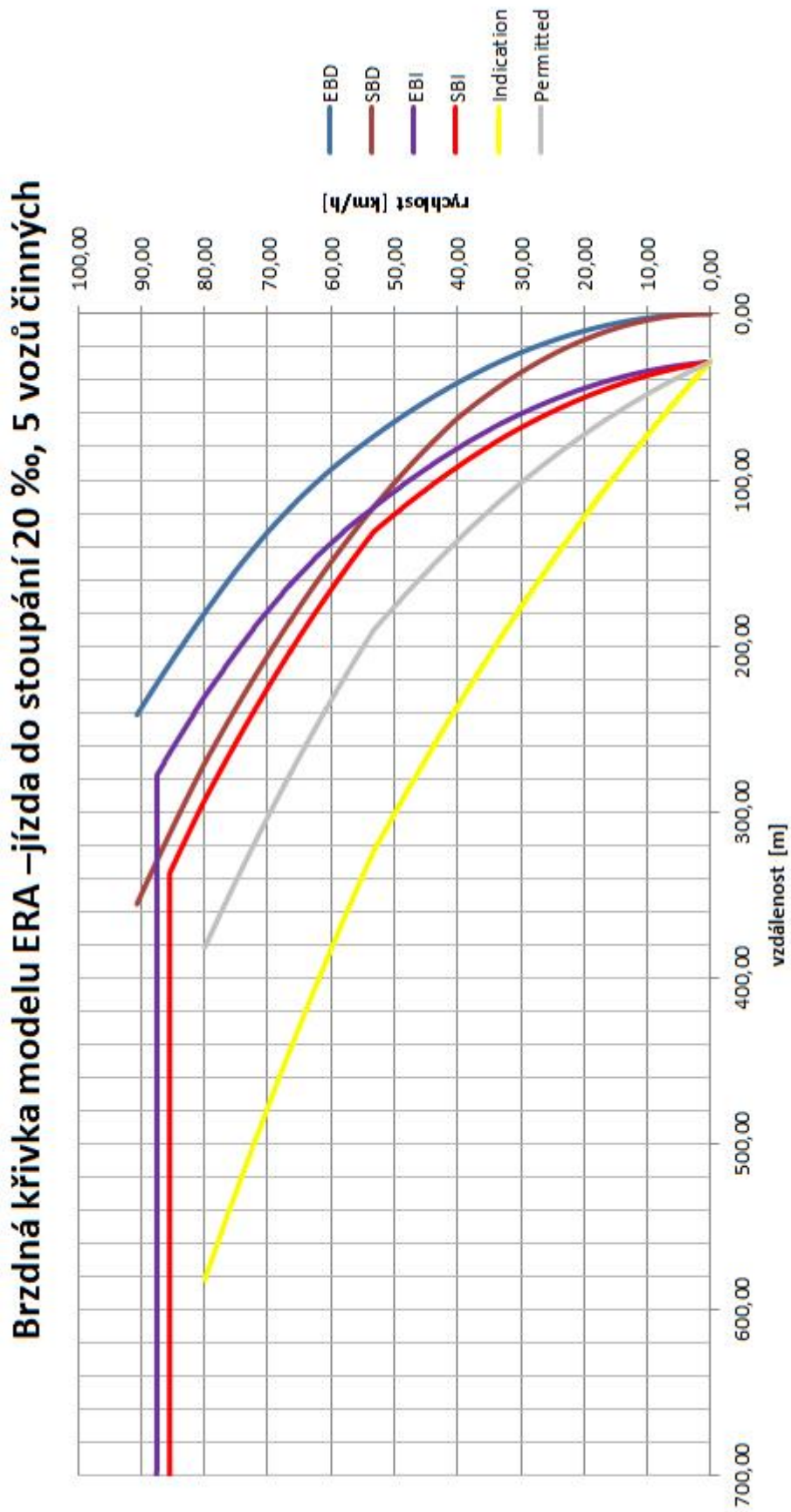
Příloha I Brzdná křivka modelu ERA – jízda po spádu 40‰, 4 vozy činné



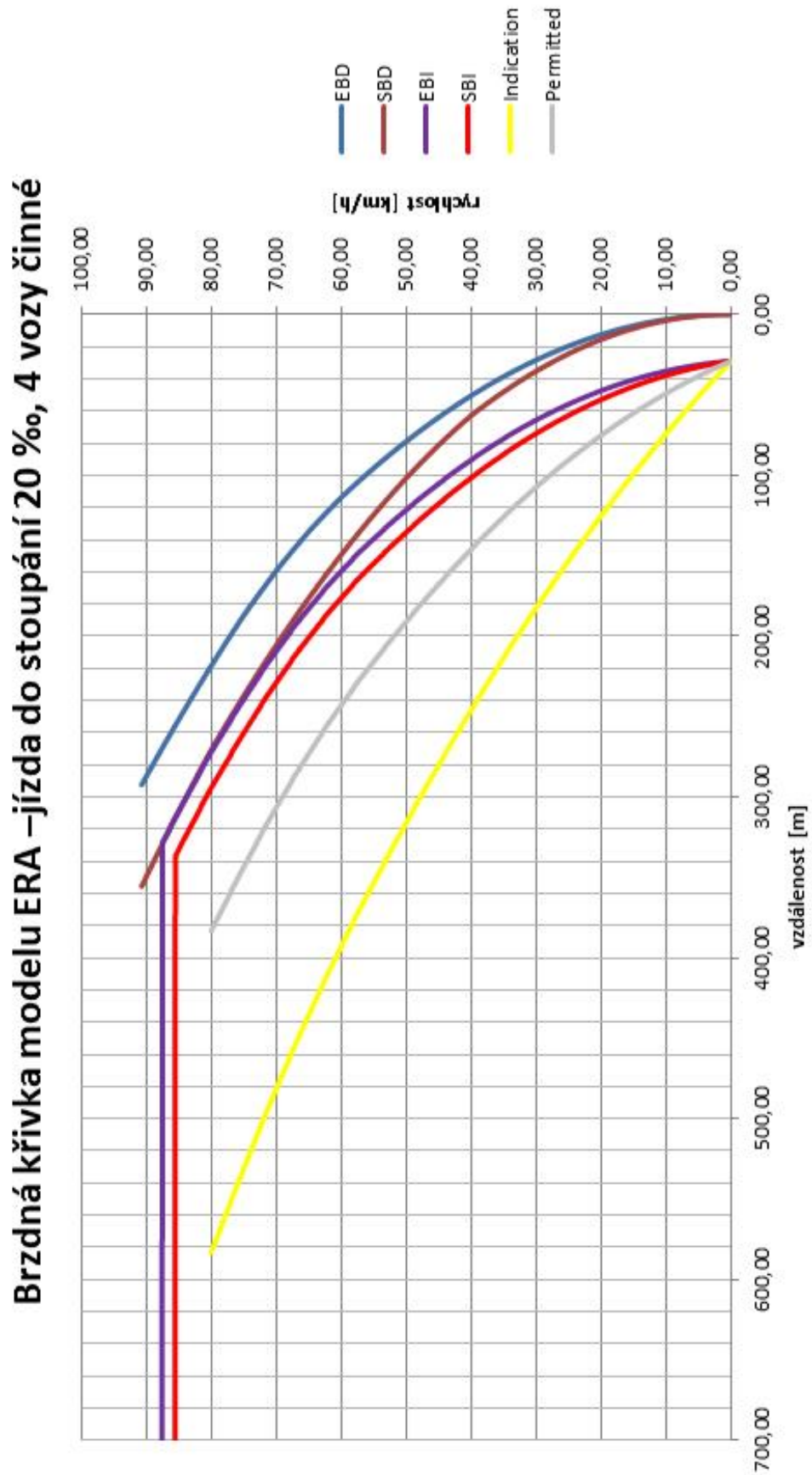
