

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

VOJTĚCH BERAN

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vliv výpočtu vozidlových odporů na jízdní dobu vlaku
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Beran, DiS.**
Osobní číslo: **D18596**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Technologie a řízení dopravy: Technologie a řízení dopravních systémů**
Téma práce: **Vliv výpočtu vozidlových odporů na jízdní dobu vlaku**
Zadávací katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

Zásady pro vypracování

Úvod

1. Analýza vozidlových odporů v českém prostředí a v zahraničí
2. Možnosti úpravy výpočtu vozidlových odporů
3. Návrh úpravy předpisu V7
4. Dopady na provozní ukazatele

Závěr

Rozsah pracovní zprávy: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **3-4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MICHÁLEK, Tomáš a Jaromír ZELENKA. Trakční mechanika. Vydání první. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.

JANSA, František. Trakční mechanika a energetika kolejové dopravy: Celost. vysokošk. učebnice : Určeno pro vozební techniky a žel. inženýry a pro projektanty a konstruktéry kolejových vozidel všech druhů. Vydání I. Praha: Dopravní nakladatelství, 1959.

FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY. ČSD V7. Trakční výpočty. Praha: NADAS, 1982.

UIC – INFRASTRUCTURE DEPARTMENT. Train Track Interaction Sector – Aerodynamics. Paris: International Union of Railways (UIC), 2018. ISBN 978-2-7461-2761-6.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Nachtigall, Ph.D.**
Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání bakalářské práce: **1. února 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2021**

L.S.

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

doc. Ing. Jaromír Široký, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Vliv výpočtu vozidlových odporů na jízdní dobu vlaku jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

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

V Havlíčkově Brodě dne 13. 5. 2021

Vojtěch Beran, DiS.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce, Ing. Petru Nachtigalovi, Ph.D., za odborné vedení mé práce a za jeho podnětně připomínky a rady.

Dále bych rád poděkoval všem přátelům a blízkým, kteří mě vždy podporovali v mé zálibě, kterou se stala železniční doprava, i ve studiu tohoto krásného oboru. Zvláště pak děkuji za nekonečnou podporu mojí matce.

ANOTACE

Práce se zabývá vozidlovými odpory, které jsou v prostředí české železnice definovány a počítány dle předpisu, který nebyl posledních 30 let aktualizován, a tedy nereflexuje technický pokrok. Cílem projektu je vytvoření celkového přehledu o způsobu, jak byly vozidlové odpory počítány v minulosti a jak se měnily s aktualizací zmíněného předpisu. Další část práce pak zkoumá, jaký dopad mají případné nové změny na výpočet jízdních dob a další aspekty. Vedle zpřesnění výpočtu jízdních dob, který má přínos pro provozovatele dráhy, ovlivňují vozidlové odpory i výpočty technických normativů zátěže a energie. Jejich zpřesnění pak může mít přínos pro dopravce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vozidlové odpory, jízdní doby, výpočty

TITLE

Influence of vehicle resistance calculation on train running time

ANOTATION

This thesis addresses the issue of vehicle resistances, which are defined and calculated in the Czech railway ambit according to a regulation that has not been updated for the last 30 years, and therefore does not reflect technical progress. The aim of the project is to create an overall overview of how vehicle resistances were calculated in the past and how they changed with the update of the mentioned regulation. The next part of the work examines the impact of any new changes on the calculation of travel times and other aspects, not only shortening theoretical travel times, but also better traffic planning, use of track capacity and increased traffic stability, thanks to more accurate calculations.

KEY WORDS

Vehicle resistances, driving times, calculations

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
ÚVOD	11
1 MATEMATICKÝ MODEL JÍZDY VLAKU	12
1.1 Pohybová rovnice vlaku	12
1.2 Jízdní odpory	13
1.3 Traťové jízdní odpory	13
2 VOZIDLOVÉ ODPORY	15
2.1 Vozidlové odpory v historii	18
2.2 Strahlovy rovnice	20
3 MĚRNÉ VOZIDLOVÉ ODPORY DLE PŘEDPISU V7	24
3.1 Rychlíkové vozy (R)	26
3.2 Vozy se středním nápravovým zatížením (S)	29
3.3 Ložené dvounápravové a čtyřnápravové nákladní vozy (T_2 , T_4)	30
3.4 Prázdné dvounápravové a čtyřnápravové nákladní vozy (U_2 , U_4)	33
3.5 Podíl vozidlových odporů na jízdních odporech	35
4 VLIV VÝPOČTU VOZIDLOVÝCH ODPORŮ NA JÍZDNÍ DOBU	39
4.1 Nedostatky při výpočtu měrných vozidlových odporů	39
4.1.1 Vliv technického stavu vozidel a tratě	39
4.1.2 Vliv aerodynamického odporu	40
4.1.3 Národní odlišnosti výpočtu vozidlových odporů	42
4.1.4 Další vlivy	43
5 MOŽNOSTI ÚPRAVY VÝPOČTU	44
6 MODELOVÝ PŘÍKLAD VLIVU VOZIDLOVÝCH ODPORŮ NA JÍZDNÍ DOBU VLAKU	46
6.1 Vybrané úseky pro modelový příklad	47
6.2 Matematický popis vybraných úseků	49
6.3 Vozidla vybraná pro modelový příklad	51
6.4 Způsob řešení	53
6.5 Způsob zjištění výsledků	56
6.6 Výsledky modelového příkladu	57
6.6.1 Tišnov – Vlkov u Tišnova	58

6.6.2	Choceň – Česká Třebová.....	60
6.6.3	Česká Třebová – Choceň.....	62
6.7	Dopady na provozní ukazatele	64
6.7.1	Maximální hmotnost dopravovaných vozidel	64
6.7.2	Jízdní doby	65
6.7.3	Spotřeba energie	66
7	NÁVRH ÚPRAVY PŘEDPISU V7	70
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	72
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Znáornění složek měrného vozidlového odporu R	17
Obrázek 2 – Podíl složek vozidlového odporu R v závislosti na rychlosti	17
Obrázek 3 – Měrné vozidlové odpory R a S	25
Obrázek 4 – Měrné vozidlové odpory M_2 a M_4	25
Obrázek 5 – Měrné vozidlové odpory T_2 , U_2 , T_4 , U_4	26
Obrázek 6 – Měrné vozidlové odpory R po úpravě V7	28
Obrázek 7 – Měrné vozidlové odpory S po úpravě V7	30
Obrázek 8 – Měrné vozidlové odpory T_2 po úpravě V7	32
Obrázek 9 – Měrné vozidlové odpory T_4 po úpravě V7	32
Obrázek 10 – Měrné vozidlové odpory U_2 a U_4 po úpravě V7	34
Obrázek 11 – podélný profil úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova	48
Obrázek 12 – podélný profil úseku Choceň – Česká Třebová	49
Obrázek 13 – náhradní sklon na úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova	50
Obrázek 14 – náhradní sklon na úseku Choceň – Česká Třebová	50
Obrázek 15 – náhradní sklon na úseku Česká Třebová – Choceň	51
Obrázek 16 – Použitá zjednodušená trakční charakteristika lokomotivy 383	52
Obrázek 17 – dráhový tachograf pro úsek Tišnov – Vlkov u Tišnova	58
Obrázek 18 – podíl vozidlových odporů na celkových odporech v úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova	59
Obrázek 19 – spotřeba trakční energie v úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova	59
Obrázek 20 – dráhový tachograf pro úsek Choceň – Česká Třebová	60
Obrázek 21 – podíl vozidlových odporů na celkových odporech v úseku Choceň – Česká Třebová	61
Obrázek 22 – spotřeba trakční energie v úseku Choceň – Česká Třebová	61
Obrázek 23 – dráhový tachograf pro úsek Česká Třebová - Choceň	62
Obrázek 24 – podíl vozidlových odporů na celkových odporech v úseku Česká Třebová - Choceň	63
Obrázek 25 – spotřeba trakční energie v úseku Česká Třebová – Choceň	63
Obrázek 26 – podíl spotřebované energie na překonávání vozidlových odporů	69
Obrázek 27 – vliv průměrného S_n na průměrný podíl O_v na O_c	69

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – vztahy pro výpočty vozidlových odporů parních lokomotiv.....	18
Tabulka 2 – závislost konstant na počtu spřažených náprav	20
Tabulka 3 – Závislost konstanty C na uspořádání hnacího ústrojí.....	21
Tabulka 4 – Vliv větru.....	21
Tabulka 5 – měrné vozidlové odpory dle typů vozů	24
Tabulka 6 – hodnoty měrného vozidlového odporu R po úpravě V7	27
Tabulka 7 – vybrané hodnoty měrného vozidlového odporu R po úpravě V7	28
Tabulka 8 – hodnoty měrného vozidlového odporu S po úpravě V7.....	29
Tabulka 9 – vybrané hodnoty měrného vozidlového odporu S po úpravě V7.....	29
Tabulka 10 – hodnoty měrného vozidlového odporu T_2 a T_4 po úpravě V7.....	30
Tabulka 11 – vybrané hodnoty měrného vozidlového odporu T_2 a T_4 po úpravě V7.....	31
Tabulka 12 – hodnoty měrného vozidlového odporu T_2 a T_4 po úpravě V7.....	33
Tabulka 13 – vybrané hodnoty měrného vozidlového odporu U_2 a U_4 po úpravě V7	34
Tabulka 14 – Podíl vozidlových odporů R_k na jízdních odporech	36
Tabulka 15 – Podíl vozidlových odporů T_4 na jízdních odporech	37
Tabulka 16 – Hodnoty konstant A_{Ki}	45
Tabulka 17 – Parametry tras.....	47
Tabulka 18 – Sklonové poměry na vybraných úsecích	48
Tabulka 19 – parametry lokomotivy ř. 383	51
Tabulka 20 – parametry vozu Sgnns	52
Tabulka 21 – vztahy pro výpočet vozidlových odporů použité v modelovém příkladu	53
Tabulka 22 – dopravní ukazatele pro úsek Tišnov – Vlkov u Tišnova.....	58
Tabulka 23 – dopravní ukazatele pro úsek Choceň – Česká Třebová.....	60
Tabulka 24 – dopravní ukazatele pro úsek Česká Třebová – Choceň.....	62
Tabulka 25 – Vliv výpočtu TNZ	64
Tabulka 26 – Vliv O_v na spotřebu trakční energie	67

ÚVOD

Tato práce se zabývá vozidlovými odpory, respektive jejich vlivem na jízdní dobu a další aspekty jízdy vlaku, jako je maximální hmotnost dopravovaných vozidel, nebo spotřeba energie. Jízdní odpory jako takové jsou zkoumány odborníky z technických oborů, na DFJP například Katedrou dopravních prostředků a diagnostiky. Vozidlové odpory jsou počítány dle předpisu V7, který je přes 40 let starý a přes 30 let neaktualizovaný. Právě proto je zkoumán způsob výpočtu vozidlových odporů, jejich změna po aktualizaci předpisu a také to, jak se podílejí na celkových odporech.

Cílem bakalářské práce je zjistit, zda má reálný přínos otevřít problematiku výpočtu vozidlových odporů a zda jejich aktualizace a přiblížení jejich matematického vyjádření k realitě bude mít reálné dopady na provoz. Pro dopravce, který by teoreticky, díky přesnějšímu výpočtu, mohl v souladu s výpočtem maximální zátěže přepravit jedním vlakem náklad o větší hmotnosti. Dále může dopravce lépe předpovídat spotřebovanou energii, případně její spotřebu optimalizovat dle spočítané optimální křivky průběhu cílové rychlosti. Provozovatel dráhy může těžit z přesnějších výpočtů jízdních dob.

Toto ověření je v práci realizováno pomocí modelových příkladů. Jejich výsledky a důsledky z nich vyvozené jsou pak shrnuté v kapitole, která se zabývá možností úpravy předpisu V7.

1 MATEMATICKÝ MODEL JÍZDY VLAKU

Modelování jízdy vlaku nachází význam, mimo jiné i při konstrukci grafikonu vlakové dopravy (GVD). Výsledky výpočtu jízdy vlaku pak z pohledu technologie a řízení dopravy udávají zásadní data: maximální rychlost vlaku, jeho zrychlení, tedy jak rychle bude maximální rychlost dosažena, a z toho vyplývající jízdní dobu v daném úseku. Dále také maximální hmotnost vlaku, respektive hmotnost dopravovaných vozidel.

Aby bylo možné matematicky vyjádřit pohyb vozidel, potažmo celého vlaku, pro výpočet jízdní doby, technických normativů hmotnosti vlaku, případně výpočet spotřebované energie, je potřeba sestavit model jízdy vlaku. Ten zahrnuje síly, které působí na vozidla jak ve směru pohybu, tedy tažná síla, tak i proti směru pohybu, tedy síla brzdná a odpory. Matematický model tedy při určitém zjednodušení uvažuje pohyb o jednom stupni volnosti ve směru osy x.

1.1 Pohybová rovnice vlaku

Základní tvar pohybové rovnice vlaku je sestaven dle Newtonova způsobu sestavování pohybových rovnic v následující podobě:

$$m_{vl} \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_{vl} - O_{vl} \quad (1)$$

kde:

- m_{vl} je celková hmotnost vlaku [kg],
- \ddot{x} je zrychlení vlaku ve směru jízdy [$m \cdot s^{-2}$],
- F_{ok} je síla na obvodu kol [N],
- B_{vl} je brzdná síla vlaku na obvodu kol [N],
- O_{vl} je celkový jízdní (vozidlový a traťový) odpor [N] [1].

Při jízdě vlaku zákonitě části vozidel vykonávají také pohyb rotační. Jde o dvojkolí, rotory trakčních motorů, případně i o součásti dobíjecích generátorů u starších vozidel. Aby pohybová rovnice patřičně postihla i přírůstek kinetické energie těchto rotujících těles, je potřeba rozšířit hmotnost vlaku tak, že je ke skutečné hmotnosti vlaku přičten i ekvivalent, který zahrnuje právě kinetickou energii rotujících těles. Úpravou základního tvaru pohybové rovnice (1) je získán obecný tvar pohybové rovnice (2):

$$m_{vl} + (1 + \rho_{vl}) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_{vl} - O_{vl} \quad (2)$$

kde:

- ρ_{vl} je součinitel rotačních hmot.

1.2 Jízdní odpory

Na pravé straně pohybové rovnice se vyskytuje člen O_{vl} , tedy jízdní odpor. Ten na rozdíl od tažné a brzdě síly jako jediný nevzniká úmyslně. Vystupuje se záporným znaménkem, protože působí proti směru pohybu vlaku. Lze jej rozdělit do dvou kategorií, traťové jízdní odpory a vozidlové jízdní odpory.

1.3 Traťové jízdní odpory

Charakteristiky tratě působí fyzikálně na jízdu vozidel. Ačkoli se práce zabývá vozidlovými odpory, je potřeba objasnit i základní problematiku traťových odporů. Ty se totiž společně s vozidlovými odpory vyskytují na pravé straně pohybové rovnice (1) (2) a hnací vozidlo je musí překovávat stejně jako vozidlové odpory. Jediný rozdíl je v podstatě vzniku odporu, proto budou přiblíženy jen velmi stručně dle Trakční mechaniky [1]. V konečném důsledku je v matematickém modelu uvažován součet traťových odporů, který nerozlišuje jejich původ.

Odpor ze sklonu koleje vzniká, pokud kolej není přímá a má tedy určitý nenulový sklon, který se udává v železničním prostředí v promile [‰], tedy v jednotce, která vyjadřuje změnu výšky koleje v [m] na 1 km délky koleje. Výsledný O_s [kN] je pak dán vztahem (3). Vztah (4) pak udává měrný odpor ze sklonu o_s v $[N \cdot kN^{-1}]$.

$$O_s = G \cdot \sin \alpha \approx G \cdot \operatorname{tg} \alpha = m \cdot g \cdot \frac{S}{1000} \quad (3)$$

kde:

- m je celková hmotnost vlaku [kg],
- g je gravitační konstanta (9,81) $[m \cdot s^{-2}]$,
- α je úhel sklonu trati $[^\circ]$
- S je podélný sklon tratě [‰].

$$o_s = \frac{O_s}{G} = S \quad (4)$$

U odporu ze sklonu koleje dochází také k situaci, kdy vozidlo jede po spádu, tedy kolej má záporný sklon. V takovém případě nabývá O_s záporných hodnot a síla nepůsobí ve směru osy x proti směru jízdy vlaku, ale naopak ve směru, čímž má prakticky stejný účinek jako F_{ok} , ale s tím rozdílem, že tato síla vniká neúmyslně, nekontrolovatelně a účinek této síly může být kontrolován B_{vl} .

Odpor z jízdy obloukem je komplikovanější záležitost, protože v tomto případě nezáleží pouze na poloměru oblouku R [m]. Svojí roli hraje také konstrukce vozidla, rozteč náprav, úhel náběhu dvojkolí a velikost řídicí síly. Pro potřeby této práce ale postačí tvar (5) měrného odporu z jízdy obloukem O_R [$N \cdot kN^{-1}$], jak je uváděn v literatuře [1].

$$O_R = \frac{600}{R} \quad (5)$$

Posledním uvažovaným odporem je odpor z jízdy tunelem. I zde jde o komplikovanou záležitost, která vychází z proudění vzduchu kolem vozidel a tím, jak se toto proudění mění v tunelu, tedy v prostředí, kde se tlakové vlny vzduchu nemohou pohybovat volně, ale jsou omezeny specifickým prostředím tunelu. I zde si tato práce postačí s prostým vysvětlením, že jde o přičtení hodnoty O_t [$N \cdot kN^{-1}$], v rozsahu 1 až 2 $N \cdot kN^{-1}$, podle toho, zda je tunel jednokolejný, nebo dvoukolejný. Přičemž získání jeho přesné hodnoty je komplikovanou záležitostí přesahující rozsah této práce.

Jednotlivé traťové odpory vystupují rovněž společně, například pokud je trať ve stoupání a zároveň v oblouku. Jak již bylo uvedeno výše, pro výpočet pohybové rovnice není podstatný vznik traťových odporů. Pro zjednodušení se zavádí (6) náhradní sklon S_n , který sčítá působení jednotlivých traťových odporů a udává je jako myšlený sklon [%]. Tento sklon je pak roven traťovému odporu O_T .

$$S_n = O_T = O_s + O_R + O_t \quad (6)$$

2 VOZIDLOVÉ ODPORY

Vozidlové odpory závisí na konstrukci vozidla a jeho aktuálním technickém stavu. Rozdělit je lze do následujících kategorií, přičemž vozidlo nemusí vykazovat vždy všechny odpory současně:

- odpor v ložiskách,
- odpor prostředí,
- odpor z neklidné jízdy,
- odpor z valení,
- odpor nedokonale odlehlých brzdových zdrží,
- odpor nabíjecího generátoru,
- výběhový odpor hnacího vozidla.

Součet jednotlivých členů pak představuje celkový jízdní odpor vlaku. Pro zjednodušení výpočtu trakčních odporů i pro porovnání měrných odporů mezi jednotlivými druhy vozidel se používá měrný vozidlový odpor (O_V). Tento vztah byl sestaven již ve 20. letech 20. století v USA a nazývá se Davisův vzorec (7). Udáván je v obecném tvaru, kde je závislost měrného odporu na rychlosti [1], pomocí něj jsou vypočítány celkové vozidlové odpory:

$$O_V = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad (7)$$

kde:

- O_V je celkový vozidlový odpor [kN],
- konstanta A představuje odpor v ložiskách [N],
- konstanta B představuje odpor z neklidné jízdy [$N \cdot h \cdot km^{-1}$],
- konstanta C představuje odpor prostředí [$N \cdot h^2 \cdot km^{-2}$],
- V je rychlost [$km \cdot h^{-1}$].

Ve výpočtech jsou vozidlové odpory uvažovány v měrné podobě (o_v) (8), tedy bez násobením hmotností vozidel a gravitačním zrychlením:

$$o_v = \frac{O_v}{G_v} = \frac{O_v}{M \cdot g} = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (8)$$

kde:

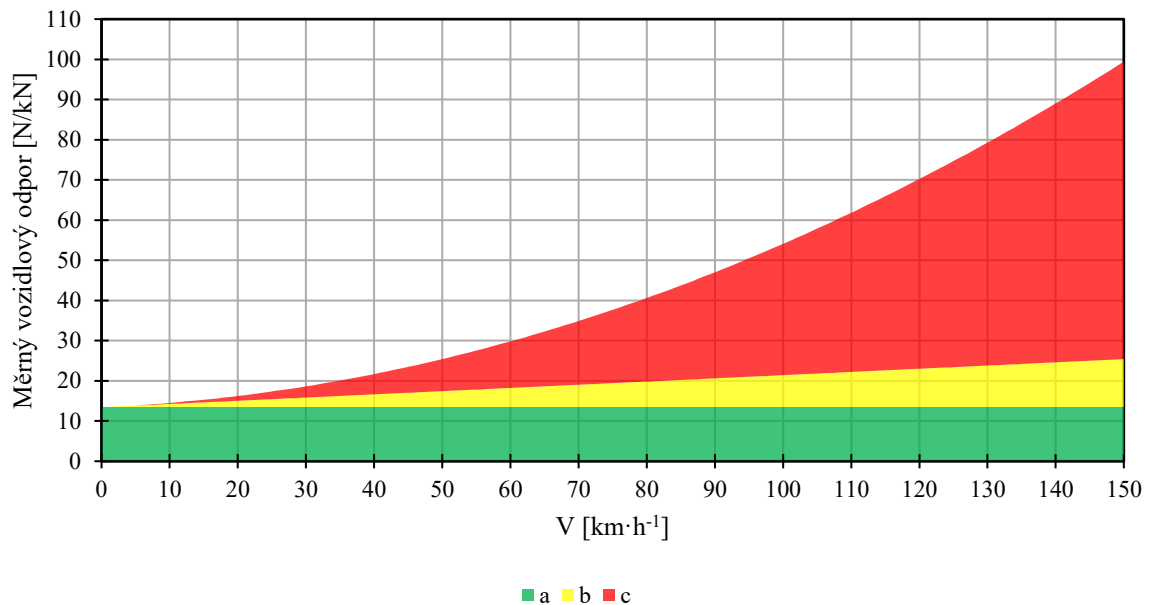
- o_v je měrný vozidlový odpor [$\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$],
- G_v je tíha vozidla [kN],
- M je hmotnost vozidla [t],
- g je tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
- a je měrné vyjádření koeficientu A [$\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$],
- b je měrné vyjádření koeficientu B [$\text{Nk} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h} \cdot \text{km}^{-1}$],
- c je měrné vyjádření koeficientu C [$\text{Nk} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h}^2 \cdot \text{km}^{-2}$].

Jak již bylo uvedeno, dílčí vozidlové odpory jsou závislé na konstrukci vozidla a na jeho aktuálním technickém stavu. Valivý odpor i odpor prostředí vykazují značně proměnlivé, mnohdy i náhodné hodnoty, které jsou v praxi zjištěné pro jednotlivé druhy vozidel. Zjišťovány jsou experimentálně, tzv. výběhovou zkouškou, během které není vozidlo (zpravidla ale celý vlak) urychlováno a levá strana rovnice je rovna nule. Zaznamenávána je rychlost v závislosti na ujeté dráze. Po odečtení traťových odporů jsou získány hodnoty vozidlových odporů pro konkrétní jízdu. Zpravidla probíhá více měření, získanými hodnotami se poté proloží křivka pomocí metody nejmenších čtverců a tím je zjištěn vztah pro konkrétní vozidlo.

Grafické znázornění podílu jednotlivých složek je zobrazeno pomocí obrázku 1, konkrétně pro případ čtyřnápravových osobních vozů (w_R) [2]. Odpor v ložiskách je nezávislý na rychlosti a je konstantní, odpor z neklidné jízdy roste úměrně s rychlostí a odpor prostředí roste s kvadrátem rychlosti a v tomto případě se zhruba od rychlosti $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ podílí většinou na celkovém odporu vozidla. Tuto skutečnost dokresluje obrázek 2.

