

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Bakalářská práce

2024

Vojtěch Salaba

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Salaba**
Osobní číslo: **D21337**
Studijní program: **B0788A040001 Dopravní technika**
Specializace: **Stavba vozidel**
Téma práce: **Silové působení při přepravě dlouhých kolejnicových pásů**
Zadávající katedra: **Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů**

Zásady pro vypracování

Přeprava ohebných ložných jednotek je spojena se zvýšeným namáháním konstrukce vozu i tratě vlivem pružných deformací nákladu přepravovaného (z důvodu jeho značné délky) na více než jednom voze. Účelem bakalářské práce je na základě zjednodušených výpočtů provést základní analýzu silového působení těchto jednotek vlivem jejich pružné deformace při přepravě a výsledky konfrontovat s pokyny UIC pro nakládání ohebných ložných jednotek. Vypracujte:

1. Vlastnosti prostého ohybu přímého prizmatického nosníku – vnitřní statické účinky, napětí a deformace.
2. Základní parametry kolejnicových pásů a legislativní požadavky na jejich přepravu.
3. Rozbor sil působících na konstrukci vozu a na kolej v příčném i svislém směru při přepravě dlouhých kolejnicových pásů na více vozech.

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**
Rozsah grafických prací: **dle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] HÖSCHL, C.: Pružnost a pevnost ve strojnictví. Praha: SNTL, 1971.
[2] Loading Guidelines, Volume 1 – Principles, 7th edition International Union of Railways (UIC) – Paris, 2023. ISBN 978-2-7461-3251-1.
[3] Loading Guidelines, Volume 2 – Goods, 7th edition International Union of Railways (UIC) – Paris, 2023. ISBN 978-2-7461-3254-2.
[4] ČSN EN 13674 Železniční aplikace – Kolej – Kolejnice – Část 1: Vignolovy železniční kolejnice o hmotnosti 46 kg/m a větší. Česká agentura pro standardizaci, 2018.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Hába, Ph.D.**
Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **9. února 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2024**

L.S.

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

doc. Ing. Petr Tomek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Silové působení při přepravě dlouhých kolejnicových pasů jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

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

V Pardubicích dne 9. května 2024

Vojtěch Salaba v. r.

Na tomto místě bych rád poděkoval především svému vedoucímu, panu Ing. Aleši Hábovi, Ph.D., za jeho cenné rady, připomínky a náměty, které velkou měrou pomohly ke vzniku této bakalářské práce. Chtěl bych ale také vyjádřit velký vděk přítelkyni a členům své rodiny za to, že mě během dosavadního studia neustále podporovali, ačkoliv jsem jim nevěnoval zdaleka tolik času, kolik by si ho z mé strany zasloužili.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá teoretickým rozborem zatížení dopravních prostředků a infrastruktury při přepravě kolejnicových pásů na více nákladních železničních vozidlech. K výpočtu je použit zjednodušený výpočetní model, který se opírá o základní poznatky z mechaniky tuhých a poddajných těles. Analýza zatížení je provedena při uvažování průjezdu soupravy vozidel zlomem sklonu a směrovým obloukem. V závěru práce jsou získané výsledky vyhodnoceny a porovnány s nakládacími směrnicemi UIC.

KLÍČOVÁ SLOVA

analýza zatížení, deformace dlouhých kolejnic, ohyb přímého nosníku, přeprava kolejnic na více vozech

TITLE

Loading analysis of long rails transportation

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the theoretical loading analysis of vehicles and infrastructure during long rails transport on several wagons. The simplified calculation model is based on fundamental principles of rigid body mechanics and deformable body mechanics. Loading analysis is carried out considering the running of the vehicles in a track with slope change and a curve. At the end of this thesis the obtained results are evaluated and compared with the UIC Loading Guidelines.

KEYWORDS

Loading analysis, Deformation of long rails, Straight beam bending, Transport of rails on several wagons

Obsah

Seznam zkratek a symbolů	11
Úvod	13
1 Základní parametry kolejnic a způsob jejich přepravy.....	15
1.1 Fyzikální a materiálové charakteristiky kolejnic.....	15
1.1.1 Délka.....	15
1.1.2 Jednotková hmotnost a spojité zatížení od vlastní tíhy.....	15
1.1.3 Modul pružnosti v tahu	16
1.1.4 Kvadratický moment průřezu v ohybu	16
1.2 Technologie přepravy kolejnic na více vozech	17
1.2.1 Vozy a jejich zatížení	17
1.2.2 Způsob uložení kolejnic na více vozech	18
2 Výpočetní model	19
2.1 Popis uvažovaného výpočetního modelu	19
2.2 Rovnice statické rovnováhy pro kolejnici.....	20
2.3 Vnitřní účinky v ohýbané kolejnici.....	21
2.3.1 Vyšetřování vnitřních účinků	21
2.3.2 Obecné rovnice ve svislé rovině	22
2.3.3 Obecné rovnice v horizontální rovině	23
2.4 Deformace kolejnice pod zatížením.....	24
2.4.1 Matematický popis průhybové čáry	24
2.4.2 Deformační podmínky	25
2.5 Stanovení průhybu v místě působišť osamělých sil F_k	27
2.5.1 Průjezd zlomem sklonu.....	27
2.5.2 Průjezd směrovým obloukem.....	29