Příloha J Brzdná křivka modelu IEEE – jízda po spádu 40‰



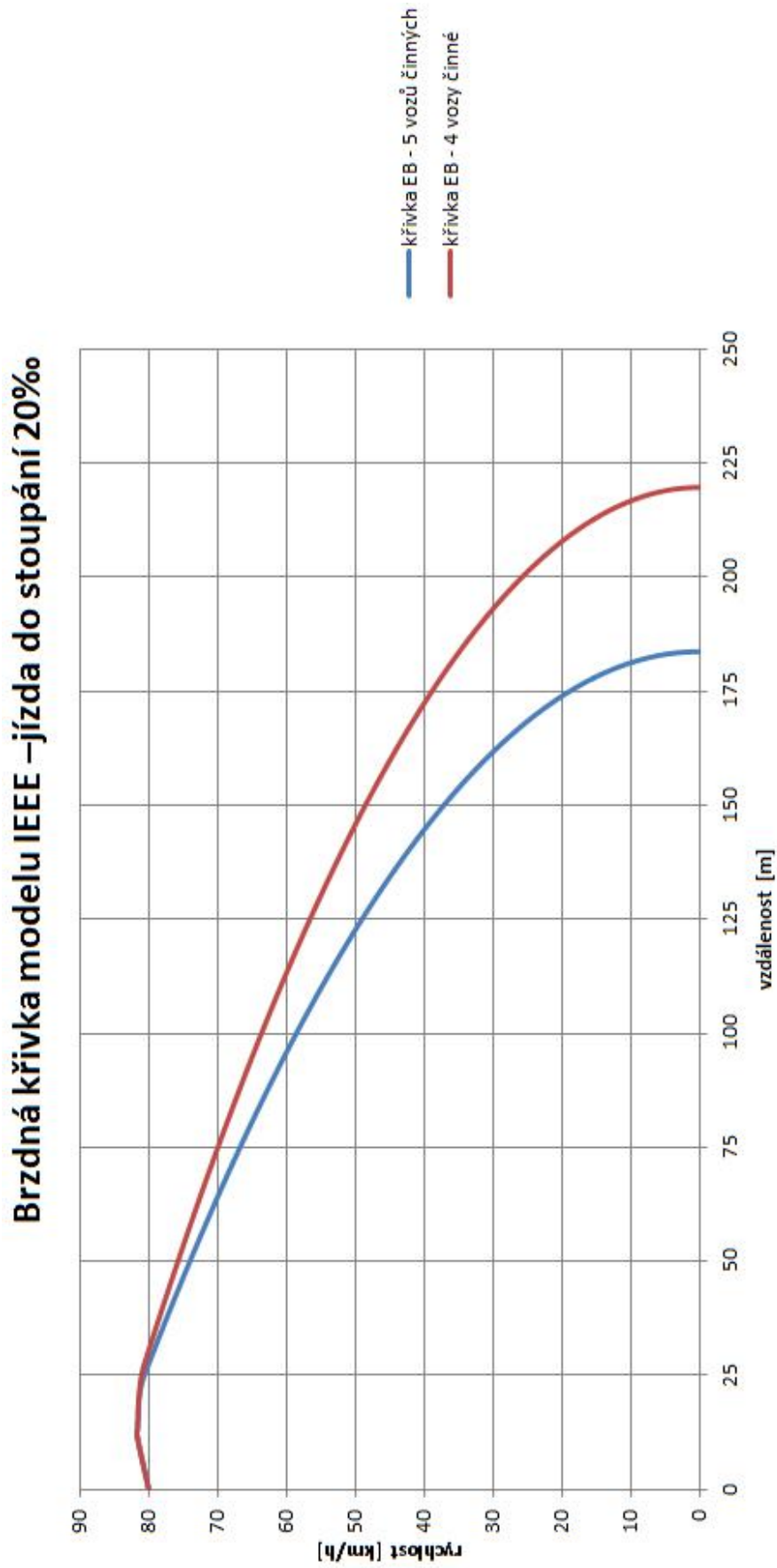
Příloha K Brzdná křivka modelu ERA – jízda do stoupání 