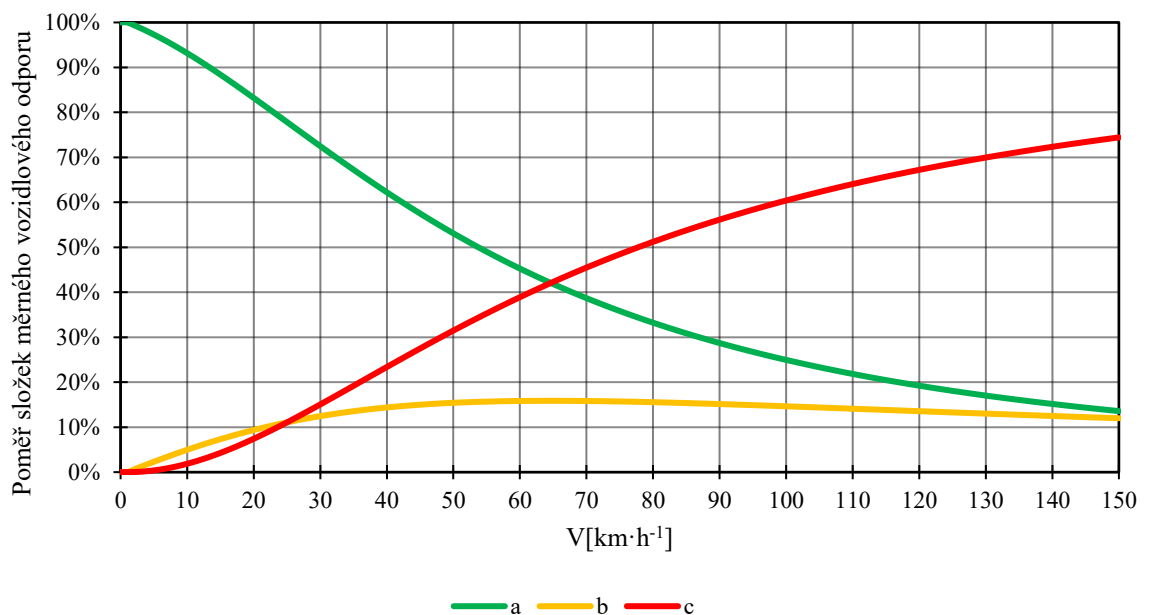
Vozidlové odpory jsou řešeny také u jiných druhů dopravy, respektive dopravních prostředků. U silničních vozidel jsou odpory konstantní (valivý odpor, odpor stoupání, odpor přívěsu atd.), pouze odpor vzduchu roste také s druhou mocninou, a proto je při konstrukci vozidla věnována velká pozornost aerodynamickému tvaru vozidla. U plavidel je odpor specifický tím, že plavidlo z části čelí odporu vody a z části odporu vzduchu. Plavidla se

pohybují menšími rychlostmi, proto se nemusí odpor vzduchu zdát tak velký, ovšem velké námořní lodě mají velkou plochu, do které se může opírat vítr, a tak vznikají rovněž značné odpory, které musí lodě překonávat. Případně mohou být i vychýleny z plánovaného kurzu.



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 1 – Znáornění složek měrného vozidlového odporu R



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 2 – Podíl složek vozidlového odporu R v závislosti na rychlosti

2.1 Vozidlové odpory v historii

Vozidlové odpory byly zkoumány již v době konstrukce a provozu parních lokomotiv, kdy konstruktéři potřebovali znát, jaké odpory bude muset lokomotiva trvale překonávat. Tato zjištěná hodnota byla pak jakousi přírážkou, která byla přičítána k celkovému potřebnému výkonu lokomotivy, respektive jejího kotle. U parních lokomotiv byl parní kotel jediným zdrojem energie, avšak energie z tohoto jediného zdroje nebyla využita pouze k vývinu tažné síly. Výkon kotle byl spotřebováván mimo jiné také kompresorem, turbodynamem, nebo parním topením u osobních vozů. Celkový potřebný výkon pak značně ovlivňoval konstrukční parametry lokomotiv, a tedy i jejich rozměry. Prvotní motivací pro výpočet vozidlových odporů tedy nebyl pro účely dopravně technologické, ale pro účely konstrukční. Vozidlové odpory pak byly kategorizovány v literatuře [3] jako odpor při jízdě na přímé vodorovné trati, odpor při jízdě do stoupání, odpor při projíždění oblouku. Tedy odpor ze sklonu koleje, (3), a odpor z jízdy obloukem, dle vztahu (5), byly posuzovány jako vozidlové odpory, ne jako traťové odpory, tak jak jsou definovány dnes, jak uvádí Trakční mechanika [1].

Podoba vztahů pro jednotlivé měrné odpory se pak lišila dle tratí, na kterých byly dané vlaky provozovány, nebo typu lokomotiv. Například i pro stavební a lesní dráhy, hlavní a podružné tratě dle rozsahu rychlostí (malá, střední, vyšší a velká), či typu lokomotiv. Používanou jednotkou byl $[\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}]$, tedy obdobně jako u Davisova vztahu (8), avšak vztah není násoben gravitačním zrychlením.

Tabulka 1 – vztahy pro výpočty vozidlových odporů parních lokomotiv

Při malých a středních rychlostech (Clarkova rovnice)	$o_v = 2,4 + \frac{V^2}{1000}$
Při středních rychlostech (Erfurtská rovnice)	$o_v = 2,4 + \frac{V^2}{1300}$
Při vyšších rychlostech (Borrieseova rovnice)	$o_v = 1,6 + 0,3 \cdot V + \frac{V + 50}{1000}$
Při velkých rychlostech (Barbierova rovnice)	$o_v = 1,6 + 0,456 \cdot V + \frac{V + 10}{1000}$

Zdroj: [3]

Z rovnic uvedených v tabulce vyplývají určité rozpory vzhledem k obecnému tvaru vozidlových odporů (7). Paradoxně je odpor prostředí (tedy kvadrát rychlosti) uvažován při malých a středních rychlostech, ale při vyšších a velkých již ne. Navíc není ani stanoven rozsah daných rychlostí. Rovněž bylo uvedeno, že konstanta a představuje odpor v ložiskách. Ten by se dle uvedených rovnic měnil na témže vozidle dle toho, při jaké rychlosti jede.

Vztahy jsou ale poplatné době vzniku, tedy jednak technice, se kterou bylo možné provádět měření, ale také charakteristikami, kterými se vykazují parní lokomotivy. V jejich případě by měla být zohledněna další kinetická energie, kterou působí pohyblivé části pohonu parní lokomotivy, jako jsou například šoupátka, ojnice, spojnice, kulisy a jejich případná protizávaží. V důsledku toho nemusí platit vyjádření konstant A , B a C v Davisově vztahu (7), protože tyto konstanty nepostihují všechny vlivy vozidlových odporů.

Vztah (9) dle Sanzinze [$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$] [3], na rozdíl od předchozích již přímo zohledňuje poměr spřažených náprav, čelní plochu lokomotivy a také podstatnou složku vztahu, kterou je hmotnost lokomotivy:

$$o_v = \frac{0,006 \cdot F \cdot V^2 + L_1(1,8 + 0,015 \cdot V) + L_2 \cdot (a + b \cdot \frac{V^2}{D})}{L} \quad (9)$$

kde:

- F je čelní plocha lokomotivy [m^2],
- V je rychlost [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$],
- L_1 je hmotnost lokomotivy na běžných nápravách a hmotnost tendru [t],
- L_2 je hmotnost na nápravy hnací a spřažené [t],
- L je součet L_1 a L_2 [t],
- D je průměr spřažených kol lokomotivy [m],
- konstanty a ; b jsou závislé na poměru spřažených náprav:

Tabulka 2 – závislost konstant na počtu spřažených náprav

Počet náprav	Konstanta a	Konstanta b
2	5,5	0,08
3	7,0	0,10
4	8,0	0,28
5	8,8	0,36
6	9,4	0,39

Zdroj: [3]

V praxi však tato rovnice vykazovala vysoké hodnoty, vozidlové odpory ale byly odvozovány pro výpočet výkonu, který bude lokomotiva trvale překonávat během jízdy, ne pro potřebu výpočtu normativu zátěže nebo jízdních dob. Proto při konstrukci lokomotiv nevadilo, že dle výpočtů vychází vozidlové odpory výrazně vyšší, než jaké pak byly v praxi, vypočítaný celkový potřebný výkon pak pracoval s určitou rezervou.

Uvažované rychlosti dosahovaly v počátcích výzkumu hodnot kolem $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, ale již v roce 1903 dosáhl experimentální eklektický vůz Siemens/AEG rychlosti $206,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, tedy rychlosti, kterou dodnes předpis V7 [2] ani neuvažuje.

2.2 Strahlovy rovnice

Velmi používanými, pro výpočet vozidlových odporů se ve své době staly Strahlovy rovnice:

$$o_v = 2,5 \cdot L_1 + C \cdot L_2 + 0,6 \cdot F \cdot \left(\frac{V + \Delta V}{10} \right)^2 \quad (10)$$

kde:

- L_1 je hmotnost lokomotivy na běžných nápravách a hmotnost tendru [t],
- L_2 je hmotnost na nápravy hnací a spřažené [t],
- L je součet L_1 a L_2 [t],
- C je konstanta závislá na uspořádání hnacího ústrojí [-] dle:

Tabulka 3 – Závislost konstanty C na uspořádání hnacího ústrojí

Počet spřažených náprav	Počet válců		
	2	3	4
2	5,8	5,9	6,0
3	7,3	7,4	7,5
4	8,4	8,5	8,6
5	9,3	9,4	9,5
6	10,0	10,15	10,3

Zdroj: [3]

- F je čelní plocha lokomotivy [m^2],
- V je rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$],
- ΔV je vliv větru [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$], dle:

Tabulka 4 – Vliv větru

ΔV	Povětrnostní podmínky	Poznámka
0	bezvětrí	velmi zřídka
12	střední vítr ze strany	nejčastější případ
20	silný vítr ze strany/ šikmo zepředu	
30	trvajících bouře a velmi silný vítr	

Zdroj: [3]

Na rozdíl od Sanzinzova vztahu (9), Strahlova rovnice (10) neuvažuje pouze počet spřažených náprav, ale také počet válců lokomotiv a samotnou hmotnost lokomotivy. S rostoucí hmotností rostl i odpor v ložiskách, která byla v době provozu parních lokomotiv zpravidla kluzná a měla tedy podstatně větší odpor než v současnosti používaná ložiska valivá. V důsledku používání kluzných ložisek byl uvažován i tzv. „odpor z klidu“ [4]. Ten vznikl z důvodu stání vozidla, kdy nedocházelo k rotaci čepů, a tedy k mazání plochy kluzného ložiska. Následně po rozjezdu, než se vrstva oleje rotací čepu opět roznesla po kontaktních plochách, vykazovala vozidla při nízkých rychlostech vyšší hodnoty odporu v ložiskách. Podle

výsledků zkoušek mohl tento odpor dosahovat 20 až 25 kg·t⁻¹, oproti tomu valivá ložiska vykazovala odpor přibližně poloviční, tedy 10 až 12 kg·t⁻¹.

Naopak se v rovnici nevyskytuje člen představující průměr kol lokomotivy. Strahl však již členem ΔV postihuje problematiku odporu prostředí, respektive fakt, že prostředí, vzduch, není statické a uvažuje vliv větru, respektive jakým směrem a jakou rychlostí vítr vane.

Nově formulované Strahlovy rovnice, udávající výsledný vozidlový odpor [N], používané dnes v německy mluvících zemích, jsou zavedené zvlášť pro:

- trakční (hnací) vozidla R_{RT} ,
- osobní vozy R_{RP} ,
- nákladní vozy R_{RF} .

Dle následujících vztahů:

$$R_{RT} = g \cdot \left\{ \left[f_l \cdot \frac{m_T}{1000} \right] + \left[k_{St1} \cdot ((v + \Delta v) \cdot 3,6)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

$$R_{RP} = g \cdot \left\{ \left[1,9 \cdot \frac{m_W}{1000} \right] + \left[k_{Sa1} \cdot v \cdot 3,6 \cdot \frac{m_W}{1000} \right] + \left[k_{Sa2} \cdot (n + 2,7) \cdot ((v + \Delta v) \cdot 3,6)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

$$R_{RF} = g \cdot \frac{m_w}{1000} \cdot \left[2,2 - \frac{k_{St2}}{v \cdot 3,6 + k_{St3}} + k_{St4} \cdot (v \cdot 3,6)^2 \right] \quad (13)$$

kde:

- g je gravitační konstanta (9,81) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
- m_T je hmotnost trakčního vozidla [kg],
- m_W je hmotnost tažených vozů [kg],
- n je počet tažených vozů [-],
- v je rychlost vozidla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- Δv je vliv rychlosti větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- f_L je odporový faktor [-],
- k_{St1} je odporový koeficient [$\text{kg}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2}$],
- k_{Sa1} je odporový koeficient [$\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$],
- k_{Sa2} je odporový koeficient [$\text{kg}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2}$] [5].

Rovnice (11), (12) a (13) lze přepsat do tvaru, který odpovídá Davisově rovnici (7), tedy s vyjádřením členů A, B a C, pokud by bylo potřeba transformovat vztahy, například za účelem zadání vstupních parametrů do výpočetního programu.

Z výše uvedeného v části pojednávající o vývoji výpočtu vozidlových odporů a jejich dnešní podobě u nás a v zahraničí vyplývá, že probíhala snaha definovat vztah tak, aby co nejvíce odpovídaly reálným hodnotám. To záviselo samozřejmě na způsobu jejich měření a vyhodnocení, jaká nepřesnost výsledku výpočtu je ještě přípustná. V Evropě se ustálilo používání Davisovy rovnice (7) a Strahlovy rovnice (11) (12) (13) v německy mluvících zemích. Výzkumná činnost probíhala i v bývalém Sovětském svazu a literatura [6] uvádí, že to byli právě sovětské vědci, kteří začali první zkoumat vozidlové odpory, nicméně dochází ke vztahům závislých na rychlosti, které odpovídají Davisově rovnici (7), jako jejich zahraniční kolegové [3]. Proto se liší pouze v rámci koeficientů A, B a C.

3 MĚRNÉ VOZIDLOVÉ ODPORY DLE PŘEDPISU V7

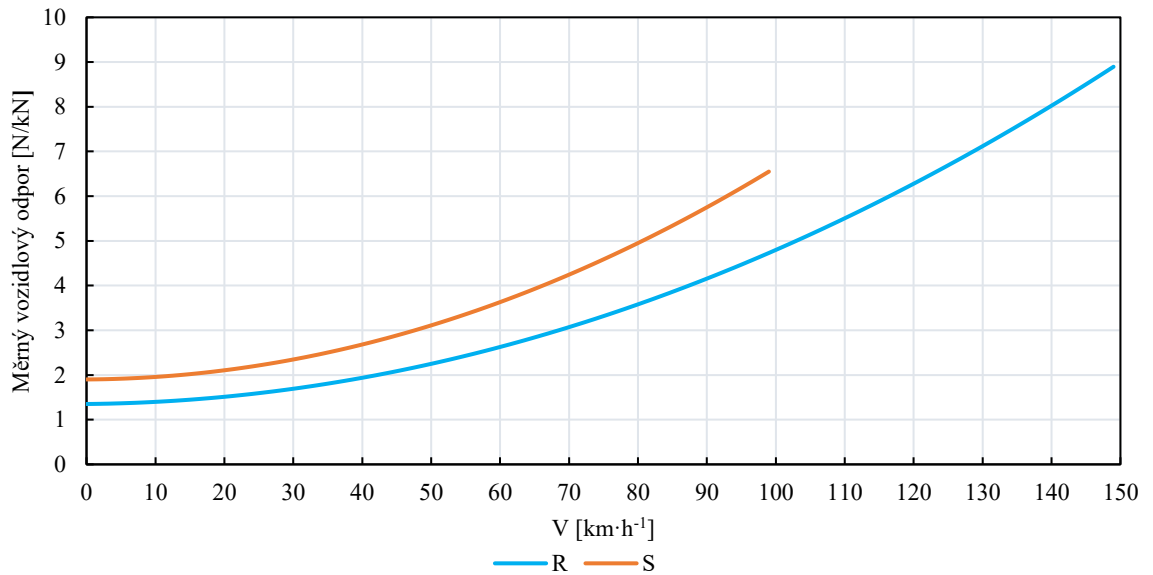
Výpočet měrných vozidlových odporů byl u ČSD (respektive ČD, SŽDC, Správy železnic) stanoven dle předpisu V7 – Trakční výpočty [2]. Ten byl vydán v roce 1982 a udává následující vztahy dle tabulky 5. Zdroj označuje měrný vozidlový odpor písmenem w , hodnotu udává podobně jako výše zmíněné vztahy $[N \cdot t^{-1}]$. Pro snadnější rozlišení je proto v tabulce ponecháno původní označení, ale vztah je přepsán pro snadné porovnání do podoby používané dnes, tedy v desetinném čísle, nikoliv ve zlomku a v jednotkách $[N \cdot kN^{-1}]$.

Tabulka 5 – měrné vozidlové odpory dle typů vozů

Typ jízdního odporu	Druh vozů	Průměrná hmotnost na 1 vozovou nápravu vlaku [t]	Matematické vyjádření měrného vozidlového odporu $[N \cdot kN^{-1}]$	Rozsah platnosti $[km \cdot h^{-1}]$
R	4nápravové osobní vozy	8–15	$w_R = 1,35 + 0,0008 \cdot V + 0,00033 \cdot V^2$	0–150
S	2nápravové osobní nebo nákladní	10–15	$w_S = 1,9 + 0,000456 \cdot V^2$	0–100
M ₄	Balm-k 18,5 m	-	$w_{M_4} = 1,8 + 0,01 \cdot V + 0,00476 \cdot V^2$	0–100
M ₂	2nápravové přípojné	-	$w_{M_2} = 1,5 + 0,0089 \cdot V^2$	0–80
T ₂	2nápravové nákladní	15,1 – 20	$w_{T_2} = 1,7 + 0,0033 \cdot V + 0,00018 \cdot V^2$	0–100
T ₄	4nápravové nákladní	15,1 – 20	$w_{T_4} = 1,3 + 0,00033 \cdot V^2$	0–100
U ₂	2nápravové nákladní	5 – 9,9	$w_{U_2} = 2 + 0,00125 \cdot V^2$	0–100
U ₄	4nápravové nákladní	5 – 9,9	$w_{U_4} = 2 + 0,0008 \cdot V^2$	0–100

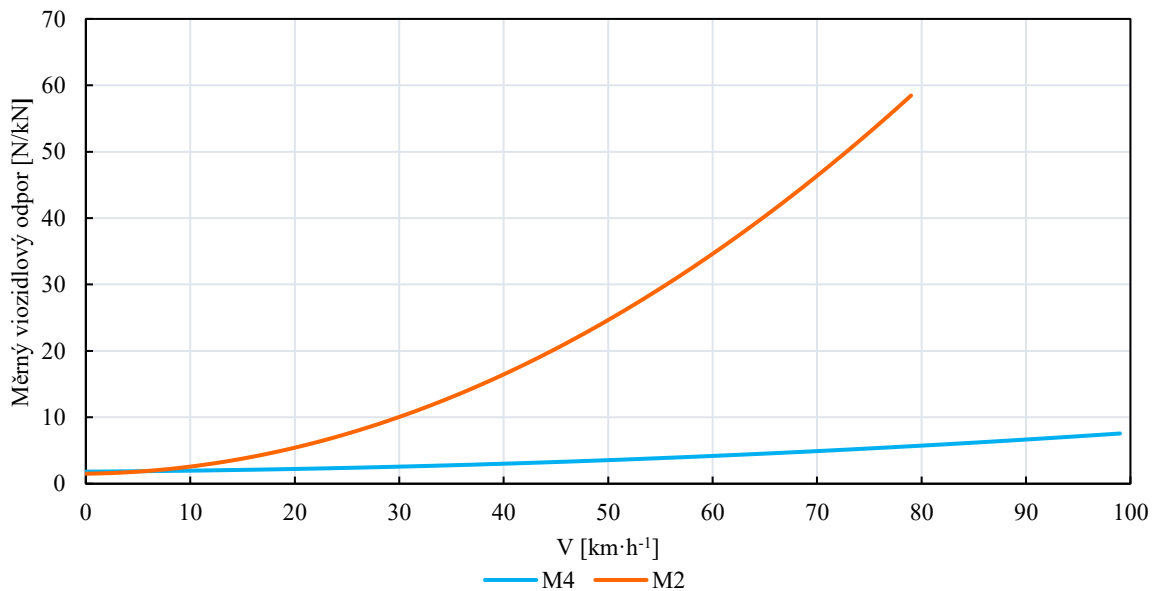
Zdroj: [2], upravil autor

Předpis dále uvádí, že při rozjezdu vlaku, pro hodnoty mezi 0 až 5 km·h⁻¹, je zvýšený vozidlový odpor. Jde tedy o respektování odporu z klidu, zmíněného výše. Měrný odpor se pro dané hodnoty navýší o 1,5 kN·N⁻¹. Jednotlivé průběhy měrných vozidlových odporů v závislosti na rychlosti jsou vyneseny v obrázku 3, 4 a 5.



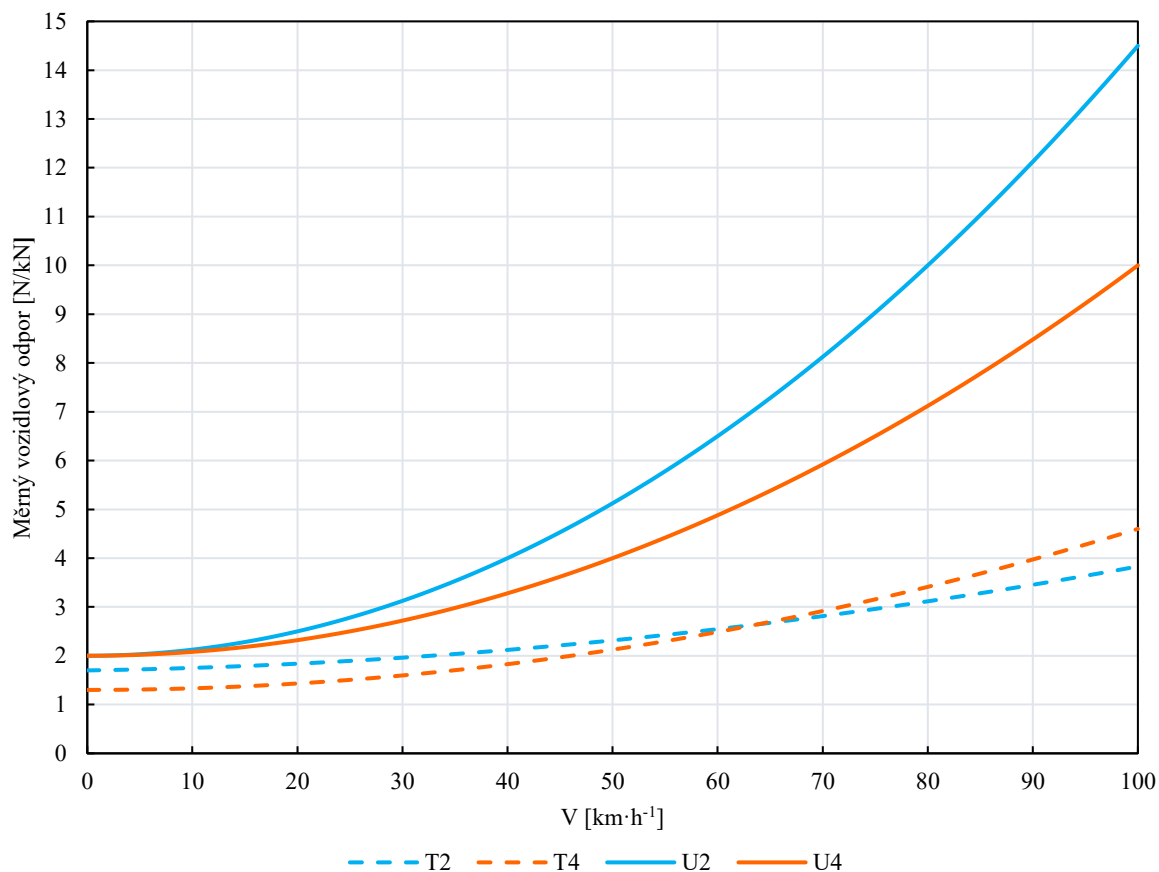
Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 3 – Měrné vozidlové odpory R a S



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 4 – Měrné vozidlové odpory M₂ a M₄



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 5 – Měrné vozidlové odpory T₂, U₂, T₄, U₄

Předpis udává rovněž měrné vozidlové odpory pro jednotlivé typy lokomotiv. Jelikož ale tvoří pouhý zlomek celkové hmotnosti vlaku a podílejí se na odporech malou částí, jsou z této práce vynechány, stejně jako měrné vozidlové odpory M₂ a M₄.

Předpis V7 byl změněn v roce 1992 po výběhových zkouškách vybraných vozů, které se konaly během roku 1991 na Výzkumném ústavu železničním, po kterých došlo k úpravě vztahů (příloha A). Jednotlivé úpravy a jejich výsledky jsou uvedeny v následujících kapitolách.

3.1 Rychlíkové vozy (R)

Úpravou předpisu V7 došlo ke změnám výpočtu měrných vozidlových odporů pro rychlíkové vozy, jejich podoba a důsledky jsou popsány v této části, prezentovány jsou pomocí tabulky 6, 7 a obrázku 6.

Tabulka 6 – hodnoty měrného vozidlového odporu R po úpravě V7

Typ	Verze vztahu	Složky odporu		
		a	b·10 ⁻³	c·10 ⁻³
R _k	původní	1,35	0,8	0,33
	nový	1,803	0,5	0,233
	změna	0,453	-0,3	-0,097
R _G	původní	1,35	0,8	0,33
	nový	2,7	0	0,17
	změna	1,35	-0,8	-0,16

Zdroj: autor dle [2]

V případě rychlíkových vozů došlo nejen k úpravě, ale také k rozdělení vozů dle konstrukce na vozy s kotoučovou brzdou a na vozy s podvozkem typu Görlitz. Nové vztahy jsou pak:

$$o_{Rk} = 1,803 + 0,0005 \cdot V + 0,000233 \cdot V^2 \quad (14)$$

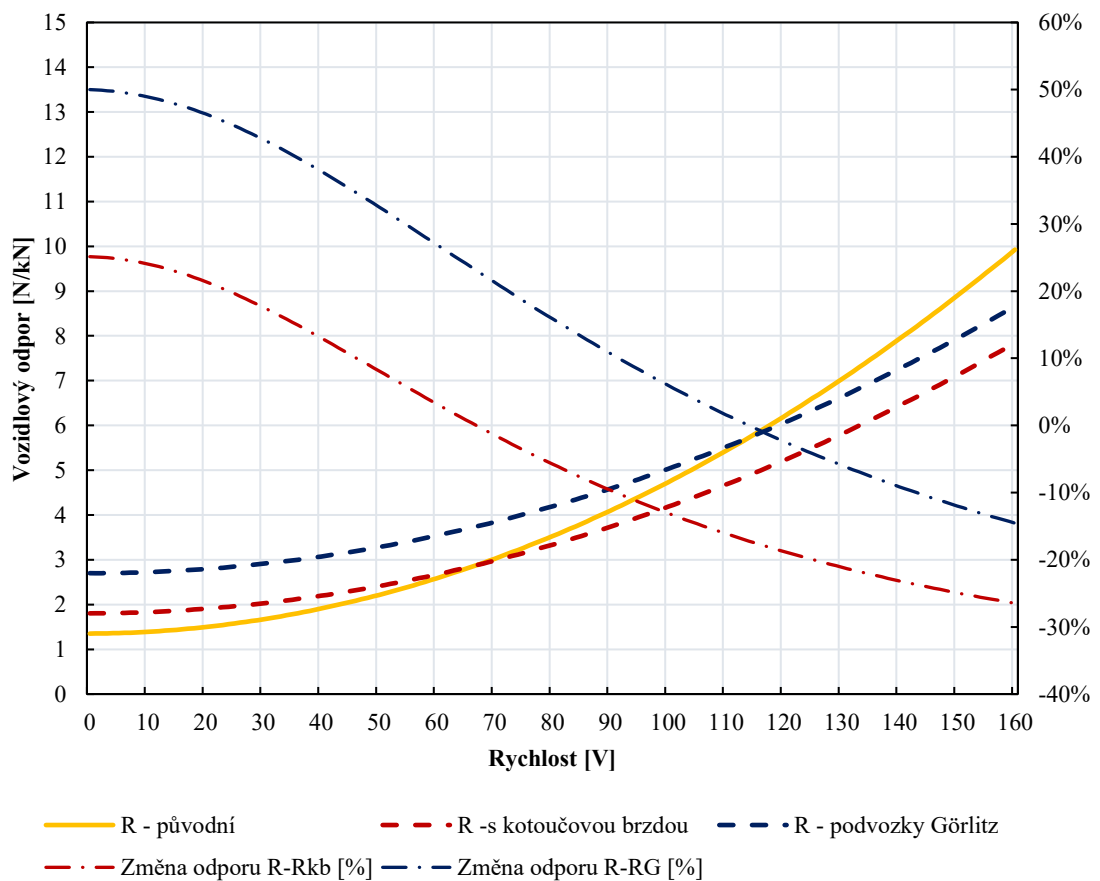
$$o_{RG} = 2,17 + 0,00017 \cdot V^2 \quad (15)$$

Úpravou byl zvýšen člen a, naopak došlo ke snížení členů b a c. V důsledku toho měrný vozidlový odpor (14) i (15) vykazuje při nižších rychlostech vyšší hodnoty. V případě R_G dokonce až o 50 %. Při vyšších rychlostech ale nové vztahy vykazují menší hodnoty. Dle předpisu je původní vztah definován pouze do rychlosti 150 km·h⁻¹, v tomto případě ale bylo uvažováno s maximální rychlostí 160 km·h⁻¹, protože provoz vozů při takovýchto rychlostech je dnes na síti Správy železnic běžný. Přehled znázorňuje tabulka 7 a obrázek 6.

Tabulka 7 – vybrané hodnoty měrného vozidlového odporu R po úpravě V7

V	R	R _k	R _G	Rozdíl R-R _k	Rozdíl R-R _G	Změna odporu R _k [%]	Změna odporu R _G [%]
0	1,35	1,80	2,70	-0,45	-1,35	25,12	50,00
25	1,58	1,96	2,85	-0,38	-1,27	19,63	44,61
50	2,22	2,41	3,28	-0,19	-1,07	8,11	32,52
75	3,27	3,15	4,01	-0,12	-0,74	-3,65	18,56
100	4,73	4,18	5,03	0,55	-0,30	-13,08	5,96
125	6,61	5,51	6,34	1,10	0,27	-19,98	-4,19
150	8,90	7,12	7,94	1,78	0,95	-24,92	-11,99
160	9,93	7,85	8,66	2,08	1,27	-26,48	-14,56

Zdroj: autor dle [2]



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 6 – Měrné vozidlové odpory R po úpravě V7

3.2 Vozy se středním nápravovým zatížením (S)

Úpravou předpisu V7 došlo ke změnám výpočtu měrných vozidlových odporů pro vozy se středním nápravovým zatížením, jejich podoba a důsledky jsou popsány v této části, prezentovány jsou pomocí tabulky 8, 9 a obrázku 7.

Tabulka 8 – hodnoty měrného vozidlového odporu S po úpravě V7

Typ	Verze vztahu	Složky odporu		
		a	b	c · 10 ⁻³
S	původní	1,9	0	0,465
	nový	1,9	0	0,35
	změna	0	0	-0,115

Zdroj: autor dle [2]

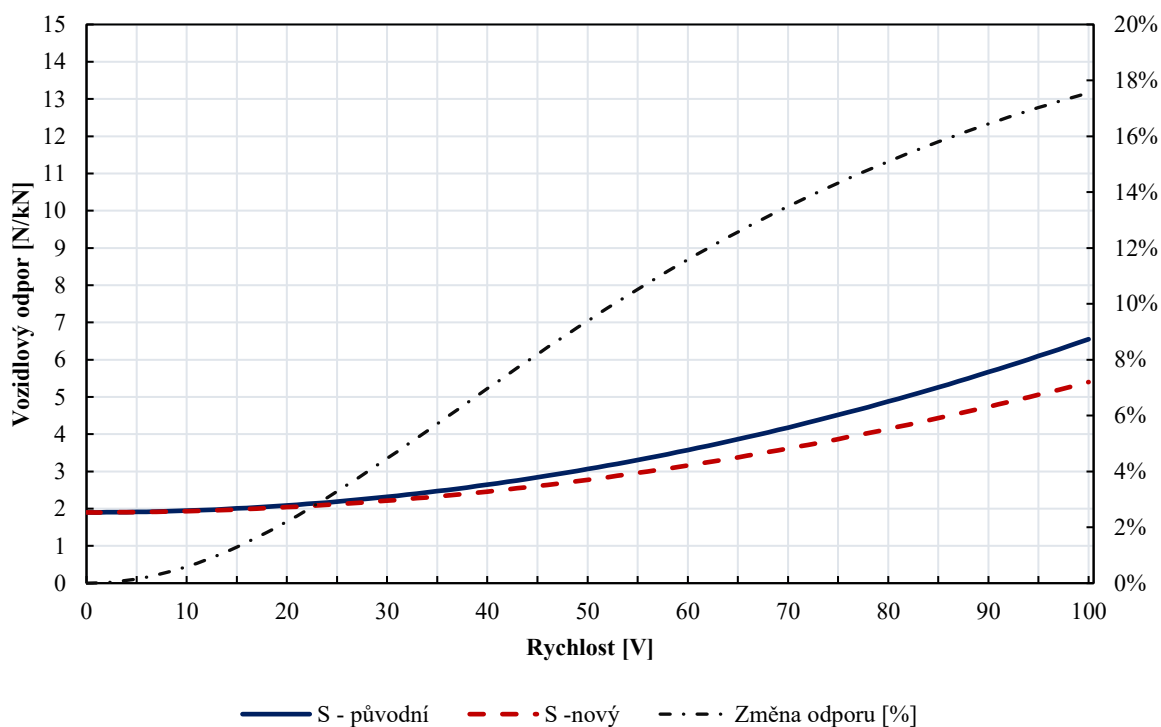
$$o_S = 1,9 + 0,00035 \cdot V^2 \quad (16)$$

Měrné vozidlové odpory vozů se středním nápravovým zatížením se vyznačují nulovou složkou b, která je závislá na rychlosti. V rovnici (16) byl upraven pouze člen c, u kterého došlo ke snížení. Vozy se středním nápravovým zatížením tedy vykazují dle upraveného vztahu (16) nově menší odpor prostředí. V souladu s tím sklesá nově stanovený vozidlový odpor S oproti původnímu s rostoucí rychlostí.

Tabulka 9 – vybrané hodnoty měrného vozidlového odporu S po úpravě V7

V	S původní	S nový	Rozdíl	Změna odporu [%]
0	1,90	1,90	0,00	0,00
25	2,19	2,12	0,07	3,28
50	3,06	2,78	0,29	9,39
75	4,52	3,87	0,65	14,33
100	6,55	5,40	1,15	17,56

Zdroj: autor dle [2]



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 7 – Měrné vozidlové odpory S po úpravě V7

3.3 Ložené dvounápravové a čtyřnápravové nákladní vozy (T₂, T₄)

Úpravou předpisu V7 došlo ke změnám výpočtu měrných vozidlových odporů pro vozy dvou a čtyřnápravové ložené, jejich podoba a důsledky jsou popsány v této části, prezentovány jsou pomocí tabulky 10 a 11 a obrázky 8 a 9.

Tabulka 10 – hodnoty měrného vozidlového odporu T₂ a T₄ po úpravě V7

Typ	Verze vztahu	Složky odporu		
		a	b·10 ⁻³	c·10 ⁻³
T ₂	původní	1,7	3,3	0,18
	nový	1,676	0,3	0,288
	změna	-0,024	-3	0,108
T ₄	původní	1,3	0	0,33
	nový	1,3	0	0,15
	změna	0	0	-0,18

Zdroj: autor dle [2]

Dvounápravové vozy vykazují vyšší vozidlové odpory a jsou dobrým příkladem, na kterém lze vidět, jak vozidlové odpory závisí na konstrukci a technickém stavu vozu. Čtyřnápravové vozy jsou konstrukčně řešeny tak, že mají dva otočné podvozky a dva stupně vypružení, oproti jednomu stupni vypružení u vozů dvounápravových. Tyto aspekty ovlivňují odpor z neklidné jízdy.

$$T_2 = 1,676 + 0,0003 \cdot V + 0,000288 \cdot V^2 \quad (17)$$

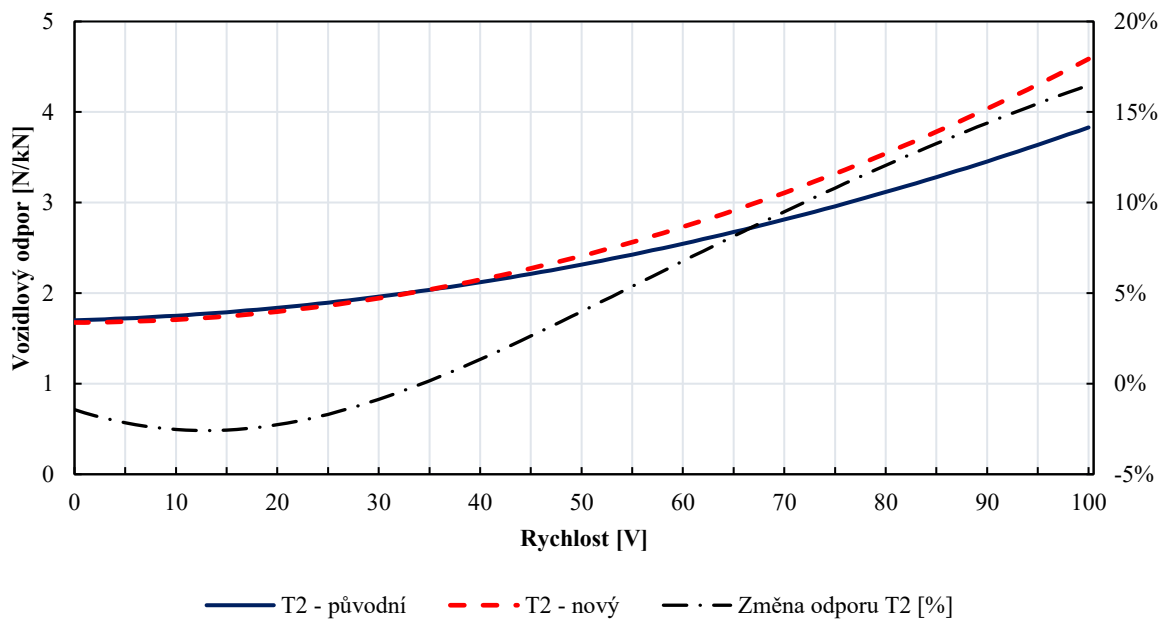
$$T_4 = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2 \quad (18)$$

Úpravou vztahů (17) a (18) došlo u měrného vozidlového odporu T_2 k poklesu při nižších rychlostech, v oblasti do $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, následně pak ke zvýšení oproti původnímu vztahu. Nový vztah pro T_4 klesá až o necelých 40 % a na hranici rozsahu rychlostí pro tento měrný vozidlový odpor opět mírně stoupá.

Tabulka 11 – vybrané hodnoty měrného vozidlového odporu T_2 a T_4 po úpravě V7

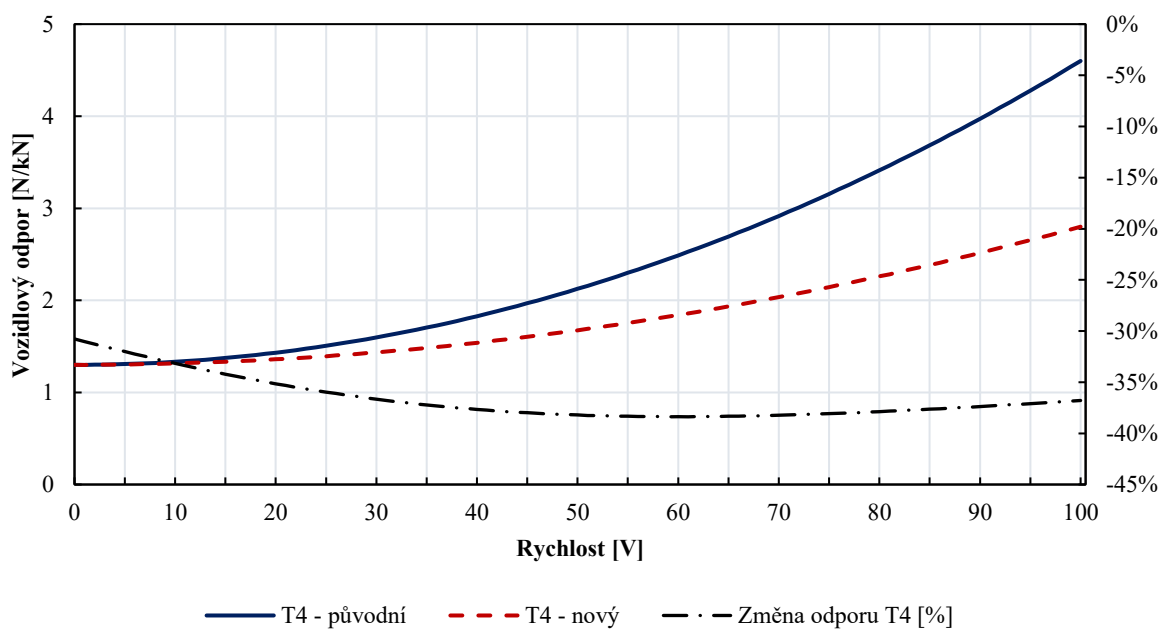
V	T_2 původní	T_4 původní	T_2 nový	T_4 nový	Změna odporu T_2 [%]	Změna odporu T_4 [%]
0	1,70	1,30	1,68	1,30	-1,43	-30,77
25	1,90	1,51	1,86	1,39	-1,69	-35,96
50	2,32	2,13	2,41	1,68	3,98	-38,21
75	2,96	3,16	3,32	2,14	10,80	-38,08
100	3,83	4,60	4,59	2,80	16,48	-36,79

Zdroj: autor dle [2]



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 8 – Měrné vozidlové odpory T_2 po úpravě V7



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 9 – Měrné vozidlové odpory T_4 po úpravě V7

3.4 Prázdné dvounápravové a čtyřnápravové nákladní vozy (U_2 , U_4)

Úpravou předpisu V7 došlo ke změnám výpočtu měrných vozidlových odporů pro vozy dvou a čtyřnápravové prázdné, jejich podoba a důsledky jsou popsány v této části, prezentovány jsou pomocí tabulky 12, 13 a obrázku 10.

Tabulka 12 – hodnoty měrného vozidlového odporu T_2 a T_4 po úpravě V7

Typ	Verze vztahu	Složky odporu		
		a	$b \cdot 10^{-3}$	$c \cdot 10^{-3}$
U2	původní	2	0	1,25
	nový	2,885	-14	0,655
	změna	0,885	-14	-0,595
U4	původní	2	0	0,8
	nový	2,278	-0,4	0,437
	změna	0,278	-0,4	-0,363

Zdroj: autor dle [2]

$$U_2 = 2,9 + 0,0014 \cdot V + 0,000655 \cdot V^2 \quad (19)$$

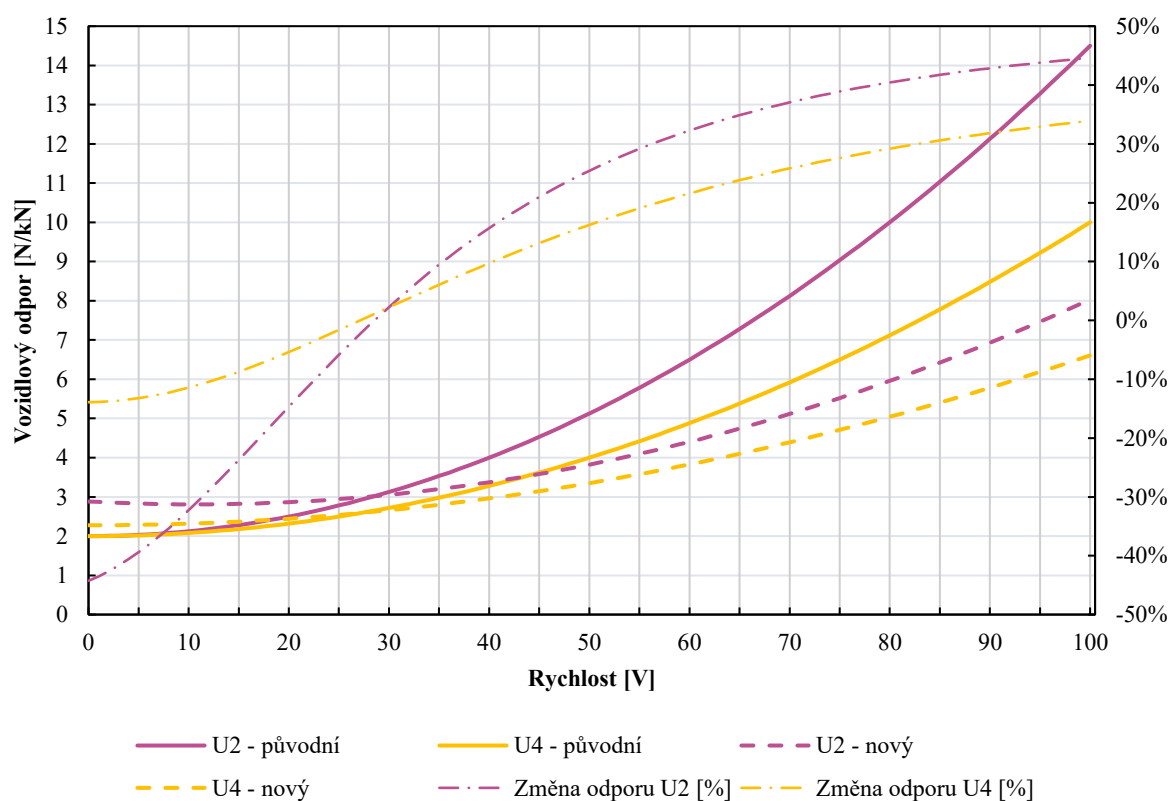
$$U_4 = 2,278 - 0,0004 \cdot V + 0,000437 \cdot V^2 \quad (20)$$

Měrné vozidlové odpory U_2 a U_4 se opět váží ke dvou a čtyřnápravovým vozům, tentokrát ale prázdným. Změny jsou ale výrazně odlišné od změn, které proběhly u těchto vozů, pokud jsou ložené. V tomto případě se změny u odporu U_2 se po aktualizaci vztahu (19) pohybují v rozmezí -44 % až 45 % oproti původnímu vztahu. Změna u čtyřnápravových vozů, U_4 , kterou nově reprezentuje vztah (20), je v rozmezí od -14 % do 34 %. Jde tedy o výrazné změny, stejně jako v předchozích případech. Nicméně nemají takovou váhu, protože prázdné nákladní vozy budou přezásobovány mnohem menší hmotností než vozy ložené. Podle tabulky 1 jde o hodnoty v rozmezí 5 až 9,9 t na nápravu. Navíc ani problematika vozidlových odporů prázdných nákladních vozů není tak jednoduchá, aby jí postihly tyto vztahy v celém jejím objemu.

Tabulka 13 – vybrané hodnoty měrného vozidlového odporu U_2 a U_4 po úpravě V7

V	U_2 původní	U_4 původní	U_2 nový	U_4 nový	Změna odporu U_2 [%]	Změna odporu U_4 [%]
0	2,00	2,00	2,89	2,28	-44,25	-13,90
25	2,78	2,50	2,94	2,54	-5,87	-1,65
50	5,13	4,00	3,82	3,35	25,41	16,24
75	9,03	6,50	5,52	4,71	38,89	27,60
100	14,50	10,00	8,04	6,61	44,59	33,92

Zdroj: autor dle [2]



Zdroj: autor dle [2]

Obrázek 10 – Měrné vozidlové odpory U_2 a U_4 po úpravě V7

Tyto kapitoly se věnovaly definici měrných vozidlových odporů v českém prostředí. Jejím cílem bylo vytvoření pohledu na vztahy pro jednotlivé měrné vozidlové odpory, ale také s tím, že byly definovány v roce 1982 a následně upraveny v roce 1992, tedy po deseti letech. Další změn již vztahy nedostály, ale za dalších téměř třicet let došlo k technickému pokroku,

který jistě zlepšil nejen faktory ovlivňující samotné vozidlové odpory, ale také způsoby, jakými je možné je změřit.