20‰, 5 vozů činných



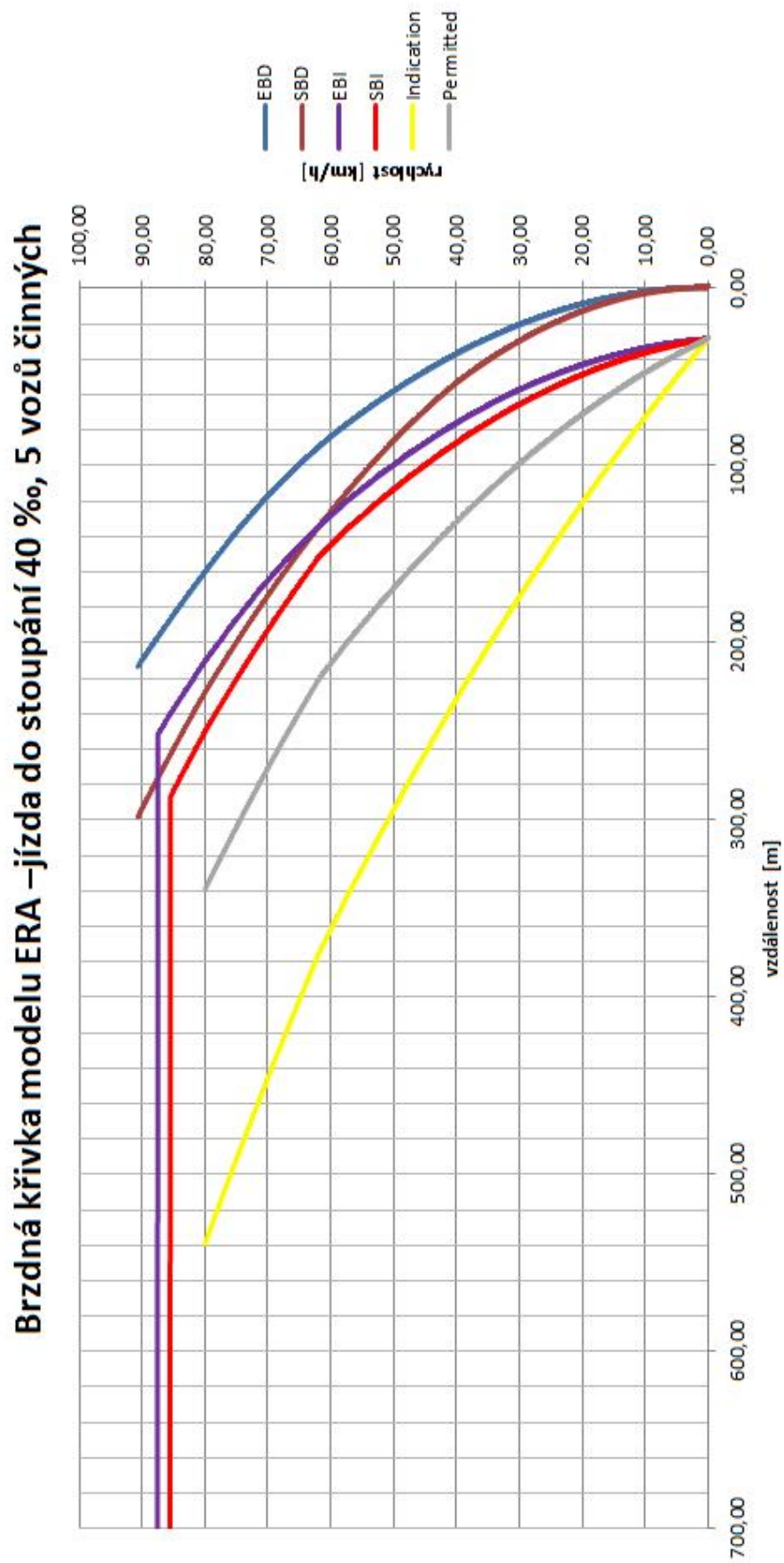
Příloha L Brzdná křivka modelu ERA – jízda do stoupání 20‰, 4 vozy činné