Jestliže byla první aktualizace provedena po deseti letech, je zřejmě na místě, aby byla provedena další. Reálná situace bude vždy ovlivněna nepostihnutelnými náhodnými jevy, nebude ale určitě nazbyt, budou-li vypočítané údaje vykazovat přesnější data. Je samozřejmě otázkou, zda úsilí vynaložené pro aktualizaci předpisu a zpřesnění vztahů bude mít zásadní reálné důsledky, o tom pojednává další část bakalářské práce, která posuzuje podíl vozidlových odporů na celkových odporech.

V této kapitole, a i v celé práci byly vynechány hodnoty vozidlových odporů hnaných vozidel. Důvodem pro jejich vynechání je, že je vozidlový odpor závislý na hmotnosti vozidla a hnací vozidlo v rámci hmotnosti celého vlaku tvoří pouhý podíl, který klesá s celkovou hmotností dopravovaných vozidel. Nová hnací vozidla mají zpravidla výrobcem uváděný vozidlový odpor zjištěný výběhovou zkouškou v rámci testovacích jízd vozidel, a proto je možné pokládat jej za správný. Narozdíl od vozů, které se dělí prakticky jen podle počtu náprav a jejich zatížení má každá lokomotivní řada stanovené vozidlové odpor zvlášť.

3.5 Podíl vozidlových odporů na jízdnicích odporech

Pro zkoumání, zda má význam revidovat vztahy pro výpočet vozidlových odporů, je také potřeba vědět, jak se podílejí na celkových odporech. Tyto hodnoty jsou z podstaty vozidlových odporů závislé na rychlosti, z hlediska traťových odporů pak na náhradním sklonu. Tyto dvě veličiny se během jízdy vlaku mění. Samozřejmě také záleží na hmotnosti vozidel, ta je ale konstantní. Pro názorné zobrazení podílu vozidlových odporů na celkových odporech poslouží tabulky s vyčíslením procentuálního poměru vozidlových odporů na celkových odporech. V prvním sloupci tabulky je uvedena rychlost v $[\text{km}\cdot\text{h}^{-1}]$, v prvním řádku náhradní sklon v $[\%]$. Tabulky neuvažují nulový náhradní sklon, tedy přímou rovnou kolej, která nevede tunelem, protože v takových případech vznikají pouze vozidlové odpory.

Rozsah náhradního sklonu je tedy v rozmezí hodnot od 1‰ do 29‰, přičemž vyšších hodnot bude nabývat jen velmi ojediněle. Běžně sklonové poměry dosahují takových hodnot, které zvolení rozsah hodnot náhradního sklonu postihne. Včetně dalších složek, jako je odpor z jízdy obloukem. Dle platných vyhlášek [7] a norem [8] je minimální poloměr oblouku stanoven 190 m pro dráhy regionální, 300 m pro dráhy celostátní při rekonstrukci, nebo modernizaci a 500 m pro nově stavěné dráhy celostátní. Pokud by byl uvažován tedy i

minimální poloměr 190 m, pak by po výpočtu o_R dle vztahu (3) dosahoval hodnot maximálně okolo $3 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$. Odpor z jízdy tunelem je předpisem V7 [2] definován $O_t = 1 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$ pro dvoukolejný tunel, $O_t = 2 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$ pro jednokolejný tunel. Z tohoto hlediska je zvolený rozsah náhradního sklonu dostatečný a postihuje většinu případů, ve kterých může náhradní sklon dosahovat těchto hodnot.

Výpočet podílu vozidlového odporu [%] byl proveden dle vztahu (21), ze kterého je po úpravě patrné, že nezáleží na hmotnosti vozidel, ale pouze na velikosti měrného vozidlového odporu a na náhradním sklonu. Výsledné hodnoty podílu vozidlových odporů v procentech jsou pak uvedeny v tabulce 14, 15 a v příloze B.

$$\frac{O_V}{O_{vl}} = \frac{O_V}{O_V + O_T} = \frac{o_v \cdot m \cdot g}{o_v \cdot m \cdot g + s_n \cdot m \cdot g} \quad (21)$$

$$= \frac{o_v \cdot m \cdot g}{m \cdot g \cdot (s_n + o_v)} = \frac{o_v}{s_n + o_v}$$

Tabulka 14 – Podíl vozidlových odporů R_k na jízdních odporech

V \ S _n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	64	38	27	20	17	14	12	11	10	9	8	7	7	6	6
10	65	38	27	21	17	14	12	11	10	9	8	7	7	6	6
20	66	39	28	21	17	15	13	11	10	9	8	8	7	7	6
30	67	40	29	22	18	16	13	12	11	10	9	8	8	7	7
40	69	42	31	24	20	17	14	13	11	10	9	9	8	8	7
50	71	45	33	26	21	18	16	14	12	11	10	9	9	8	8
60	73	47	35	28	23	20	17	15	14	12	11	10	10	9	8
70	75	50	37	30	25	21	19	17	15	14	12	11	11	10	9
80	77	53	40	32	27	23	20	18	16	15	14	13	12	11	10
90	79	55	43	35	29	25	22	20	18	16	15	14	13	12	11
100	81	58	46	37	32	28	24	22	20	18	17	15	14	13	13
110	82	61	48	40	34	30	26	24	22	20	18	17	16	15	14
120	84	63	51	43	37	32	29	26	23	22	20	18	17	16	15
130	85	66	54	45	39	35	31	28	25	23	22	20	19	18	17
140	87	68	56	48	42	37	33	30	27	25	23	22	20	19	18
150	88	70	59	50	44	39	35	32	30	27	25	24	22	21	20
160	89	72	61	53	47	42	38	34	32	29	27	25	24	23	21

Zdroj: autor

Tabulka 15 – Podíl vozidlových odporů T_4 na jízdních odporech

$V \backslash S_n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	57	30	21	16	13	11	9	8	7	6	6	5	5	5	4
10	57	30	21	16	13	11	9	8	7	6	6	5	5	5	4
20	58	31	21	16	13	11	9	8	7	7	6	6	5	5	4
30	59	32	22	17	14	12	10	9	8	7	6	6	5	5	5
40	61	34	24	18	15	12	11	9	8	7	7	6	6	5	5
50	63	36	25	19	16	13	11	10	9	8	7	7	6	6	5
60	65	38	27	21	17	14	12	11	10	9	8	7	7	6	6
70	67	40	29	23	18	16	14	12	11	10	9	8	8	7	7
80	69	43	31	24	20	17	15	13	12	11	10	9	8	8	7
90	72	46	33	26	22	19	16	14	13	12	11	10	9	9	8
100	74	48	36	29	24	20	18	16	14	13	12	11	10	9	9

Zdroj: autor

Z uvedených tabulek vyplývá, že vozidlové odpory se na celkových odporech podílejí zejména při menších hodnotách náhradního sklonu a zároveň při vyšších rychlostech. Změna výsledku výpočtu se pak projeví nejvíce u vlaků jedoucích po sklonově příznivějších tratích dovolujících co nejvyšší využití maximální konstrukční rychlosti vozidel tvořících soupravu vlaku.

Pro tuto práci by bylo jistě přínosné, kdyby bylo možné českou železniční síť souhrnně popsat pomocí náhradního sklonu a následně tato data vyjádřit například pomocí histogramu, tak aby bylo možné jednoduše popsat, jakého podílu na infrastruktuře dosahuje určitý náhradní sklon. Nicméně tato data neexistují. Popsány jsou pouze zvlášť jednotlivé traťové úseky. Navíc je potřeba brát v úvahu, že náhradní sklon bude mít dvě varianty (při jízdě do stoupání a po spádu), tedy i data by byla dvakrát větší. Jediným volně dostupným zdrojem je pouze výšková mapa tratí. Ta sice obsahuje i nadmořské výšky vybraných stanic, ale nereflektuje niveletu trati, a tak neposkytuje data o sklonu. Navíc neexistuje ani ucelený přehled oblouků, jejichž poloměr je také vstupem do výpočtu náhradního sklonu. Proto nelze datům z uvedených tabulek 14, 15 a přílohy B jednoduše přiřadit významnost na základě hodnoty náhradního sklonu a jeho zastoupení na české železniční síti.

Výškové vedení tratí, které významně ovlivňuje jízdní odpor vozidel, je závislé na terénu, kterým je trať vedena s ohledem na plánovaný provoz. Sklonově náročnější jsou tratě regionálního významu, vybudované převážně na přelomu 19. a 20. století, tratě celostátní, byť již také poměrně letité jsou vedeny příznivěji, co se sklonových poměrů týče. Z toho vyplývá,

že právě těžké nákladní vlaky, které jsou provozovány na hlavních tratích, respektive jejich vozidlové odpory, budou mít větší podíl na celkových odporech. Případné úpravy v předpisu V7, reflektující přesnější výpočet vozidlových odporů, pak bude tedy budou mít dopad právě na tyto těžké vlaky provozované zejména na síti TEN-T, které zajišťují 84 % dopravních výkonů [9]. Poměrně sklonově náročné vedení tratí může být plánováno ale i u nově budovaných vysokorychlostních tratí, kde je počítáno s výhradním provozem vysokorychlostních souprav osobní dopravy, a tedy i s dostatečným výkonem pro překonání sklonově náročných úseků. V těchto případech je využíváno potenciální energie vlaku, kterou získá s jízdou do stoupání a po překonání vrcholu jede výběhem. Důvodem pro tato řešení je odstranění potřeby budování mostů a tunelů pro příznivější sklonové podmínky, a tedy i snížení investičních nákladů do budované trati. Zpřesnění výpočtu vozidlových odporů pro vysokorychlostní jednotky pak přináší přesnější výpočet spotřeby energie. Nicméně u ucelených jednotek je zjištění vozidlových odporů poměrně snadné díky stále stejnému složení soupravy vlaku.

4 VLIV VÝPOČTU VOZIDLOVÝCH ODPORŮ NA JÍZDNÍ DOBU

Jak již bylo uvedeno, vozidlové odpory se vyskytují v pohybové rovnici vlaku (1) a mají tedy vliv na výpočet jízdní doby a další aspekty jízdy vlaku. V kapitole 3.5 pak bylo dokázáno, že se v rámci celkových jízdních odporů mohou podílet významnou částí. Proto je dále potřeba zkoumat jejich vliv na výpočet pohybové rovnice, a tedy i jízdních dob a dalších provozních ukazatelů a hodnot, jakou jsou například technická normy zátěže, nebo jízdní doby.

4.1 Nedostatky při výpočtu měrných vozidlových odporů

Jak již bylo naznačeno v přecházejících kapitolách, výpočty měrných vozidlových odporů nejsou a nemohou být zcela přesné. Důvody, proč tomu tak je, přináší literatura [1] a nejsou prakticky ničím, o čem by odborná veřejnost nevěděla. Zabývá se jimi mimo jiné aktivně také Katedra dopravních prostředků a diagnostiky na Dopravní fakultě Jana Pernera. V předchozích letech vznikly v souvislosti s tím články K problematice vozidlového odporu kontejnerových vlaků [10] a Návrh úpravy metodiky výpočtu vozidlového odporu kontejnerových vlaků [11]. Tato problematika je spíše náplní oboru kolejových vozidel, nicméně poznatky mají dopad i na technologii a řízení provozu. Shrnutá je v následujících podkapitolách.

4.1.1 Vliv technického stavu vozidel a tratě

Obecně lze nepřesnosti výpočtu rozdělit na vlivy, které ve výpočtu zahrnuty jsou, ale nepřesně, a na vlivy, které výpočet vůbec neuvažuje. Jak již bylo uvedeno výše, výpočet je určen svými třemi členy dle vztahu (7). Člen A je nezávislý na rychlosti, reflektuje aktuální technický stav vozidla, který je závislý na konstrukci a údržbě. Od devadesátých let došlo ke zlepšení vlastností používaných ložisek, a tedy ke snížení jejich odporu. Předpis také hovoří o odporu z klidu. Ten není v grafech popisujících jednotlivé měrné vozidlové uvažován, stejně tak ani při běžných výpočtech úloh pohybové rovnice, pro zjednodušení výpočtu. Odpor z klidu byl již zmíněn v souvislosti s kluznými ložisky, které se již dnes u kolejových vozidel nepoužívají (neuvažujeme-li historická vozidla). Člen B je závislý na rychlosti, roste přímo úměrně s ní. Ale i v tomto případě došlo ke zlepšení konstrukce nejen vozidel, ale také ke

zlepšení technického stavu tratí, zejména co se týče geometrické polohy koleje, která je lepší, než v době vzniku a aktualizace předpisu V7 a má tedy menší negativní vliv na jízdu vozidel.

Vlivy, které ve výpočtu zahrnutý nejsou, se na vozidlových odporech také podílejí. Jde například od odpor z jízdy obloukem, který je zařazen mezi traťové odpory, čímž je tedy proměnný s ujetou vzdáleností dle charakteru trati, ale to, jaký odpor vozidlo klade v důsledku projížděného, oblouku závisí nejen na poloměru konkrétního oblouku, ale také na konstrukci vozidla.

4.1.2 Vliv aerodynamického odporu

Člen C je závislý na rychlosti, roste s její druhou mocninou, díky čemuž se pak velmi významně podílí na celkových vozidlových odporech, jak znázorňuje obrázek 2. Ale tento vliv je poměrně náhodný. Vozidlo, respektive vlak bude vždy překonávat odpor prostředí, již Strahl zohledňoval ve své rovnici (10) povětrnostní vlivy. Obecně lze říct, že stejná změna rychlosti větru (která prakticky zvýší, nebo sníží odpor prostředí, podle toho, zda bude vítr vát po, nebo proti směru jízdy vlaku), se více projeví na vlcích, které jedou pomaleji než na vlcích, které jedou rychleji. Nicméně za běžných podmínek nevane vítr vždy přesně v ose jedoucího vlaku a jeho směr je proměnlivý. Ovšem tento faktor bude zásadnější pro těžké nákladní vlaky, které pojedou na hraně technického normativu zátěže, rychlostí okolo $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, kde změna rychlosti větru $\pm 30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, vyvolá změnu relativní rychlosti vůči větru o $\pm 30 \%$. Vysokorychlostní jednotky, které jsou podstatně lehčí a mohou dosahovat maximálních rychlostí až $330 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (např. ICE3), budou samozřejmě překonávat větší vozidlový odpor způsobený prostředím, ale stejná změna rychlosti větru o $\pm 30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, způsobí změnu relativní rychlosti vůči větru o $\pm 9,09 \%$.

Co se týče aerodynamického odporu, dochází k nepřesnostem ve výpočtu v rámci vozidlových odporů i za situace, kdy vládne bezvětrí. Aerodynamický odpor O_{vzd} [N] je definován vztahem (22):

$$O_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (22)$$

kde:

- C_x je tvarový součinitel odporu vzduchu [-],
- ρ je měrná hustota prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
- S je čelní plocha vozidla [m^2],
- v je relativní rychlost vozidla vůči proudícímu vzduchu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] [1].

Ze vztahu 22 tedy vyplývá, že aerodynamický odpor není závislý na hmotnosti vozidla, přesto je při výpočtu dle vztahu (8) a dosazení do pohybové rovnice (1) hmotnost vozidel uvažována. Další nepřesnost v souvislosti s aerodynamickým odporem pak nastává v případě vozidel, respektive vozů, s uzavřenou stavbou. Tedy vozy skříňové, kotlové, případně plošinové vozy s kontejnery. Jako příklad může být uveden vůz řady Habbins. Tyto vozy vykazují stále stejný aerodynamický odpor, ať už jsou ložené, nebo prázdné. Jejich náklad totiž neovlivní čelní plochu S .

Určité typy vozů, například vysokostěnné vozy řady Eas-u, naopak nepříznivě ovlivní proudění vzduchu, a tedy i aerodynamický odpor, jsou-li prázdné, či naložené jen z části. Nepříznivý účinek bude mít i naložení převyšující stěny vozu. Specifické jsou z pohledu proudění vzduchu klanicové vozy na přepravu dřeva, které jsou osazené čelní plochou na koncích vozů. Například jde o vozy Roos, u kterých bude také odpor vzduchu velmi proměnlivý v souvislosti s ložením vozu. To je ale již předmětem zkoumání proudění kapalin, které dalece přesahuje tuto práci a ani vyjádření pro použití v pohybové rovnici bez značného zjednodušení není prakticky možné. Nicméně jde o další velmi proměnlivou nepřesnost vnášenou do výpočtu.

Problematikou působení vlivu prostředí se dlouhodobě zabývá i UIC [12] a to nejen z pohledu vozidlových odporů, ale spíše z pohledu konstrukce kolejových vozidel a tratí. Silný boční vítr, který působí na bočnice jednotky jedoucí vysokou rychlostí, může mít vliv na její stabilitu, protože se sčítá vektor rychlosti jednotky a vektor rychlosti větru. Z toho důvodu může být za určitých povětrnostních podmínek snižena rychlost. Ochranou proti tomuto jevu může být budování stěn podél tratě, nebo vedení tratě v zářezu. Dalším negativním vlivem je i vzájemné potkávání protijedoucích vlaků ve vysokých rychlostech, které se vlivem proudění vzduchu a jeho působení na vozidla může stát taktéž nebezpečným. Nicméně jde o krátkodobé působení, které nemění vozidlové odpory.

4.1.3 Národní odlišnosti výpočtu vozidlových odporů

V současné době, kdy je interoperabilita zásadní téma evropské železnice, dochází ke sjednocování vlakových zabezpečovačů a trakčních napájecích systémů, tak aby byl zajištěn bezproblémový provoz vlakových souprav napříč zeměmi EU. V kontextu toho je poněkud paradoxní, že po překročení hranic, a tedy i změně vzorce pro výpočet vozidlového odporu, který používá provozovatel dráhy, dochází teoreticky i ke změně vozidlového odporu, který vozidla vykazují.

Bude-li uvažován hraničních přechod mezi Českou republikou a Spolkovou republikou Německo, respektive změna provozovatele dráhy (Správa železnic a DB Netz), změní se skokově v místě změny provozovatele dráhy vozidlové odpory.

Příkladem může být ucelený nákladní vlak, pro který bude platit na infrastruktuře Správy železnic výpočet dle kategorie T₄ (18), zatímco na infrastruktuře DB Netz to bude vztah s odlišnými koeficienty pro ucelené nákladní vlaky (23) [1]:

$$O_v = 1,0 + 0,0002 \cdot V^2 \quad (23)$$

Při změně výpočtu při uvažované hmotnosti dopravovaných vozidel 1 500 t jedoucích rychlostí 100 km·h⁻¹ (odpovídající úseku Bad Schandau – Dolní Žleb) s příslušným vztahem pro vozidlové odpory dojde k rozdílu 29 kN.

Železnice Slovenskej republiky (ŽSR) poskytly informace o výpočtu vozidlových odporů dle předpisů V7, který platil ještě za společného státu, a tedy i ČSD. Přestože k rozdělení a vzniku dvou samostatných dopravců a zároveň provozovatelů dráhy došlo 1.1.1993 a aktualizace předpisu V7 proběhla k 24.1.1992, není tato aktualizace v předpisu ŽSR zaznamenána. Skutečný stav zapracování této aktualizace se nepodařil zjistit, ale dle internetových stránek ŽSR proběhla poslední aktualizace předpisu V7 k 1.1.1989 a výpočet vozidlových odporů je prováděn dle původního znění předpisu. Rozdíly vozidlových odporů pro totožný vlak na síti Správy železnic a ŽSR by tedy odpovídaly hodnotám popsaným v kapitole 3.

Ze strany polského provozovatele dráhy PKP Polskie Linie Kolejowe byly získány informace pouze z předpisu Ir-11 INSTRUKCJA o rozkładzie jazdy pociągów, který hovoří v tom smyslu, že výpočet jízdních dob probíhá v aplikaci Obliczenia Trakcyjne. Vstupy týkající se vozidlových odporů ale polská strana nechtěla poskytnout. Ze získaných informací ale

vyplývá, že ve výpočtech není uvažován součinitel rotačních hmot. V důsledku toho zřejmě musí být k jízdě připočtena určitá přírážka, aby se výsledek blížil dosažitelné realitě.

4.1.4 Další vlivy

Je potřeba zmínit rovněž i rozsah rychlostí, který definuje předpis V7 [2]. Pro vztahy k výpočtu měrných vozidlových odporů lze také uvažovat i vyšší rychlosti, než jsou uvedené v předpisu. Typicky horní hranice rychlosti, které předpis uvažuje ($100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, respektive $150 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) v dnešní době již nepokrývá plně rozsah reálně dosahovaných rychlostí, byť je maximální dovolená rychlost v určitých úsecích Správy železnic jen o $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ vyšší. Přesto lze předpokládat, že tato rychlost poroste, a není důvod mít v předpisech poněkud archaické hodnoty poplatné době vzniku předpisu.

Předpis dále nezahrnuje ani nové typy vozů, jejichž kategorizace nemusí být zcela jasná. Nezahrnuje totiž šesti a osminápravové kloubové vozy, které jsou využívány pro intermodální přepravy. Například vozy typu Sggmrs a Sggrs. Opomenuty jsou i nové ucelené jednotky pro osobní dopravu, u kterých je díky stálému řazení stále stejná sestava vlaku a rovněž určení vozidlových odporů výběhovou zkouškou, například již v rámci zkušebních jízd, je snadnější.

5 MOŽNOSTI ÚPRAVY VÝPOČTU

Pro zpřesnění výpočtu vozidlových odporů není potřeba vynakládat velké úsilí ze strany Správy železnic. Od 90. let se zabývali odborníci vozidlovými odpory nezávisle na sobě, a i na Dopravní fakultě Jana Pernera vzniklo několik prací, týkajících se zejména vozidlových odporů kontejnerových vlaků. Na provozovateli dráhy, a tedy i vydavateli předpisu by pak po diskusi s odborníky záviselo pouze zapracování úpravy a vydání aktualizace předpisu, tedy spíše legislativní zpracování.

Jedna z nepřesností vnášených do výpočtu byla již uvedena aerodynamická složka. Její oddělení od hmotnosti v rámci výpočtu vozidlového odporu [kN] (24) bylo zavedeno již v Japonsku [13], kde je ve výpočtu zachován vliv odporu v ložiskách a neklidné jízdy násobený hmotností vlaku s přičteným odporem vzduchu závislým pouze na rychlosti:

$$O_v = (A + B \cdot V) \cdot m_{vl} \cdot g + C \cdot V^2 \quad (24)$$

S výhodou zde pak byl aplikován tento vztah pro soupravy Shinkansen, u kterých byl již během vývoje poměrně přesně popsán tvarový součinitel a jejichž délka a hmotnost se nemění.

Podobný přístup je uveden i v článku Návrh úpravy metodiky výpočtu vozidlového odporu [kN] (25) kontejnerových vlaků [11], kde je navrhován výpočet, který vyčleňuje aerodynamickou složku, takže již není závislá na hmotnosti vlaku. Aerodynamická složka vozidlového odporu již také není závislá na hmotnosti. Tím je již pouze člen a , který ale není totožný s původním členem a použitým v Davisově rovnici (7). Zde je závislý na průměrné hmotnosti na nápravu a zohledňuje i „nové“ čelní plochy vzniklé mezerami (prázdnými vozy, ať již zcela, nebo částečně) mezi kontejnery.

$$O_v = A_{Ki} \cdot M_v + C_{pr} \cdot V^2 \quad (25)$$

kde:

- A_{Ki} je kategorie vlaku [-]:
 - K1 – lehké vlaky, průměrná hmotnost na nápravu 5 až 10 t,
 - K2 – středně těžké vlaky, průměrná hmotnost na nápravu 10 až 18 t,
 - K3 – těžké vlaky, průměrná hmotnost na nápravu 18 až 22,5 t,

- M_v je celková hmotnost vlaku [t],
- C_{pr} je koeficient na počtu „nových čel“ 3,05 [-],
- V je rychlost [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$] [11].

Tabulka 16 – Hodnoty konstant A_{Ki}

	A_{K1}	A_{K2}	A_{K3}
Dopravovaná vozidla	12,1	9,6	8,8
Celý vlak	12,6	10,2	9,3

Zdroj: [11]

Tento výpočet je ještě dále možné rozšířit o tunelový faktor τ , který bude zahrnut do vozidlových odporů [kN] (26). V původní podobě zmíněné v kapitole pojednávající o traťových odporech pouze přičítá konstantní složku k odporům, která je závislá pouze na hmotnosti vlaku, ale již nijak nezohledňuje rychlost jedoucího vlaku, jeho čelní plochu, nebo světlost tunelu. Začlenění těchto aspektů má pak vliv na výpočet vozidlových odporů, tedy i na maximální rychlost vlaku a jízdní dobu [14].

$$O_v = A_{Ki} \cdot M_v + \tau \cdot C_{pr} \cdot V^2 \quad (26)$$

kde:

- τ je tunelový faktor [-].

V uplynulých letech probíhalo zkoumání vozidlových odporů a způsobu jejich výpočtu. Pokud by bylo rozhodnuto o jejich použití, bude tak provedeno prakticky s minimálními náklady, které by byly vynaloženy pouze do úpravy předpisu. Porovnání teoretických dopadů na výpočet, respektive výsledky výpočtu, při použití různých vztahů pro vozidlové odpory je předmětem dalších kapitol.

6 MODELOVÝ PŘÍKLAD VLIVU VOZIDLOVÝCH ODPORŮ NA JÍZDNÍ DOBU VLAKU

Aby bylo možné porovnat vliv vozidlových odporů na jízdní dobu vlaku a další provozní ukazatele, byl vytvořen modelový příklad o parametrech popsanych v následující části této práce. Příklad je pouze teoretický, avšak se snahou co nejpřesnějších vstupů a co největšího přiblížení k realitě. Vzhledem k rozsahu této bakalářské práce sice nelze tvrdit, že jde o výsledky zcela odpovídající realitě, ale lze je dát do kontextu a souvislostí s jinými pracemi zabývající se mechanikou dopravy, které také vznikly na Dopravní fakultě Jana Pernera.

Modelový příklad uvažuje tři varianty vozidlových odporů, následně je sledováno, jaký mají vliv na jízdní dobu, spotřebu energie, nebo podíl na jízdních odporech.

Pro modelový výpočet byly vybrány dva úseky Východního a východo-středomořského nákladního koridoru (RFC 7), který je na území České republiky shodný s vedením 1. tranzitního koridoru. V rozmezí od července 2021 do března 2023 však budou v úseku mezi Adamovem, Blanskem a následně i Brnem zaváděny výluky, které výrazně sníží kapacitu dopravní cesty, a to až na jednu trasu nákladního vlaku během denních hodin pro oba směry dohromady [15]. Další výluky čekají i další úseky koridoru, například mezi stanicemi Ústí nad Orlicí a Brandýs nad Orlicí již od května 2021. Následně bude provoz mezi Adamovem a Blanskem přerušen zcela na dobu tří měsíců, a proto budou muset dopravci volit odklonovou trasu přes Havlíčkův Brod, po tratích 250 a 230, které jsou sklonově podstatně náročnější. Údaje o nejnáročnějších úsecích, které svými sklony limitují technický normativ hmotnosti, jsou uvedeny v Tabulka 17. Pro přehlednost jsou uvedeny parametry maximální hmotnosti pouze pro lokomotivy 183.7 D, 189 D, 193 D, 383, 1216 a 1293 A, jak jsou uvedeny v TTP [16]. Hodnota v závorce platí pro rozjezd ze ŽST Tišnov a kdekoliv na trati.

Výpočty modelových příkladů byly provedeny pomocí softwaru MS Excel. Tento způsob byl zvolen pro jeho relativní jednoduchost vzhledem k rozsahu modelových příkladů. Rovněž vstupy do něj jsou neměnné a dochází k určitým zjednodušením, na které je ale brán zřetel a výsledky zásadně neovlivní. Alternativou k tomuto způsobu výpočtu a použití MS Excel by byl profesionální simulační program, například OpenTrack Railway, ale jde o licencovaný program a práce s ním ani není náplní bakalářského studia.

Pro výpočet byly vybrány ucelené nákladní kontejnerové vlaky, které spadají do vozidlových odporů kategorie T₄. Objem přepravy kontejnerů na české železnici dosáhl v roce 2019 podílu přes 18 % v nákladní dopravě [17]. Vlaky osobní dopravy byly vynechány z důvodu jejich menší hmotnosti, a tedy i menší hodnotou, kterou je pak měrný vozidlový odpor násobený, proto změna vozidlových odporů nebude tolik patrná.

Výstupy modelového příkladu pak mají přinést porovnání jízdní doby, spotřebu energie a podíl vozidlových odporů, při použití tří různých variant výpočtu vozidlových odporů.

Tabulka 17 – Parametry tras

Trasa	Objízdná		1. koridor	
Číslo trati dle KJŘ	250	230	260	010
Číslo trati dle TTP	324-	502	326A	501A
Úsek	Tišnov – Vlkov u Tišnova	Kutná Hora hl. n. – Leština u Světlé	Svitavy (km 233,2 – 236,2)	Ústí nad Orlicí – Česká Třebová
Maximální hmotnost vlaku [t]	1 350 (1100)	2 000	2 800	2 650
Největší povolená délka vlaku [m]	674		700	
Třída zatížení	D4			

Zdroj: [15], [16]

6.1 Vybrané úseky pro modelový příklad

Na trati 250 byl vybrán úsek Tišnov – Vlkov u Tišnova, který právě limituje maximální hmotnost vlaku, a i proto nákladní dopravci volí trasu přes Českou Třebovou, kde je kapacita dráhy v denních hodinách téměř vyčerpaná, ale sklonové podmínky jsou příznivější. Na trati 010 byl vybrán úsek Česká Třebová – Choceň, který je rovněž limitující, ale při menších sklonech a menších poloměrech oblouků. Proto byl tento úsek zahrnut do výpočtů v obou směrech. Tím vybrané úseky zahrnují poměrně velký sklon, v úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova,

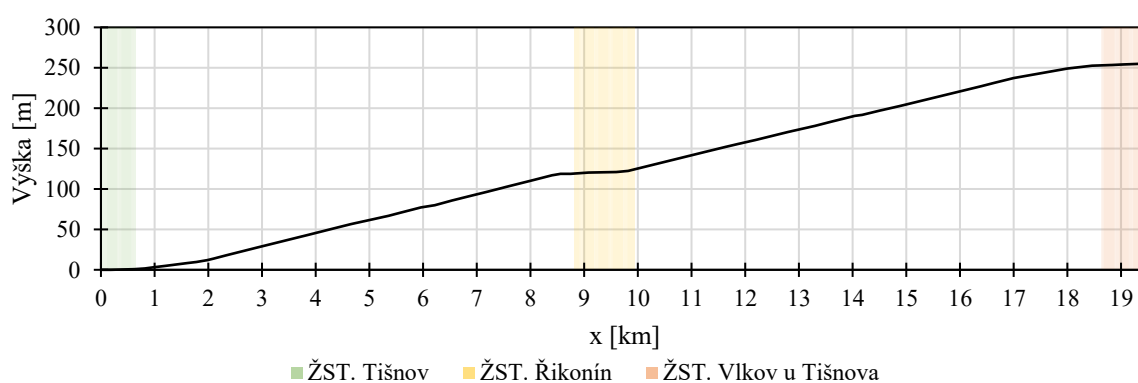
kde budou mít vozidlové odpory v souladu s tabulkou 14 a 15 jen malý podíl. Úsek Choceň – Česká Třebová nevykazuje tak velké sklony, proto se projeví vliv vozidlových odporů více. V případě jízdy opačným směrem, tedy Česká Třebová – Choceň, pak vlak pojedě po spádu a vozidlové odpory budou dosahovat ve většinové části úseku 100% podíl. Konkrétní hodnoty jsou vyčíslené v tabulce 18.

Tabulka 18 – Sklonové poměry na vybraných úsecích

Úsek	Tišnov – Vlkov u Tišnova	Choceň – Česká Třebová	Česká Třebová – Choceň
Délka [km]	19,5	24,9	
Kilometrická poloha [km]	29,8 – 49,3	246,1 – 271,0	271,0 – 246,1
Maximální sklon [‰]	18,08	8,4	4,75
Maximální náhradní sklon [‰]	20,02	9,51	5,00
Průměrný sklon [‰]	12,76	4,23	-4,23
Průměrný náhradní sklon [‰]	13,66	4,48	-3,00

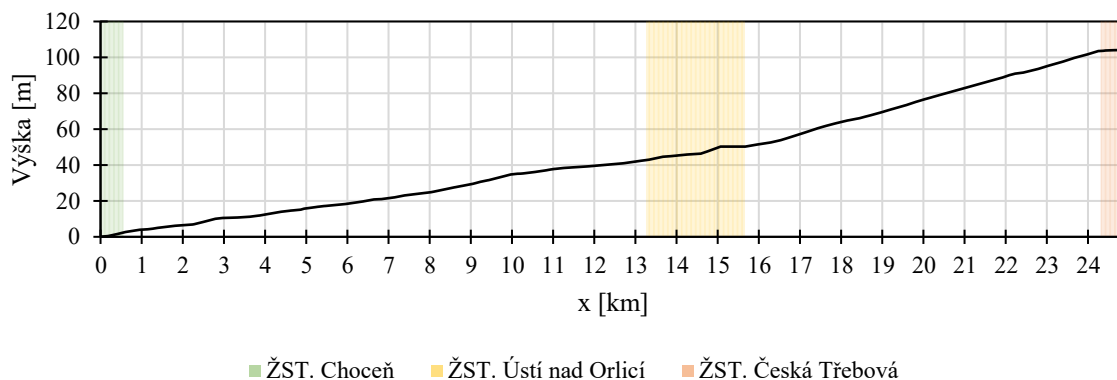
Zdroj: [18], [19]

Vstupní data pro výpočet náhradního sklonu byly nákresné přehledy železničního svršku [19], které zahrnují mimo jiné informace o staničení, traťových rychlostech, sklonu trati, obloucích a tunelech. Podélný profil úseku je společně polohou dopraven zobrazen na obrázku 11 a 12.



Zdroj: autor dle [19]

Obrázek 11 – podélný profil úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova



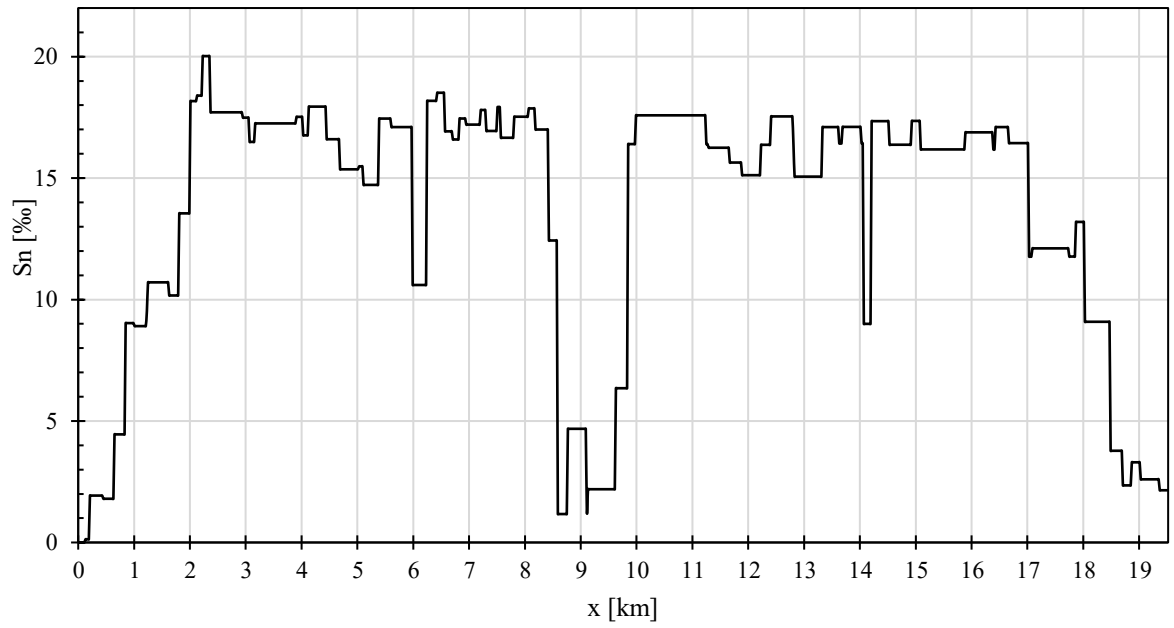
Zdroj: autor dle [19]

Obrázek 12 – podélný profil úseku Choceň – Česká Třebová

6.2 Matematický popis vybraných úseků

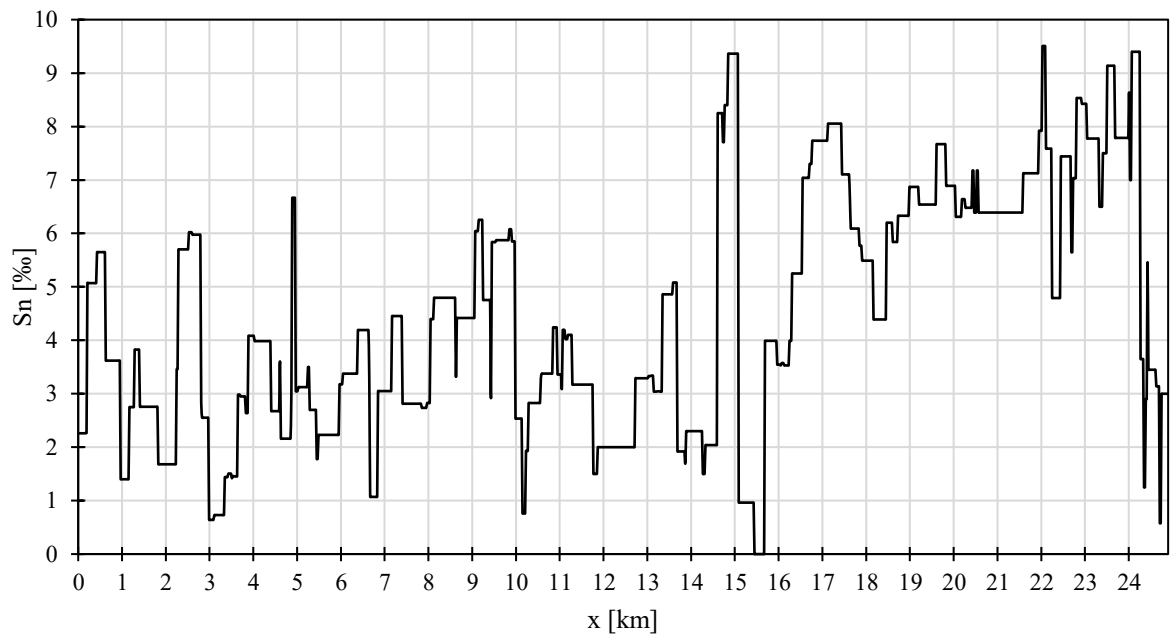
Zvolené úseky jsou rozděleny po dvaceti metrech na dílčí úseky s ohledem na vozidla vybraná pro tyto modelové příklady, která se svojí délkou blíží 20 m. Celý vlak tedy není uvažován jako jeden hmotný bod. Jako hmotný bod jsou uvažována jednotlivá vozidla, která při určitém zjednodušení obsazují právě celý jeden dílčí dvacetimetrový úsek. Zvoleným vozidlům bude dále ještě věnována kapitola. V souvislosti s tím nebyl použit ani redukovaný náhradní sklon, což příklad naopak zpřesňuje oproti variantě, kdy by byl celý vlak uvažován jako jeden hmotný bod. V důsledku toho, jak jednotlivá vozidla najíždí do dílčích úseků, se pak také mění plynuleji celkové traťové i vozidlové odpory a jejich vzájemný poměr je proto lépe pozorovatelný. Každý dílčí dvacetimetrový úsek pak vykazuje traťový odpor rovný náhradnímu sklonu dle vztahu 6. Grafické znázornění pak představují obrázky 13, 14 a 15, na kterých je vyneseno S_n v závislosti na dráze x .

Hodnota tunelového faktoru τ při použití (27) byla zvolena 1,25. Jde ale pouze o odhadovanou hodnotu z důvodu, že tunely, které se vyskytují na vybraném úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova, jsou dvoukolejné a jejich délka nedosahuje ani 1 km. Konkrétně jde o tunely Loučský (633 m), Lubenský (213 m) a Níhovský (531 m). Vedle toho práce zkoumající tunelový faktor τ [14] uvažuje tunely o délce 20 a 25 km. Zároveň hodnoty tunelových faktorů nebyly ověřeny v praxi, a proto jde o hodnotu, která v této práci, pro tyto poměrně krátké tunely, nemusí zcela správně reflektovat realitu. Pro názornost v této práci a modelovém příkladu je ale dostačující.



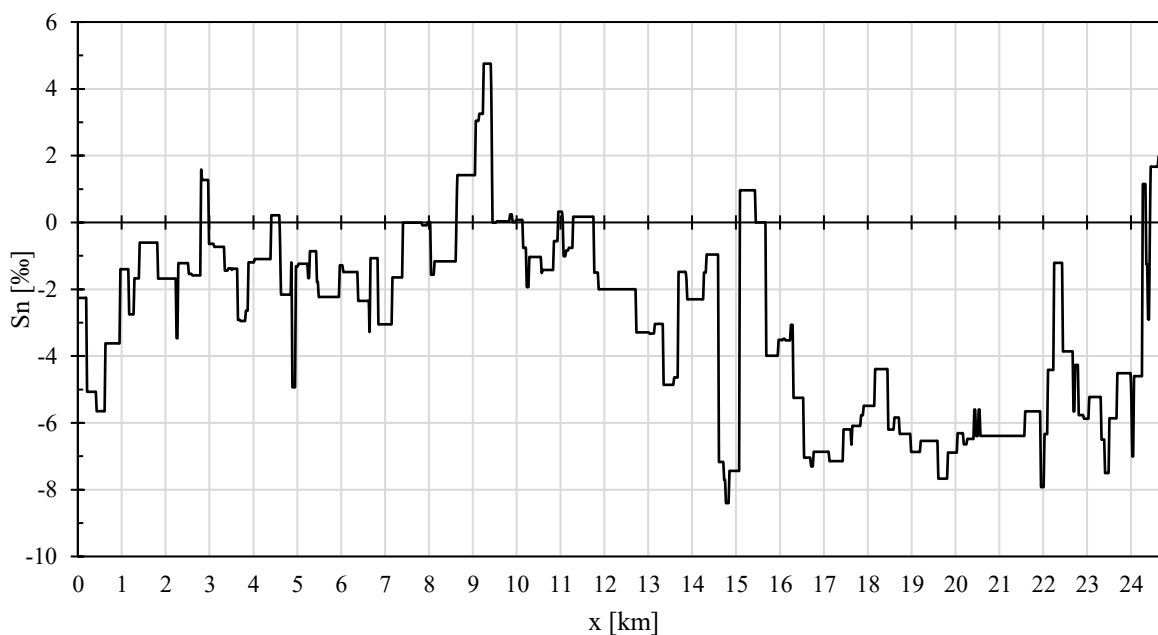
Zdroj: autor dle [19]

Obrázek 13 – náhradní sklon na úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova



Zdroj: autor dle [19]

Obrázek 14 – náhradní sklon na úseku Choceň – Česká Třebová



Zdroj: autor dle [19]

Obrázek 15 – náhradní sklon na úseku Česká Třebová – Chocẽ

6.3 Vozidla vybraná pro modelový příklad

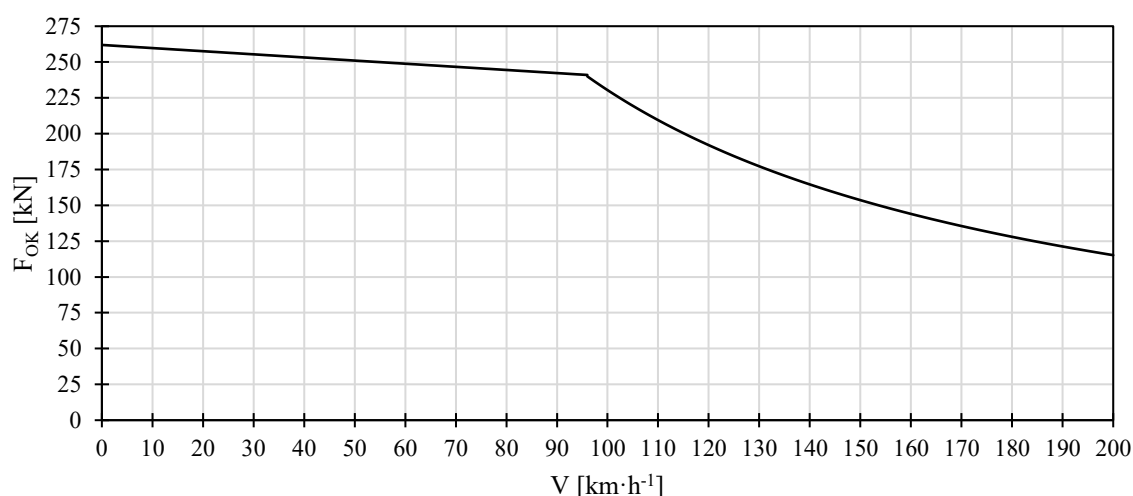
Pro potřebu modelového příkladu bylo vybráno hnací vozidlo řady 383 „Vectron“ z důvodu velkého počtu těchto vozidel jak v České republice, tak po celé Evropě (celkový počet těchto vyrobených lokomotiv již přesáhl 1000 kusů) i pro plynulou regulaci výkonu, kterou je možné popsat v rámci modelového příkladu snadněji než například odbočkovou regulaci výkonu u starších střídavých lokomotiv. Pro potřeby výpočtu postačí pouze základní parametry hnacího vozidla uvedené v tabulce 19 a na obrázku 16.

Tabulka 19 – parametry lokomotivy ř. 383

Hmotnost [t]	M_{hv}	89
Výkon [kW]	P_{max}	6 400
Účinnost [%]	η	85
Součinitel rotačních hmot [-]	ρ_{hv}	0,1

Zdroj: [20]

Trakční charakteristika hnacího vozidla je omezena adhezí dle TSI LOC&PAS [20] a ideální trakční hyperbolou. Závislost tažné síly na obvodu kola na rychlosti je uvedena na obrázku 16. Je potřeba zmínit, že oficiální zdroj [21] uvádí maximální tažnou sílu 300 / 320 kN, která pak neodpovídá trakční charakteristice na obrázku 16 a uvažované v této práci. Podle výpočtu (28) se pohybuje maximální tažná síla kolem 260 kN, jde tedy o hodnotu menší o 40 / 60 kN. Tento vstup je ale do všech variant výpočtu stejný a vliv vozidlových odporů tedy nezkreslí.



Zdroj: autor

Obrázek 16 – Použitá zjednodušená trakční charakteristika lokomotivy 383

Z nákladních vozů byl vybrán intermodální vůz Sgnns. Na něj je možné naložit ISO kontejnery o délce 20', 30' a 40' v různých kombinacích.