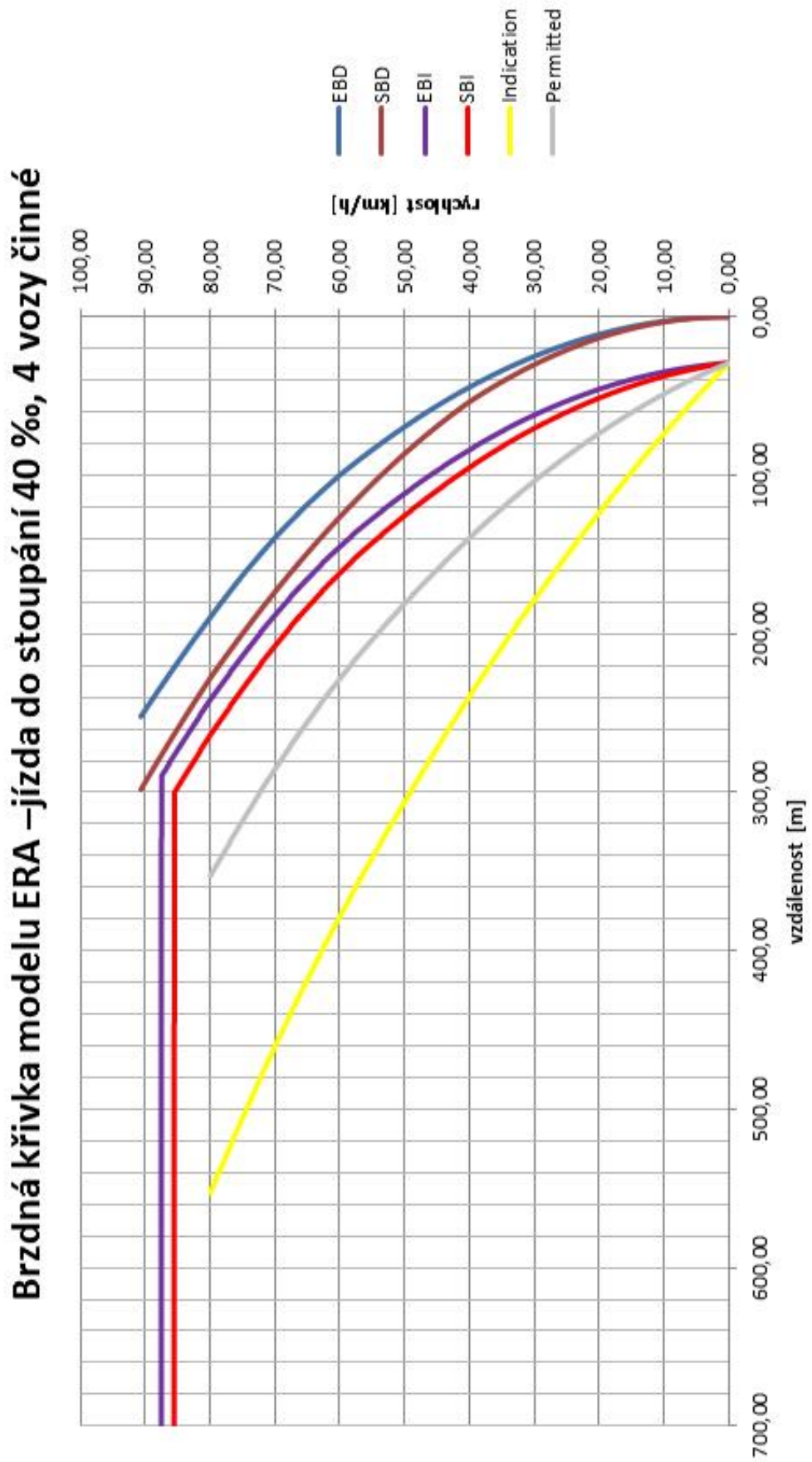
Příloha M Brzdná křivka modelu IEEE – jízda do stoupání 20‰



Příloha N Brzdná křivka modelu ERA – jízda do stoupání 40%, 5 vozů činných



Příloha O Brzdná křivka modelu ERA – jízda do stoupání 40%, 4 vozy činné



Příloha P Brzdná křivka modelu IEEE – jízda do stoupání 40%