Tabulka 20 – parametry vozu Sgnns

Maximální hmotnost loženého vozu [t]	M_{dv}	90
Maximální rychlost loženého vozu [km·h ⁻¹]	V_{max}	100
Součinitel rotačních hmot [-]	ρ_{dv}	0,05

Zdroj: [22]

Posledním vstupem do modelového příkladu, který se týká vozidel, je technická norma zátěže (TNZ). Vzhledem k dalším zvoleným vstupním parametrům byl vybrán vztah určení pro TNZ vozidel s plynulou regulací pro rozjezd dle vztahu (29).

$$M_{tR} = \frac{F_h - S_n \cdot M_g \cdot g}{(o_d + s_n + 1,5) \cdot g} \quad (29)$$

Zde může docházet k odlišným výsledkům vzhledem k zadaným vstupním hodnotám. Z Přehledu technických normativu hmotnosti [18] vyplývá, že není ve výpočtu používán náhradní sklon S_n , ale pouze sklon S . Limitující parametr je tedy nižší o odpor z jízdy obloukem. Rozdíly mezi sklonem a náhradním sklonem jsou uvedeny v tabulce 18. Pro modelový příklad byl brán v úvahu S_n , protože byly zvoleny vlaky o hmotnosti pohybující se na hraně TNZ a při přidání další zátěže vyhovující výpočtu pouze s použitou hodnotou sklonu docházelo k dosažení maximální rychlosti velice pomalu, nebo vůbec. Příčinou toho jsou četné oblouky, mnohdy o malých poloměrech, na úsecích vybraných pro modelový příklad.

6.4 Způsob řešení

Jak již bylo zmíněno pro modelový příklad, byly vybrány tři varianty výpočtu vozidlových odporů, konkrétně jde o vztahy uvedené v tabulce 21.

Tabulka 21 – vztahy pro výpočet vozidlových odporů použité v modelovém příkladu

Označení	Vztah	Číslo vztahu	Zdroj
T_4	$1,3 + 0,00015 \cdot V^2$	(30)	[2]
S_{DFJP}	$0,9 + 0,00012 \cdot V^2$	(31)	[1]
O_{KV}	$A_{Ki} \cdot M_V + \tau \cdot 3,01 \cdot V^2$	(32)	[11]

Zdroj: autor

Výpočet pak spočívá v řešení pohybové rovnice (2) pro každý dílčí úsek i . Počet obsazených dílčích úseků i odpovídá počtu vozidel řazených v soupravě vlaku. Na každé vozidlo působí traťový odpor odpovídající S_{ni} v daném dílčím úseku i . Celkový traťový odpor v dílčím úseku O_{ti} [kN] pak odpovídá vztahu

$$O_{ti} = \sum_{i=1}^{n_v} S_{ni} \cdot m \cdot g \quad (33)$$

kde:

- n_v je počet vozidel řazených v soupravě vlaku,
- S_{ni} je náhradní sklon v dílčím úseku i [%o].

Celkový vozidlový odpor v dílčím úseku i O_{ti} [kN] je dán vztahem 34:

$$O_{vi} = \sum_{i=1}^{n_v} o_{vi} \cdot m \cdot g \quad (34)$$

kde:

- o_{vi} je měrný vozidlový odpor v daném dílčím úseku, vybraný z tabulky 21.

Celkový jízdní odpor O_{vli} [kN] je dán vztahem (35):

$$O_{vli} = O_{ti} + O_{vi} \quad (35)$$

Velikost F_{OKi} [kN] v dílčím úseku je vypočítána dle vztahu 36 a to až do kritické rychlosti, kdy výkon lokomotivy dosáhne maximální hodnoty.

$$F_{OKi} = m_{hv} \cdot \mu \cdot g \quad (36)$$

kde:

- μ je součinitel adheze, pro rychlost do $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ definován dle TSI jako $\mu = 0,3 - 0,00025 \cdot V$ [-] [20].

Následně síla na obvodu kola odpovídá vztahu (37), kdy závisí na poměru maximálního výkonu a aktuální rychlosti vozidla.

$$F_{OKi} = \frac{P_{max}}{V} \quad (37)$$

Síla na obvodu kola působí proti traťovým a vozidlovým odporům. Součtem odporů a kolové síly, respektive jejich rozdílem daný smyslem sil je pak dána výsledná síla v ose x dle vztahu 38 je F_{xi} [kN].

$$F_{xi} = F_{OKi} - O_{ci} \quad (38)$$

V souladu se vztahem (2) je hmotnost vozidel uvažována se součinitelem rotačních hmot ρ . Zjištěné hodnoty jsou pak dosazeny do vztahu (39), kterým je pak zjištěno zrychlení \ddot{x} [$m \cdot s^{-2}$] v dílčím úseku i. Z důvodu, že vozidlové odpory jsou závislé na rychlosti, ale rychlost je získána až v závislosti na zrychlení právě ze vztahu 37, jsou uvažovány síly působící v předchozím úseku.

$$\ddot{x} = \frac{F_{xi-1} - O_{ci-1}}{M_{hv} \cdot (1 + \rho_{hv}) + M_{dv} \cdot (1 + \rho_{dv})} \quad (39)$$

kde:

- M_{hv} je hmotnost hnacího vozidla [t],
- M_{dv} je hmotnost dopravovaného vozidla [t],
- ρ_{hv} je součinitel rotačních hmot hnacího vozidla [-],
- ρ_{dv} je součinitel rotačních hmot dopravovaného vozidla [-].

Střední zrychlení $\ddot{x}_{stř}$ [$m \cdot s^{-2}$] v úseku je získáno průměrováním zrychlení v aktuálním a předchozím dílčím úseku (40):

$$\ddot{x}_{stř} = \frac{\ddot{x}_i + \ddot{x}_{i-1}}{2} \quad (40)$$

Následně je získána rychlost v [$m \cdot s^{-1}$] dle (41), ze které je po vynásobení konstantou 3,6 převedena na V v jednotkách [$km \cdot h^{-1}$].

$$v_i = \sqrt{v_{i-1}^2 + 2 \cdot \ddot{x}_{stř} \cdot 20} \quad (41)$$

Pro zjednodušení a vzhledem k hodnotám, které jsou v modelovém příkladu sledovány, jsou uvažovány pouze tři režimy jízdy, kdy: $\ddot{x} > 0$ a vlak zrychluje v souladu s (41), nebo $\ddot{x} = 0$ a vlak jede konstantní rychlostí, při dosažené maximální rychlosti a síly působící na vlak F_{xi} dle (38) jsou v rovnováze. Nebo $\ddot{x} < 0$ a vlak zpomaluje, v modelovém příkladu ne kvůli nedostatku F_{OK} , respektive velkým hodnotám S_n , ale z důvodu brzdění. Brzdění je zjednodušeno na konstantní působení síly tak, aby výslednice F_{xi} byla rovna hodnotě -200 kN a \ddot{x} tedy nabývá hodnot do $-0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Takovéto brzdění je uvažováno z důvodu jistého sjednocení pro všechny použité vozidlové odpory, aby se výsledky projevovaly na jízdní době v důsledku rychlejšího, nebo pomalejšího dosažení maximální rychlosti. Rekuperace není uvažována, respektive není započítávána generovaná energie. Ze stejného důvodu nebyla uvažovaná ani jízda výběhem. Při reálné jízdě vlaku by mohla být jízdní doba ovlivněna technologií jízdy a zkušeností strojvedoucího a jeho prací s brzdou.

6.5 Způsob zjištění výsledků

Po sestavení matematického modelu, díky kterému lze v každém dílčím úseku stanovit hodnoty sil působících na vlak, rychlosti, zrychlení vlaku a výkonu hnacího vozidla, lze zjistit výstupy výpočtu.

Pro úsek, ve kterém není zrychlení nulové, je jízdní doba v dílčím úseku t_i [s] zjištěna dle (42):

$$t_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\ddot{x}} \quad (42)$$

V případě, že se vlak pohybuje konstantní rychlostí pak dle (43):

$$t_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{v_i} \quad (43)$$

Celková jízdní doba t_c [s] je pak zjištěna součtem dílčích jízdních dob (44):

$$t_c = \sum_{(i)} t_i \quad (44)$$

Spotřebovanou trakční energii v dílčím úseku E_i [J] udává (45):

$$E_i = \frac{1}{\eta} \cdot F_{oki} \cdot x_i \quad (45)$$

kde:

- η je účinnost hnacího vozidla [-].

Celková spotřebovaná trakční energie E_c [J] je opět získána součtem přes všechny dílčí úseky (46):

$$E_c = \sum_{(i)} E_i \quad (46)$$

Vydělením hodnoty E_c konstantou 3 600 je pak získána celková spotřebovaná energie v kWh.

6.6 Výsledky modelového příkladu

V této kapitole jsou prezentovány výsledky modelových příkladů na uvedených úsecích. Vždy je počítáno se zastavením v mezilehlé stanici, aby byl lépe pozorovatelný vliv na jízdní dobu. Z důvodu vysokého vytížení daných úseků nelze vyloučit, že by byly podobné vlaky v reálném provozu skutečně předjížděny rychlejšími vlaky osobní dopravy. Jednotlivé podkapitoly přináší souhrnné výsledky. Obrázky 17, 20 a 23 představují dráhové tachografy, obrázky 18, 21 a 24 pak vyjadřují podíl vozidlových odporů O_v na celkových odporech O_c a obrázky 19, 22 a 25 celkovou spotřebovanou energii a energii spotřebovanou na překonání vozidlových odporů, vždy souhrnně pro všechny tři varianty použitých vzorců pro výpočet vozidlových odporů. Souhrnné výsledky jsou uvedeny v tabulkách 22, 23 a 24.

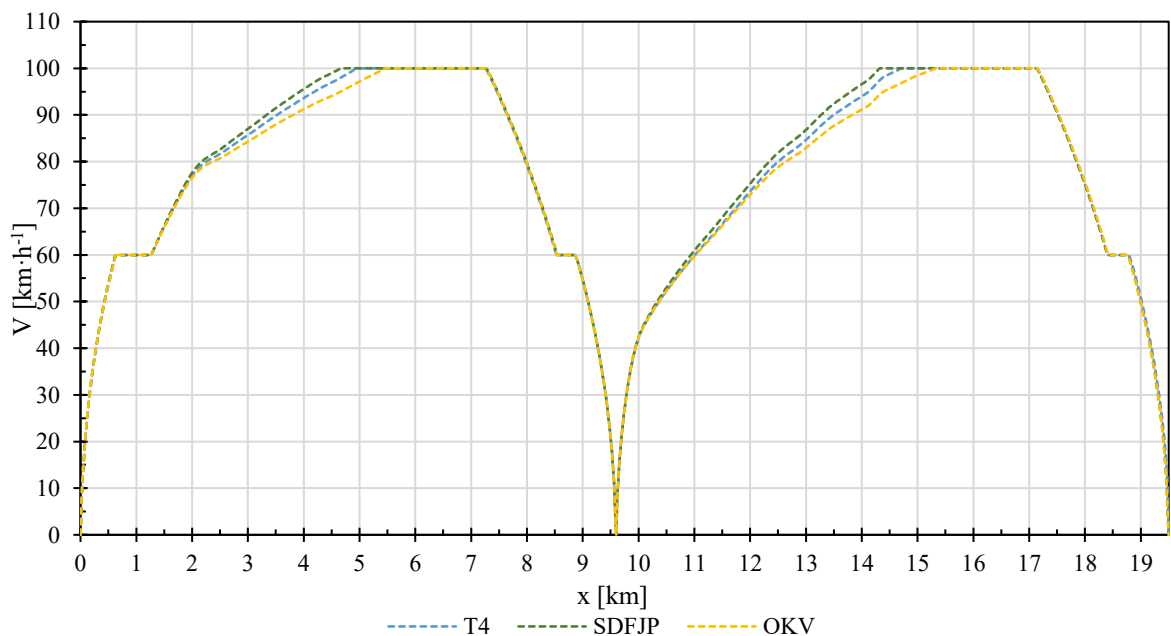
6.6.1 Tišnov – Vlkov u Tišnova

Hmotnost vlaku byla stanovena 964 t včetně hnacího vozidla a 875 t bez, což odpovídá deseti vozům, každý o hmotnosti 87,5 t. Délka úseku je 19,5 km. Převážní výkon tedy dosahuje hodnoty 17 062,5 hrtkm.

Tabulka 22 – dopravní ukazatele pro úsek Tišnov – Vlkov u Tišnova

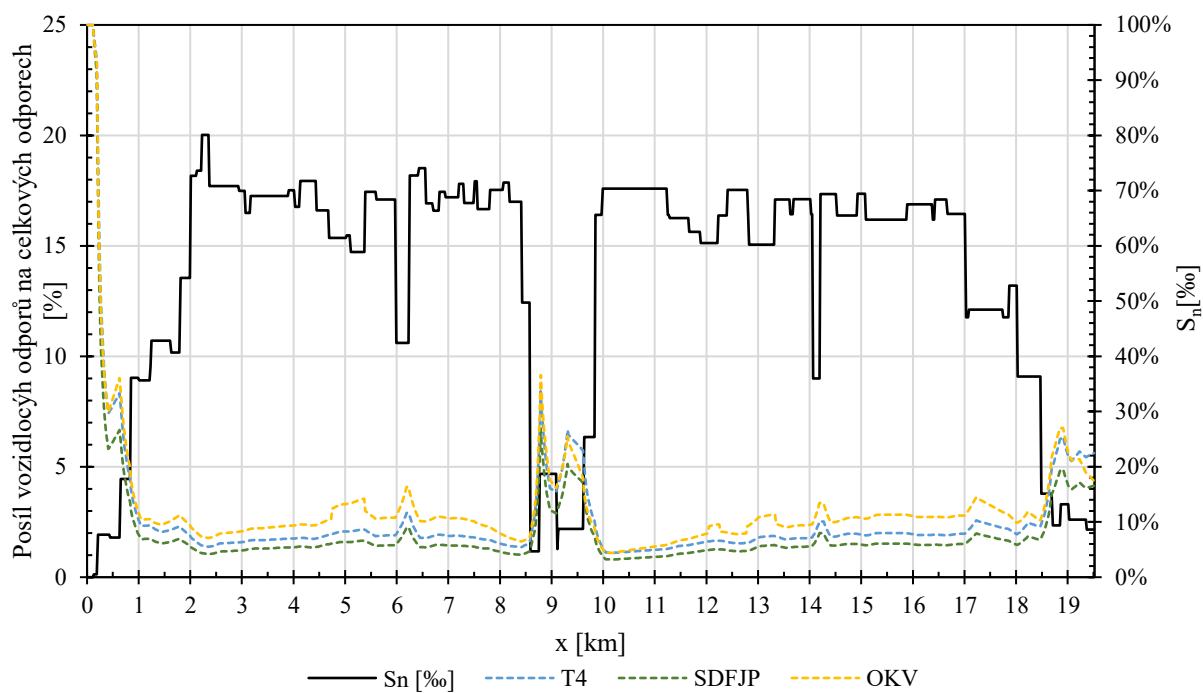
	OKV	SDFJP	T4
Jízdní doba [mm:ss]	17:43	17:29	17:21
Spotřeba energie [kWh]	1 112	1 043	1 067
Energie na vozidlové odpory [kWh]	153	84	112
Měrná spotřeba trakční energie [kWh/km]	57,04	53,51	54,70
Měrná spotřeba trakční energie [Wh/hrtkm]	65,17	61,15	62,51
Měrná spotřeba trakční energie na O_v [kWh/km]	7,85	4,32	5,75
Podíl spotřebované trakční energie na O_v [%]	13,76	8,08	10,51
Průměrný podíl O_v na O_c [%]	13	8	11

Zdroj: autor



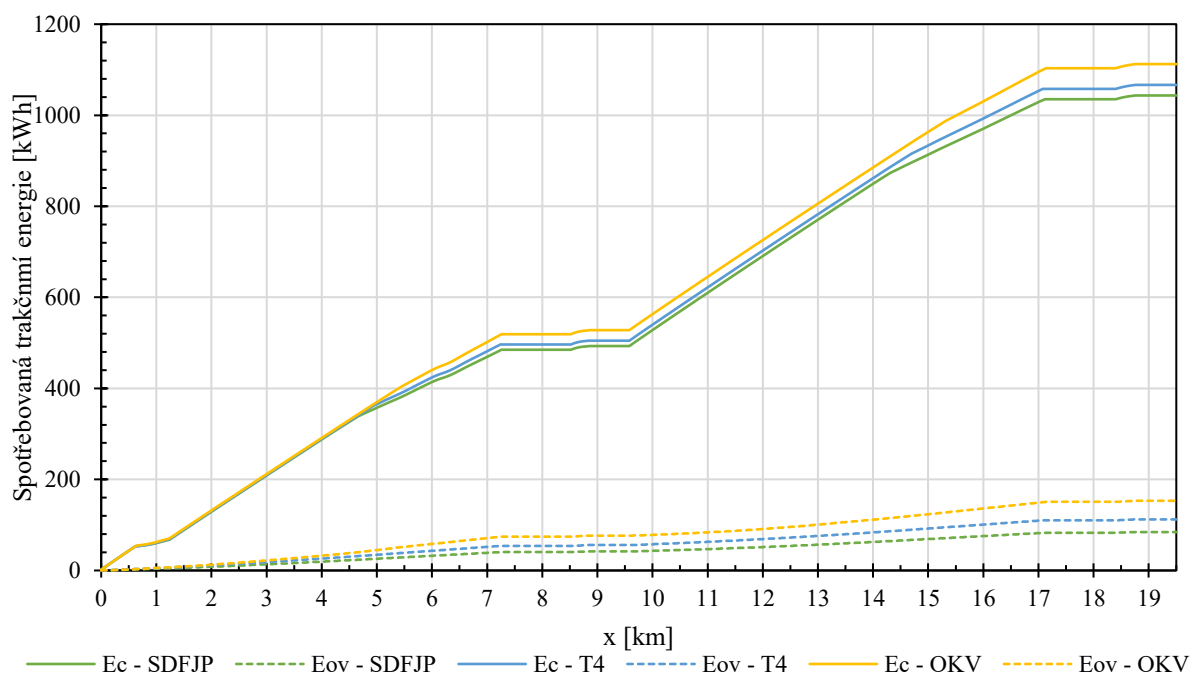
Zdroj: autor

Obrázek 17– dráhový tachograf pro úsek Tišnov – Vlkov u Tišnova



Zdroj: autor

Obrázek 18 – podíl vozidlových odporů na celkových odporech v úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova



Zdroj: autor

Obrázek 19 – spotřeba trakční energie v úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova

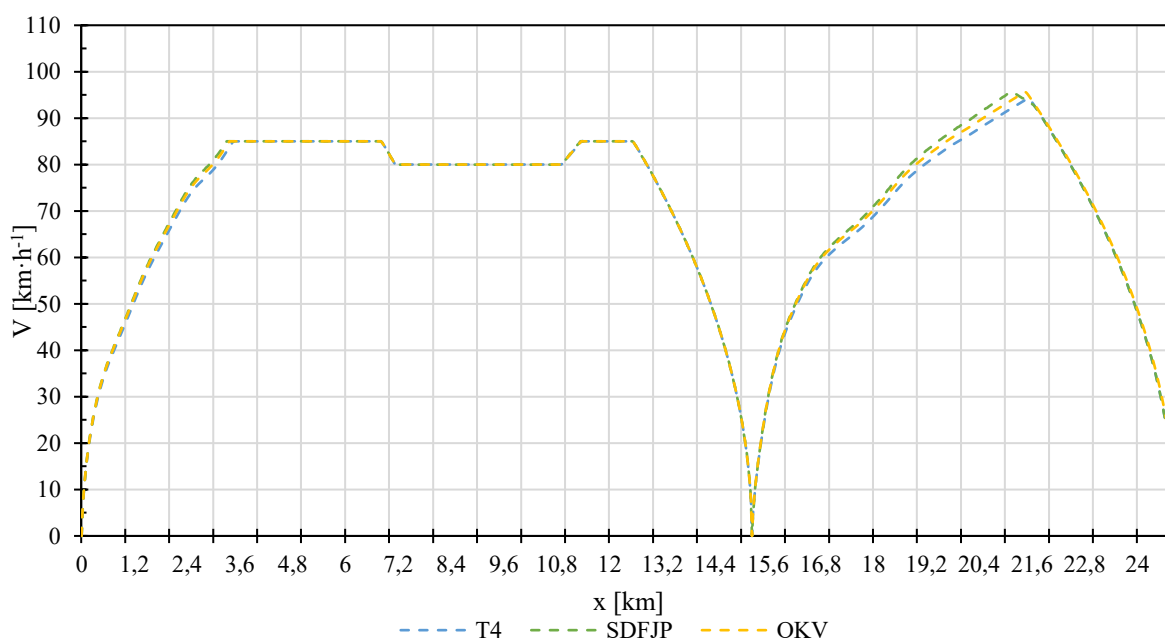
6.6.2 Choceň – Česká Třebová

Hmotnost vlaku byla stanovena 1 839 t včetně hnacího vozidla a 1750 t bez, což odpovídá dvaceti vozům, každý o hmotnosti 87,5 t. Délka úseku je 24,9 km. Převážní výkon tedy dosahuje hodnoty 48 575 hrtkm.

Tabulka 23 – dopravní ukazatele pro úsek Choceň – Česká Třebová

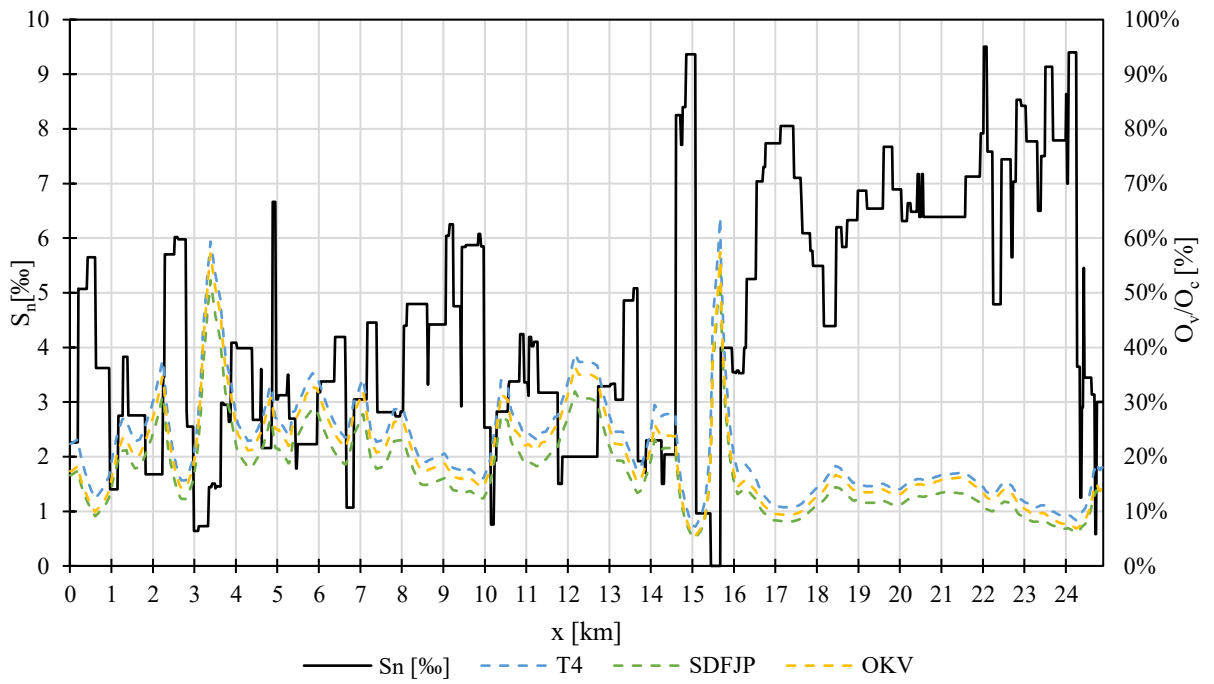
	OKV	SDFJP	T4
Jízdní doba [mm:ss]	25:25	25:16	25:45
Spotřeba energie [kWh]	1 082	1 045	1 109
Energie na vozidlové odpory [kWh]	207	176	235
Měrná spotřeba trakční energie [kWh/km]	54,08	52,25	55,45
Měrná spotřeba trakční energie [Wh/hrtkm]	24,82	23,98	25,45
Měrná spotřeba trakční energie na Ov [kWh/km]	10,37	8,80	11,75
Podíl spotřebované trakční energie na Ov [%]	19,18	16,83	21,18
Průměrný podíl O_v na O_c [%]	20	17	22

Zdroj: autor



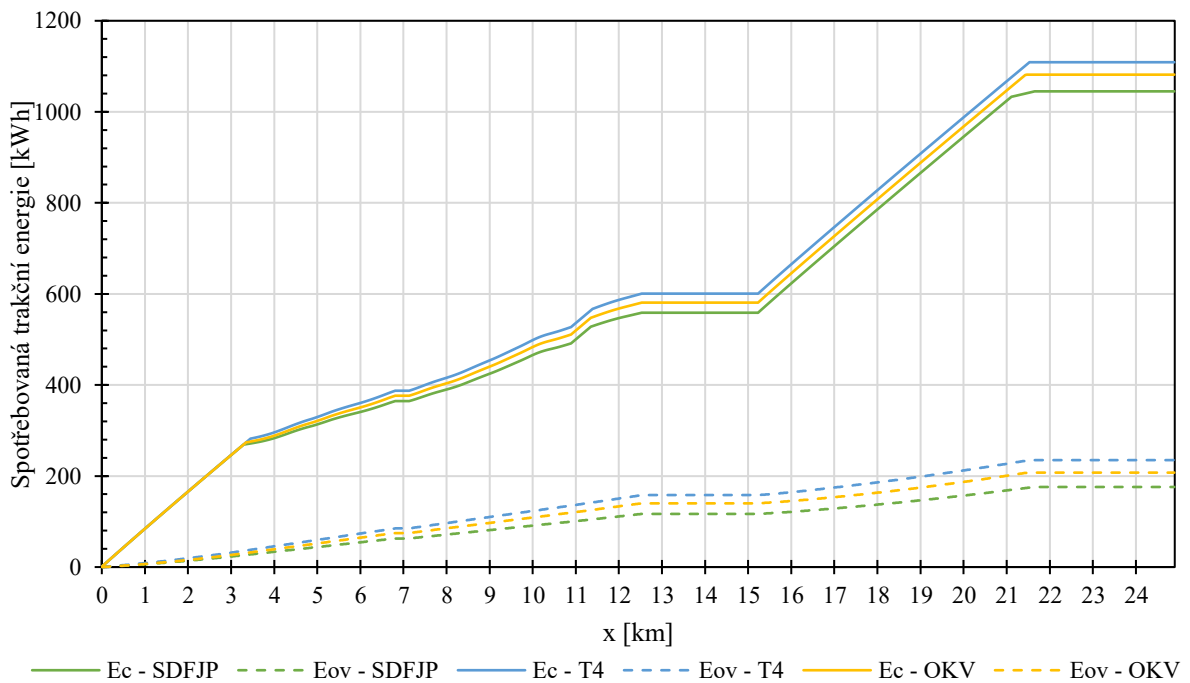
Zdroj: autor

Obrázek 20 – dráhový tachograf pro úsek Choceň – Česká Třebová



Zdroj: autor

Obrázek 21 – podíl vozidlových odporů na celkových odporech v úseku Chocněň – Česká Třebová



Zdroj: autor

Obrázek 22 – spotřeba trakční energie v úseku Chocněň – Česká Třebová

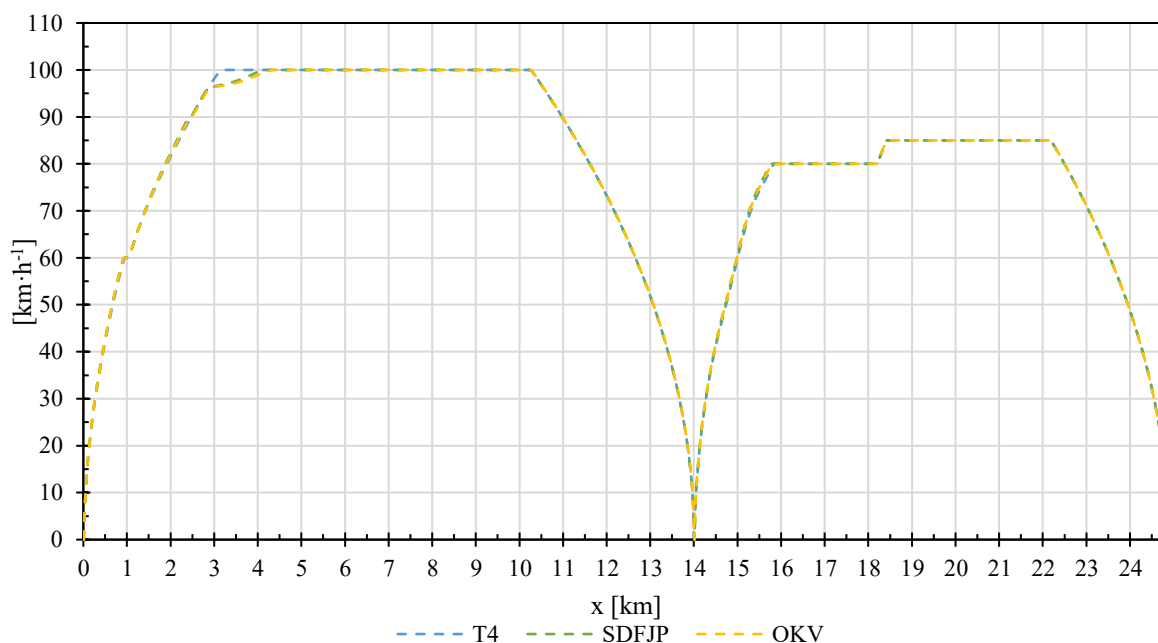
6.6.3 Česká Třebová – Choceň

Hmotnost vlaku byla stanovena 1 839 t včetně hnacího vozidla a 1750 t bez, což odpovídá dvaceti vozům, každý o hmotnosti 87,5 t. Délka úseku je 24,9 km. Převážní výkon tedy dosahuje hodnoty 48 575 hrtkm. Parametry jsou tedy shodné, jako v předchozím případě.

Tabulka 24 – dopravní ukazatele pro úsek Česká Třebová – Choceň

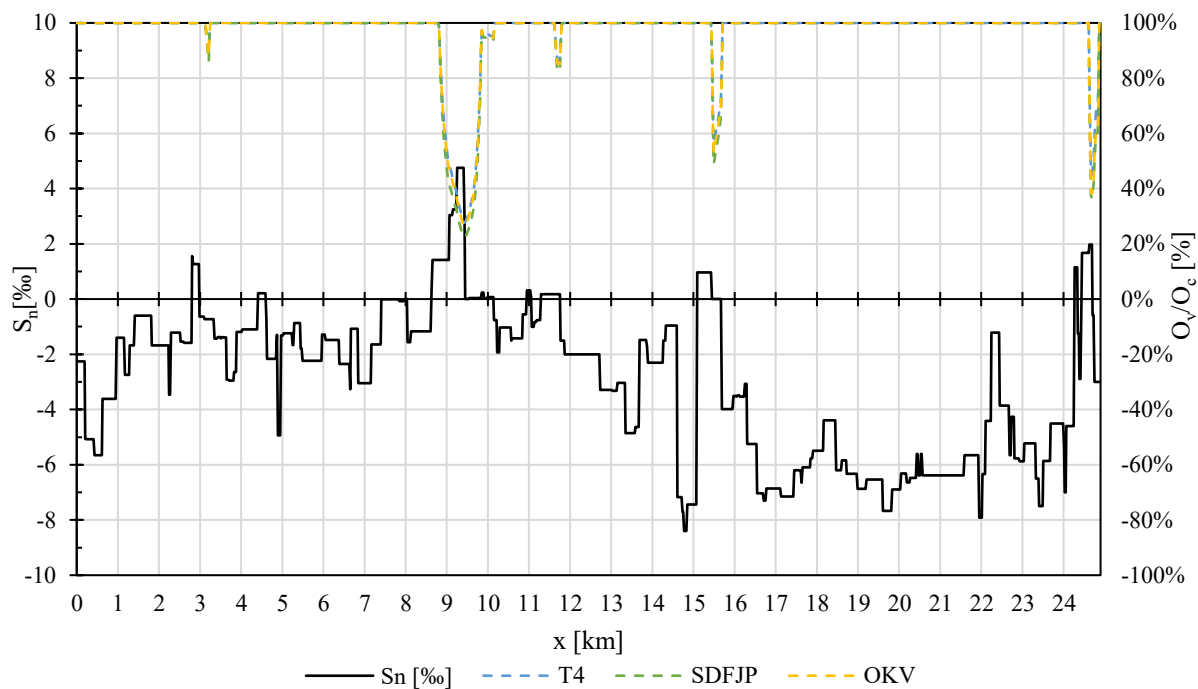
	OKV	SDFJP	T4
Jízdní doba [mm:ss]	22:46	22:45	22:44
Spotřeba energie [kWh]	418	463	499
Energie na vozidlové odpory [kWh]	160	121	179
Měrná spotřeba trakční energie [kWh/km]	24,06	23,17	24,94
Měrná spotřeba trakční energie [Wh/hrtkm]	11,04	10,64	11,45
Měrná spotřeba trakční energie na Ov [kWh/km]	8,21	6,20	9,17
Podíl spotřebované trakční energie na Ov [%]	33,26	26,09	35,85
Průměrný podíl O_v na O_c [%]	97	97	97

Zdroj: autor



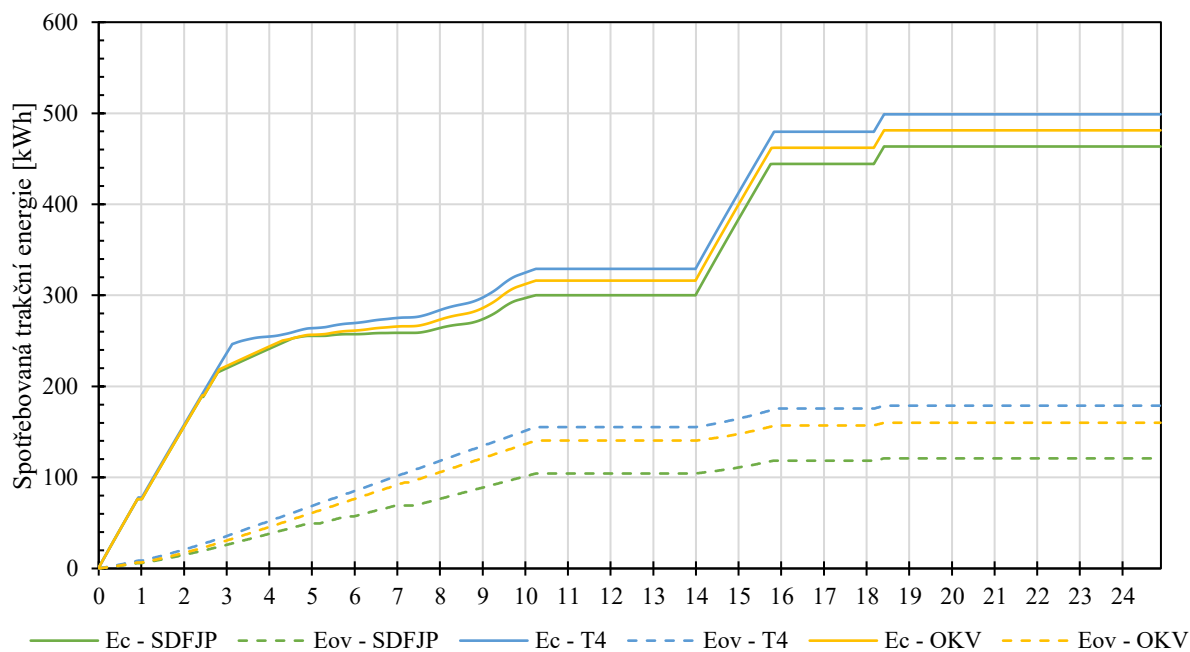
Zdroj: autor

Obrázek 23 – dráhový tachograf pro úsek Česká Třebová - Choceň



Zdroj: autor

Obrázek 24 – podíl vozidlových odporů na celkových odporech v úseku Česká Třebová - Choceň



Zdroj: autor

Obrázek 25 – spotřeba trakční energie v úseku Česká Třebová – Choceň

6.7 Dopady na provozní ukazatele

Z modelového příkladu lze vyvodit určité závěry, které se týkají provozních ukazatelů. Týkají se maximální hmotnosti dopravovaných vozidel, jejichž případné navýšení by ocenili dopravci, dále zpřesnění jízdních dob, což má přínos pro provozovatele dráhy. Posledním ukazatelem je spotřeba trakční energie. Při určitých způsobech její kalkulace a zúčtování bude opět přínosem pro dopravce, budou-li schopni spotřebu přesně spočítat.

6.7.1 Maximální hmotnost dopravovaných vozidel

Maximální hmotnost vlaku bude zajímat především dopravce, bude-li rozdíl takový, že ovlivní počet dopravovaných vozidel ve vlaku. Ten je stanovený skrze maximální hmotnost vlaku dle vztahu (29). Na možné odlišnosti v použití S_n , nebo S (který nezahrnuje odpor z jízdy obloukem) coby vstupu do výpočtu TNZ bylo již upozorněno výše. V případě vztahu O_{KV} (47) je dosazována hmotnost vozidel do výpočtu vozidlových odporů. Ten je ale v rámci vztahů (28) a (48) již vstupním parametrem, a proto je uvedené porovnání pouze pro výpočet vozidlových odporů dle vztahů T_4 (49) a S_{DFJP} (50).

Tabulka 25 – Vliv výpočtu TNZ

		S_n [%o]	O_v	M_d [t]	$M_d S_{DFJP} - T_4$ [t]	$S_{DFJP} - T_4$ [%]	Vozů navíc (90 t)	Vozů navíc (20 t)
Choceň – Česká Třebová	Max. sklon	8	T_4	2 388	166	6	1	8
			S_{DFJP}	2 554				
	Max. S_n	10	T_4	2 001	116	5	1	5
			S_{DFJP}	2 117				
Tišnov – Vlkov u Tišnova	Max. sklon	18	T_4	1 197	42	3	0	2
			S_{DFJP}	1 239				
	Max. S_n	20	T_4	1 084	34	3	0	1
			S_{DFJP}	1 119				

Zdroj: autor

Z tabulky 25 vyplývá, že při použití výpočtu O_v v podobě T_4 , nebo S_{DFJP} , lze do soupravy vlaku zařadit zátěž o 3 až 6 % vyšší, o hmotnosti 34 až 166 t, dle toho, jak se mění S , respektive S_n a použitý vztah pro vozidlový odpor. Porovnávány jsou ale pouze zmíněné

vozdilové odpory, nikoliv NTZ uvedený v pomůckách Správy železnic, protože v něm jsou pak hodnoty zaokrouhlovány na celé stovky s určitým krokem (např.: 1000, 1100, 1200, 1350, ...) a hmotnost jednoho plně loženého vozu o hmotnosti 90 se pak nachází mimo tento krok. Navíc není brána v úvahu ani maximální délka vlaku, která by byla dalším omezujícím parametrem. Jde čistě jen o porovnání rozdílů v maximální hmotnosti dopravovaných vozidel, bez ohledu na další aspekty.

6.7.2 Jízdní doby

Dopad na jízdní dobu při stejných vstupech a pouze rozdílných vozidlových odporech je minimální. Největší zjištěný rozdíl je pouhých 22 s, který je poměrně bezvýznamný, vzhledem k tomu, že GVD je konstruován na půlminuty. Také je potřeba brát v úvahu i fakt, že rozdíl v jízdní době vzniká při dosahování maximální rychlosti a významně se tedy na rozdílů jízdních dob projeví opětovné rozjíždění ze stanic. Při použití moderních hnacích vozidel, u kterých strojvedoucí nastaví maximální poměrný tah, lze očekávat, že díky řídicím systémům využijí maximálně svojí tažnou sílu a rozjezd bude odpovídat i modelovému příkladu, nebo simulaci. Pokud budou hnací vozidla rovněž brzdit dle ideální brzdě křivky (a tedy vždy stejně, jako v modelovém příkladu), je možné přikládat zjištěným hodnotám určitou váhu. Pokud ale v praxi závisí rozjezd, respektive zvyšování rychlosti a brzdění pouze na zkušenosti a dovednosti strojvedoucího, jsou hodnoty do půl minuty a pravděpodobně i do celé (v souvislosti s délkou úseku, na kterém je rozdíl jízdní doby počítán) zanedbatelné. Případné využití by zřejmě připadalo v úvahu pro mikrosimulace v rámci stanic, kde by záleželo na rychlosti uvolnění kolejových úseků a výhybek. Pak by přesnější hodnoty i v rámci desítek vteřin mohly mít vliv na posílení stability provozu ve vytížených dopravnách.

Při porovnání zjištěných jízdních dob s Pomůckou s typovými jízdními dobami, rychlostmi a brzdícími procenty pro vlaky nákladní dopravy, kromě lokomotivních vlaků, která je tvořena dle Směrnice pro tvorbu jízdního řádu a s využitím předpisu V7 [2], se již naskýtá zajímavější náhled na problematiku jízdních dob. Jízdní doby dle této pomůcky jsou stanoveny pro průjezd dopravnami a při využití stanovené rychlosti.

V úseku Tišnov – Vlkov u Tišnova mohou vlaky využívat konstantní maximální traťovou rychlost $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Vlak z modelového příkladu jedoucí v celém úseku rychlostí $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ by jej bez zastavení překonal za 11 minut a 42 vteřin. Při zaokrouhlení na půl minuty pak tedy za 12 minut. Služební pomůcka udává jízdní dobu o 3 minuty delší.

V případě úseku Česká Třebová – Choceň by vycházela jízda bez zastavení po zaokrouhlení na 17,5 minuty, pomůcka uvádí o 6 minut více, opačným směrem pak 18 minut a v tomto případě je v pomůcce uvedena jízdní doba o 8 minut delší. I zde ale platí, že záleží na zkušenosti strojvedoucího, jak by vedl vlak, protože maximální rychlost na tomto úseku se často mění a tomu je potřeba přizpůsobit způsob jízdy. Obecně ale platí, že při rozjezdu a urychlování vozidel mají vozidlové odpory vliv především na to, jak rychle vlak dosáhne maximální rychlosti, a na spotřebu energie. Při jízdě ustálenou (maximální) rychlostí, kdy již nedochází k urychlování vozidel, ale jen vyrovnávání vozidlových odporů silou F_{OK} , mají vozidlové odpory vliv již jen na spotřebu energie, za předpokladu, že hmotnost vlaku není na hraně maximální možné hmotnosti.

6.7.3 Spotřeba energie

Spotřeba trakční energie byla počítána čistě na straně H_v , uvažuje tedy vozidlo závislé trakce a neuvažuje ztráty v trakčním vedení ani případný další odběr na provoz vozidla, který by byl však minimální (topení, klimatizace, svícení, napájení příslušenství). Účelem je zjistit spotřebu energie na straně dopravovaných vozidel, respektive vliv odporu na spotřebu.

Poskytování trakční energie je součástí doplňkových sužeb provozovatele dráhy. V současné době je spotřeba účtována s ohledem na měrnou spotřebu a na další koeficienty zahrnující roční období, technologickou spotřebu a technické ztráty, nebo dle záznamu systému měření spotřeby elektřiny (EMS) umístěného v hnacím vozidle.

Případné využití výpočtu by mohlo být alternativou těmto způsobům, které jsou vyhodnoceny před uskutečněním dopravního výkonu. Naopak před uskutečněním dopravního výkonu může výpočet posloužit k predikci očekávané spotřeby na straně provozovatele dráhy, respektive dodavatele trakční energie, a na straně dopravce k predikci očekávaných nákladů na trakční energie pro dané výkony.

Tabulka 26 uvádí hodnoty z modelového příkladu a jak se s použitým vozidlovým odporem mění vypočtená spotřeba trakční energie (E_c) na hrtkm.

Tabulka 26 – Vliv O_v na spotřebu trakční energie

Úsek	Měrná spotřeba energie [kWh/hrtkm]			Rozdíl [kWh/hrtkm]		Rozdíl [%]	
	T₄	S_{DFJP}	O_{KV}	T ₄ - S _{DFJP}	T ₄ - O _{KV}	T ₄ - S _{DFJP}	T ₄ - O _{KV}
Tišnov – Vlkov u Tišnova	54,7	53,5	57,0	1,19	-2,34	2,18	-4,28
Česká Třebová – Choceň	25,5	24,0	24,8	1,47	0,63	5,78	2,48
Choceň – Česká Třebová	11,5	10,6	11,0	0,81	0,41	7,07	3,58

Zdroj: autor

Na základě pouhých tří modelových příkladů nelze dost dobře vztáhnout zjištěné procentuální rozdíly obecně na nákladní dopravní výkony v elektrické trakci na české železnici. Lze je ale dát do souvislostí s dalšími fakty: Dopravní výkon vlaků nákladní dopravy v elektrické trakci za rok 2019 dosáhl hodnoty 30,517 mld. hrtkm. [23]. Průměrná měrná spotřeba trakční energie nákladních vlaků je 20 kWh/tis. hrtkm [24]. Cena trakční energie poskytovaná (tehdejší) SŽDC od 1.1.2019 byla stanovená na 2 394,93 Kč/MWh [25]. To v celkovém součtu dává za rok 2019 spotřebovanou trakční energii v hodnotě přes 610 mil. kWh, tedy odpovídající částce přes 1 461 mil. Kč, které dopravci zaplatili SŽDC za trakční energii. Procento z této částky tedy odpovídá částce 14,6 mil. Kč. Pokud budou brány v úvahu extrémní v rámci výpočtu procentuálního rozdílu spotřebované energie (-4,28 % až 7,07 %), mohla by utržit SŽDC v roce 2019 o 62,5 mil. Kč méně, nebo až o 10 334,4 mil. Kč více, pokud by byl objem energie, kteří mají dopravci zaplatit, zjištěn tímto, nebo podobným výpočtem, respektive principem, na který by měly vozidlové odpory vliv.

Také lze uvažovat o využití výpočtu (správného) objemu spotřebované trakční energie i pro vozidla s EMS, a to pro případy, kdy by byl vlak zastaven na trati z důvodů způsobenými provozovatelem dráhy. Šlo by tedy ze strany dopravce o nežádoucí jev. U nákladních vlaků by nebylo zásadní způsobené zpoždění v rámci desítek minut, ale spotřebovaná energie navíc v důsledku opětovného rozjezdu a urychlování celého vlaku. V takovémto případě by mohla být ponížena hodnota z EMS o hodnoty vypočtené energie potřebné k opětovnému rozjezdu, respektive by šla k tíži provozovatele dráhy.

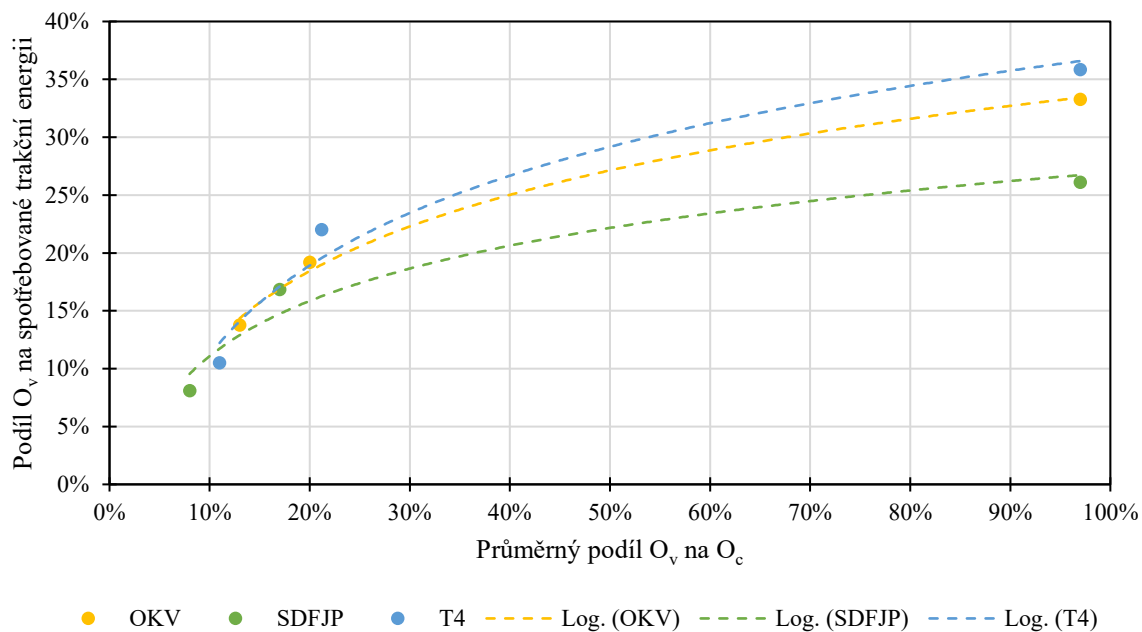
Obrázek 26 pak představuje podíl spotřebované energie na překonávání vozidlových odporů O_v , ve vztahu k průměrnému podílu O_v na celkových (jízdních) odporech O_c .

V souladu s tabulkami 14, 15 a přílohou B lze ještě sledovat vliv náhradního sklonu na podíl vozidlových odporů na celkových odporech. Podíl vozidlových odporů je významný při menších hodnotách S_n a vyšší rychlosti. V těchto případech bude znatelnější rozdíl při použití odlišných způsobů určení vozidlových odporů. Tuto skutečnost pak reflektuje v rámci modelového příkladu obrázek 26. Přesto že jde o data pouze ze tří pozorování, má obrázek 27 jistou vypovídající hodnotu, na jejímž základě lze sledovat vliv vozidlových odporů, který koresponduje i s tabulkami 14 a 15 a potvrzuje, že s klesajícím S_n , roste podíl vozidlových odporů.

Jak bylo uvedeno již v kapitole 3.5, nelze bohužel kvantifikovat hodnoty S_n souhrnně pro železniční síť (nebo alespoň nejvytíženější tratě). Bylo by ale jistě přínosné, kdyby bylo možné sledovat, jak se s S_n mění podíl O_v a jaký má tedy na daných tratích vliv na jízdu vlaku a dopravní ukazatele. Je potřeba vzít v úvahu i fakt, že při jízdě po jedné trati oběma směry by vyšel S_n průměrně nulový. Dále by vstupovala do proměnných i rozdílná hmotnost nákladních vlaků (plných a prázdných), pokud by jezdily vytížené jen v jednom směru (např.: z místa těžby uhlí do tepelné elektrárny). Rovněž velikost sklonu trati by měla další vliv, a to v případě, kdy by byl sklon až tak velký, že by vlak v nezanedbatelné části trasy nebylo potřeba vůbec urychlovat, tudíž by jel bez spotřeby trakční energie výběhem, nebo by byl brzděn, zatímco při jízdě opačným směrem (do stoupání) by byla hmotnost tohoto vlaku sklonem omezována.

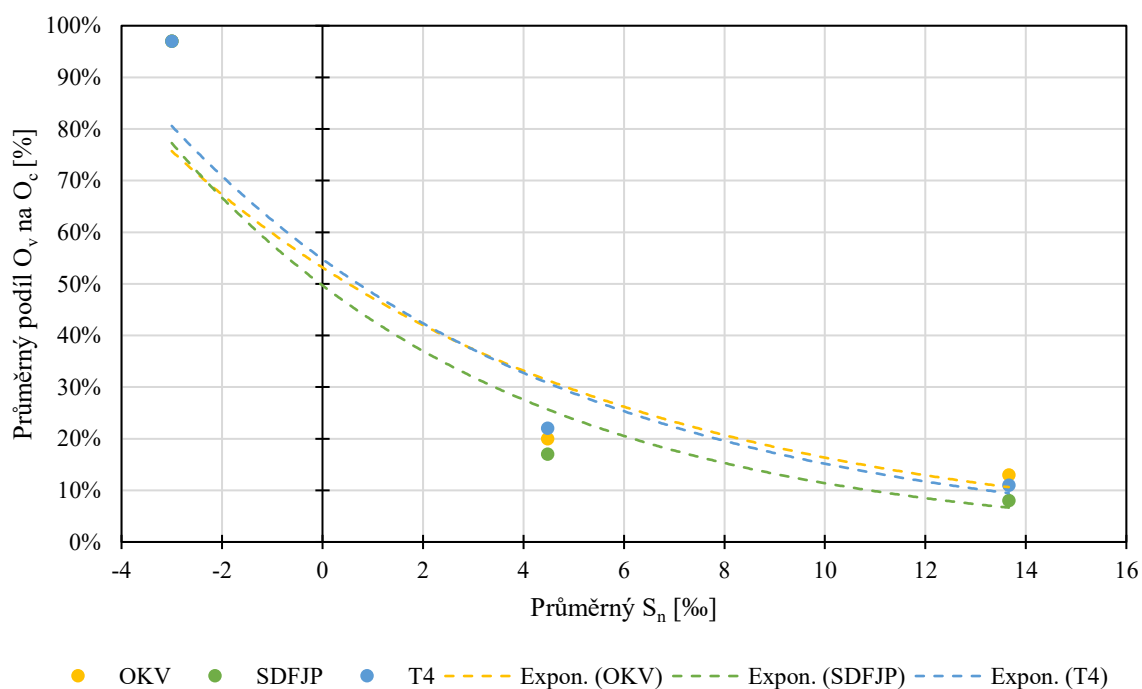
Vyhodnocením výsledků modelového příkladu je tedy zodpovězena otázka položená v úvodu této práce: jaký mají vliv vozidlové odpory na jízdní dobu a další provozní ukazatele. Je ale potřeba brát v úvahu, že by bylo vhodné provést více příkladů, nebo simulací na takových vzorcích traťových úseků, které by dostatečně reprezentovaly nejvytíženější části české železniční sítě.

Přesnější hodnoty vozidlových odporů rovněž mohou nalézt svůj přínos v optimalizaci řízení železniční dopravy, především u nákladních vlaků, kdy může být pomocí softwaru v reálném čase na základě aktuální provozní situace vypočtena optimální rychlost, při jejímž dodržení přijede nákladní vlak do stanice v okamžik, kdy to umožní provozní situace a nebude tedy muset zastavovat u vjezdového návěstidla z důvodu, že je určitá kolej, obsazena jiným vlakem. To povede nejen k optimalizaci rychlosti vlaku v daném úseku, ale také k úspoře energie, která může být ušetřena, pokud bude jízda tak plynulá, že nebude třeba zbytečně zrychlovat a brzdít a bude možné také využít jízdu výběhem.



Zdroj: autor

Obrázek 26 – podíl spotřebované energie na překonávání vozidlových odporů



Zdroj: autor

Obrázek 27 – vliv průměrného S_n na průměrný podíl O_v na O_c

7 NÁVRH ÚPRAVY PŘEDPISU V7

Na základě předchozích kapitol lze konstatovat, že vozidlové odpory mají nezanedbatelný vliv na jízdu vlaku a provozní ukazatele. Pouhou úpravou tohoto předpisu, tedy s minimálními náklady, lze navýšit maximální hmotnost vlaku, jak bylo uvedeno v kapitole 6.7.1, a podle kapitoly 6.7.3 přesněji stanovit spotřebovanou energii v případě, že vozidlo není vybaveno EMS. Také je potřeba vzít v úvahu „nehmotný vliv“ povědomí, že aktuální přístup není zcela přesný, i když nic zásadního nebrání tomu, aby mohl být přesnější. Tato kapitola navrhuje úpravy předpisu V7 k zajištění přesnějších výpočtů a odstranění určitých iracionálních výstupů.

První takovýto iracionálním přístupem je odlišnost výpočtu v rámci jednotlivých států EU, respektive provozovatelů dráhy na stejné úrovni interoperability. Zde se přímo nabízí vytvoření nadnárodní normy, nebo předpisu například v rámci směrnice TSI, která by sjednotila výpočty a zároveň zajistila přesnější výpočet vozidlových odporů pro stejné typy vlaků (např.: ucelené vlaky na přepravu uhlí, železné rudy, obilovin, nebo ucelené vlaky kontejnerové) či vozidel.

Rovněž lze vyčlenit z výpočtu vozidlových odporů aerodynamickou složku, která nezávisí na hmotnosti vozidel, podobně jako je tomu u vztahu (24), a případně i transformovat traťové odpory, které jsou ale prakticky ovlivněny i konstrukcí vozidla právě do vozidlových odporů, jako je například tunelový faktor (26), nebo zavést rozšířený vozidlový odpor, který například upravuje i odpor z jízdy obloukem [1].

Zároveň je také možné aktualizovat vztahy pro výpočet ve spolupráci Správy železnic se zainteresovanými dopravci, především nákladními. Ať již skrze Sdružení železničních nákladních dopravců ŽESNAD CZ, z.s., či samostatně provedením výběhových zkoušek ve vhodně vybraných úsecích sítě Správy železnic během dopravních sedel s vlaky běžné vozby, tedy bez nutnosti využívat ŽZO Velim, a tedy s minimálními náklady.

Záleží ale samozřejmě na vůli provozovatele dráhy a dopravců na národní úrovni. V případě nadnárodní úrovně na pracovní skupině EU zabývající se TSI, případně na organizaci UIC.

ZÁVĚR

Bakalářská práce je věnována vozidlovým odporům, které mají nezanedbatelný vliv v rámci pohybové rovnice, ze které následně vychází výpočty jízdnicích dob, maximální zátěže a spotřeby energie. Smyslem práce je vytvoření uceleného pohledu na vozidlové odpory, to, jak byly počítány v historii, tedy na počátku 20. století, i v minulosti ne tak dávno. Výpočty v prostředí české železnice a změny ve výpočtech vozidlových odporů jsou popsány v rámci kapitoly 3 a jejích podkapitol. Dále je zkoumán podíl vozidlových odporů, aby bylo zjištěno, jaký je jejich vliv a zda má smysl se jimi vůbec zabývat.

V kapitole 4 jsou popsány vlivy, které výpočet vozidlových odporů ovlivňují tak, že dochází k nepřesným výsledkům. Na tuto kapitolu navazuje kapitola popisující možné úpravy způsobu výpočtu, zejména jde o správné převedení odporů, které jsou kategorizovány jako traťové, na odpory vozidlové, a zpřesnění hodnot koeficientů vstupujících do výpočtu.

Pro ověření změn ve výsledcích řešení pohybové rovnice, které nastanou se změnou způsobu výpočtu vozidlových odporů, je předmětem šesté kapitoly modelový příklad a vyhodnocení výsledků jeho tří variant. Z nich vyplývá, že vozidlové odpory ovlivňují mimo jiné i vypočtenou hodnotu spotřebované trakční energie, která závisí na volbě vztahu pro výpočet vozidlového odporu. Ten ovlivňuje také maximální hmotnost dopravovaných vozidel. Pro konstrukci GVD není vliv volby vozidlového odporu zásadní vzhledem k tomu, že GVD je konstruován v hodnotách zaokrouhlovaných na celé půlminuty. Vzhledem k hodnotám jízdnicích dob ve služebních pomůckách lze ale říct, že tyto hodnoty jsou poměrně konzervativní a oproti výpočtům podstatně delší.

Z kapitoly 6 pak plynou možnosti úpravy předpisu V7, které jsou shrnuty a navrhnuty v rámci sedmé kapitoly. Jejím cílem a přínosem je zejména sjednocení způsobu výpočtu vozidlových odporů a správná kategorizace složek vozidlových odporů z hlediska fyzikálních veličin.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] MICHÁLEK, Tomáš a Jaromír ZELENKA. *Trakční mechanika*. Vydání první. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.
- [2] FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY. *ČSD V7. Trakční výpočty*. Praha: NADAS, 1982.
- [3] ŽIDLICKÝ, Josef. *Parní lokomotivy: určeno pro posluchače fakulty strojní a dopravní*. 2., upr. a rozš. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Učební texty vysokých škol.
- [4] FRANTIŠEK, Jansa. *Trakční mechanika a energetika kolejové dopravy: Celost. vysokošk. učebnice : Určeno pro vozební techniky a žel. inženýry a pro projektanty a konstruktéry kolejových vozidel všech druhů*. Vydání I. Praha: Dopravní nakladatelství, 1959.
- [5] VOLCIC, Mark. *Energy-efficient Optimization of Railway Operation*. Wien, 2014. Dostupné také z: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_237223.pdf. Diplomová práce. TU Wien.
- [6] JEVENKO, V., V. BĚLOV a A. BĚLJANKIN. *Theorie a výpočet parní lokomotivy*. Vydání I. Praha: Dopravní nakladatelství, 1954.
- [7] *Vyhláška č. 177/1995 Sb.: Vyhláška Ministerstva dopravy, kterou se vydává stavební a technický řád drah*. In: . Dostupné také z: http://www.dicr.cz/uploads/dok/177_1995.pdf
- [8] *ČSN 73 6360-1: Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 1: Projektování*. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [9] POHL, Jiří. Systémové souvislosti ETCS (4). *Železniční magazín: Měsíčník o moderní železnici*. Praha: Railway Builder, s. r. o., 2020, 27(9), 5. ISSN 1212-1851.
- [10] ŠIMRAL, Petr, Tomáš MICHÁLEK a Pavel KRÁLÍK. K problematice vozidlového odporu kontejnerových vlaků. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech 2013: XXI. konference s mezinárodní účastí, sborník příspěvků*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, s. 10. ISBN 978-80-7395-676-9.

- [11] MICHÁLEK, Tomáš a Petr ŠIMRAL. Návrh úpravy metodiky výpočtu vozidlového odporu kontejnerových vlaků. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech 2017: sborník příspěvků z XXIII. konference s mezinárodní účastí*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2017, s. 8. ISBN 978-80-7560-085-1.
- [12] UIC - INFRASTRUCTURE DEPARTMENT. *Train Track Interaction Sector - Aerodynamics*. Paris: International Union of Railways (UIC), 2018. ISBN 978-2-7461-2761-6.
- [13] ROCHARD, B a F SCHMID. A review of methods to measure and calculate train resistances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2005, 214(4), 185-199 [cit. 2021-03-09]. ISSN 0954-4097. Dostupné z: doi:10.1243/0954409001531306
- [14] ŘEZNÍČEK, Jindřich. *Trakční výpočty v podmínkách dlouhých tunelů*. Pardubice, 2020. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Tomáš Michálek.
- [15] PETR, Kadeřávek. Pokrok s infrastrukturními pokroky. *Železniční magazín: Měsíčník o moderní železnici*. Praha: Railway Builder, s. r. o., 2020, 27(10), 2.
- [16] Přehled technických normativů hmotnosti. *Portál provozování dráhy* [online]. [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/Portal/>
- [17] *Ročenka dopravy České republiky ...: Transport yearbook Czech Republic ..* Praha: Ministerstvo dopravy, 2020, . ISSN 1801-3090.
- [18] *Portál provozování dráhy* [online]. Správa železnic, státní organizace [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/Portal/>
- [19] *Nákresný přehled železničního svršku: Pro potřebu správce trati TDNU*. Správa železnic, státní organizace.
- [20] *Nářízení Komise (EU) č. 1302/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému kolejová vozidla – lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob železničního systému v Evropské unii. (TSI LOC&PAS)*. In: . Brusel: EK, 2014.
- [21] Vectron AC/DC/MS. *Siemens Mobility* [online]. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/locomotives/vectron/ac-dc-ms.html>

- [22] Katalog železničních nákladních vozů ČD Cargo, a.s. *ČD Cargo, a.s.* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.cdcargo.cz/katalog-nakladnich-vozu>
- [23] *Statistická ročenka 2019* [online]. Praha: Správa železnic, státní organizace, 2019 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/64057801/Statistická+ročenka+2019/2212bd66-c7e7-44d6-9a5b-f337df90f5eb>
- [24] HLAVA, Karel a Jaromír HRUBÝ. Elektrická trakční energie. In: *Vědeckotechnický sborník ČD č. 31/2011* [online]. s. 18 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195366/3110.pdf/8fedfdcd-ff89-43fa-b075-4d85fbbdab17>
- [25] SŽDC informovala dopravce o dodávkách trakční elektřiny v příštím roce. *Správa železnic* [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/promedia/tiskovy-servis-tiskove-zpravy-prohlaseni/setkani-k-elektrine>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – *Příloha k předpisu V7*

Příloha B – *Tabulky podílu vozidlových odporů na jízdních odporech*

Příloha A – Příloha k předpisu V7

ČESKOSLOVENSKÉ STÁTNÍ DRÁHY
 Ústřední ředitelství
 Odbor železničních kolejových vozidel a opravárenství
 Nábř.L.Svobody 12 - 110 15 Praha 1

Československé státní dráhy
 Oblastní ředitelství
 Přednosta služby 12

BRATISLAVA
 OLOMOUC
 PRAHA
 PLZEŇ

Váš dopis značky Naše značka Vyřizuje/linka V Praze dne
 6/91-331/Kv ing.Kvarda/3655 24.1.1992

VÚŽ v roce 1991 zjišťoval měrné jízdní odpory některých typů vozů a různě sestavených vlaků. Závěrem této práce bylo jednak sestavení příslušných grafických vyjádření vztahu jízdní odpor/rychlost, jednak sestavení nových matematických vztahů pro jejich zpracovávání na počítačích. V roce 1992 bude proto zpracována změna č. 1 předpisu ČSD V7 Trakční výpočty, zavádějící tyto nové matematické vztahy a příslušná grafická vyjádření měrných jízdních odporů. Dále bude nutno provést v roce 1992 nový výpočet hodnot pro "Tabulky hmotností tažených vozidel" do předpisu ČSD D 2/1 pro všechny řady hnacích vozidel a nové měrné jízdní odpory.

Aby bylo možno provádět veškeré trakční výpočty již nyní s novými hodnotami měrných jízdních odporů, uvádíme níže jejich přehled. Měrný jízdní odpor je uváděn hodnotou "N/t" pro rychlost V dosazenou v km/h.

Typ jízdního odporu	Matematické vyjádření	Poznámka
R	$w_R = 18,03 + 0,005 \cdot V + 0,00233 \cdot V^2$	1)
	$w_R = 27,00 + 0,0017 \cdot V^2$	2)
S	$w_S = 19,00 + 0,0035 \cdot V^2$	
T2	$w_{T2} = 16,76 + 0,003 \cdot V + 0,00288 \cdot V^2$	
T4	$w_{T4} = 13,00 + 0,0015 \cdot V^2$	
U2	$w_{U2} = 28,85 - 0,014 \cdot V + 0,00655 \cdot V^2$	
U4	$w_{U4} = 22,78 - 0,004 \cdot V + 0,00437 \cdot V^2$	

1) podvozky GP 200 (kotoučová brzda + centrální elektr. napájení)
 2) podvozky Görlitz

Měrné jízdní odpory typu M2 a M4 se nemění. Pro nový výpočet tabulek hmotností tažených vozidel do předpisu ČSD D2/1 bude v dohledné době (po dohodě se sl. 12 jednotlivých OR) svoláno pracovní soustředění inženýrů pro vlakovou dynamiku.

Ř e d i t e l
odboru železničních kolejových
vozidel a opravárenství:

uz. ing. Kunc

Zdroj: [2]

Příloha B – Tabulky podílu vozidlových odporů na jízdních odporech

Podíl vozidlových odporů R_G na jízdních odporech

$V \backslash S_n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	73	47	35	28	23	20	17	15	14	12	11	11	10	9	9
10	73	48	35	28	23	20	17	15	14	13	11	11	10	9	9
20	74	48	36	29	24	20	18	16	14	13	12	11	10	9	9
30	74	49	37	29	24	21	18	16	15	13	12	11	10	10	9
40	75	51	38	31	25	22	19	17	15	14	13	12	11	10	10
50	77	52	40	32	27	23	20	18	16	15	14	12	12	11	10
60	78	54	41	34	28	24	21	19	17	16	14	13	12	12	11
70	79	56	43	35	30	26	23	20	18	17	15	14	13	12	12
80	81	58	46	37	32	28	24	22	20	18	17	15	14	13	13
90	82	60	48	40	34	29	26	23	21	19	18	17	16	15	14
100	83	63	50	42	36	31	28	25	23	21	19	18	17	16	15
110	85	65	52	44	38	33	30	27	25	23	21	19	18	17	16
120	86	67	55	46	40	36	32	29	26	24	22	21	19	18	17
130	87	69	57	49	42	38	34	31	28	26	24	22	21	20	19
140	88	71	59	51	45	40	36	33	30	28	26	24	23	21	20
150	89	73	61	53	47	42	38	35	32	29	27	26	24	23	21
160	90	74	63	55	49	44	40	37	34	31	29	27	26	24	23

Zdroj: autor

Podíl vozidlových odporů S na jízdních odporech

$V \backslash S_n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	51	33	25	20	16	14	12	11	10	9	8	7	7	6	6
10	52	34	25	20	17	14	12	11	10	9	8	8	7	7	6
20	54	35	26	21	17	15	13	11	10	9	9	8	7	7	6
30	57	37	28	22	19	16	14	12	11	10	9	9	8	7	7
40	60	41	30	24	20	17	15	14	12	11	10	9	9	8	8
50	65	44	34	27	23	19	17	15	14	12	11	11	10	9	9
60	70	48	37	30	25	22	19	17	15	14	13	12	11	10	10
70	75	53	41	33	28	24	21	19	17	16	15	13	13	12	11
80	80	58	45	37	31	27	24	22	20	18	16	15	14	13	12
90	85	62	49	41	35	30	27	24	22	20	19	17	16	15	14
100	90	67	54	45	38	34	30	27	25	22	21	19	18	17	16

Zdroj: autor

Podíl vozidlových odporů T_2 na jízdnicích odporech

$V \backslash S_n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	63	36	25	19	16	13	11	10	9	8	7	7	6	6	5
10	63	36	25	20	16	13	12	10	9	8	8	7	6	6	6
20	64	37	26	20	17	14	12	11	10	9	8	7	7	6	6
30	66	39	28	22	18	15	13	11	10	9	8	8	7	7	6
40	68	42	30	23	19	16	14	13	11	10	9	9	8	7	7
50	71	45	33	26	21	18	16	14	12	11	10	9	9	8	8
60	73	48	35	28	23	20	17	15	14	13	12	11	10	9	9
70	76	51	38	31	26	22	19	17	15	14	13	12	11	10	10
80	78	54	41	34	28	24	21	19	17	16	14	13	12	12	11
90	80	57	45	37	31	27	24	21	19	18	16	15	14	13	12
100	82	60	48	40	34	29	26	23	21	19	18	17	16	15	14

Zdroj: autor

Podíl vozidlových odporů U_2 na jízdnicích odporech

$V \backslash S_n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	74	49	37	29	24	21	18	16	15	13	12	11	10	10	9
10	74	48	36	29	24	20	18	16	14	13	12	11	10	9	9
20	74	49	36	29	24	21	18	16	14	13	12	11	10	10	9
30	75	50	38	30	25	22	19	17	15	14	13	12	11	10	10
40	77	53	40	33	27	23	21	18	17	15	14	13	12	11	10
50	79	56	43	35	30	26	23	20	18	17	15	14	13	12	12
60	81	59	47	39	33	29	25	23	21	19	17	16	15	14	13
70	84	63	51	42	36	32	28	25	23	21	20	18	17	16	15
80	86	67	54	46	40	35	31	28	26	24	22	21	19	18	17
90	87	70	58	50	44	39	35	32	29	27	25	23	22	20	19
100	89	73	62	53	47	42	38	35	32	30	28	26	24	23	22

Zdroj: autor

Podíl vozidlových odporů U_4 na jízdních odporech

$V \backslash S_n$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	69	43	31	25	20	17	15	13	12	11	10	9	8	8	7
10	70	44	32	25	20	17	15	13	12	11	10	9	8	8	7
20	71	45	33	26	21	18	16	14	13	11	10	10	9	8	8
30	73	47	35	28	23	19	17	15	14	12	11	10	10	9	8
40	75	50	37	30	25	21	19	16	15	13	12	11	11	10	9
50	77	53	40	32	27	23	20	18	16	15	14	13	12	11	10
60	79	56	43	35	30	26	23	20	18	17	15	14	13	12	12
70	81	59	47	39	33	29	25	23	21	19	17	16	15	14	13
80	83	63	50	42	36	31	28	25	23	21	19	18	17	16	15
90	85	66	54	45	39	34	31	28	25	23	22	20	19	18	17
100	87	69	57	49	42	38	34	31	28	26	24	22	21	20	19

Zdroj: autor