2.6	Rovnice statické rovnováhy pro vůz	30
3	Analýza silových účinků na vozy a pojížděnou kolej.....	33
3.1	Výsledky analýzy.....	33
3.1.1	Kolejnice o délce 25 m	33
3.1.2	Kolejnice o délce 30 m	35
3.1.3	Kolejnice o délce 50 m	36
3.1.4	Kolejnice o délce 75 m	39
3.2	Vyhodnocení výsledků.....	43
3.2.1	Průjezd zlomem sklonu	43
3.2.2	Průjezd směrovým obloukem	44
3.3	Návrh úprav pro splnění limitu nápravového zatížení.....	45
	Závěr	47
	Literatura.....	48
	Seznam příloh	50

Seznam zkratk a symbolů

ZKRATKA	VÝZNAM
TSI	Technické specifikace interoperability
UIC	Mezinárodní železniční unie

OZNAČENÍ	JEDNOTKA	POPIS
E	Pa	modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
F_{ky}	N	k -tá osamělá síla působící ve směru osy y
F_{kz}	N	k -tá osamělá síla působící ve směru osy z
g_{norm}	ms^{-2}	normální tíhové zrychlení, $g_{\text{norm}} = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$
J_o	m^4	kvadratický modul průřezu v ohybu k příslušné neutrální ose
l	m	délka kolejnicového pásu
l_{Rj}	m	rameno záporně vzaté reakce R_{jy} nebo R_{jz} k počátku vozového souřadného systému
l_{Fk}	m	rameno záporně vzaté síly F_{ky} nebo F_{kz} k počátku vozového souřadného systému
n_k	-	maximální počet přepravovaných kolejnic
m_0	kgm^{-1}	jednotková hmotnost kolejnice (tj. hmotnost na metr délky)
$m_{\text{nzA}}, m_{\text{nzB}}, \dots$	t	nápravové zatížení podvozku A, B, ...
M_{oy}	Nm	ohybový moment v ose y
M_{oz}	Nm	ohybový moment v ose z
q	Nm^{-1}	spojité zatížení od vlastní tíhy kolejnic
R_{Ay}, R_{By}, \dots	N	reakce v místě vazby spodku skříně vozu s pojezdem ve směru osy y
R_{Az}, R_{Bz}, \dots	N	reakce v místě vazby spodku skříně vozu s pojezdem ve směru osy z
R_{dvA}, R_{dvB}, \dots	N	příčná síla na dvojkolí v podvozku A, B, ...
R_{jy}	N	reakce j -té podpory ve směru osy y
R_{jz}	N	reakce j -té podpory ve směru osy z
T_y	N	smyková (posouvající) síla v ose y
T_z	N	smyková (posouvající) síla v ose z

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

w_y	m	průhyb na ose y v daném bodě
w_z	m	průhyb na ose z v daném bodě
x	m	bod s libovolnou souřadnicí na ose x (odlehlost)
x_{Rj}	m	vzdálenost j -té podpory v ose x od počátku kolejnicového souřadného systému
x_{Fk}	m	vzdálenost působíště síly k -té F_y nebo F_z od počátku kolejnicového souřadného systému
φ_y	rad	úhel natočení ohybové křivky v ose y
φ_z	rad	úhel natočení ohybové křivky v ose z

Úvod

Přepřavu některých pásů kolejnic není možné vzhledem k jejich přílišné délce realizovat s pomocí jediného železničního vozu. Řešením je naložit dlouhé kolejnice na více vozů současně, což však také znamená, že se během jízdy deformují. Deformace plastické jsou nežádoucí, musí jít výhradně o vratné (elastické) změny, k nimž dochází pokaždé, když souprava projíždí jinými než přímými úseky tratě bez změny podélného sklonu. Hlavním cílem této bakalářské práce je proto provést analýzu zatížení dopravních prostředků a trati při transportu dlouhých kolejnic na více železničních vozech za využití teoretického zjednodušeného postupu. Dalším cílem je získané výsledky porovnat s legislativními požadavky UIC na přepravu kolejnic. Text práce se rozděluje celkem do tří kapitol – první dvě jsou teoretické, třetí pak praktická, výpočtová.

1 Základní parametry kolejnic a způsob jejich přepravy

Vlastnosti kolejnic i technologie a nařízení závazné při jejich přepravě na více železničních vozech představují dvě oblasti, jež si v této kapitole detailněji rozebereme.

1.1 Fyzikální a materiálové charakteristiky kolejnic

Mezi základní veličiny, charakterizující daný typ přepravovaných kolejnic, patří:

- 1) délka (l)
- 2) spojitě zatížení od vlastní tíhy (q), plynoucí z jednotkové hmotnosti (m_0)
- 3) modul pružnosti v tahu (E),
- 4) kvadratický moment průřezu v ohybu k příslušné neutrální ose (J_0).

V následujících oddílech si k těmto veličinám uvedeme více informací, přičemž u spojitěho zatížení, jednotkové hmotnosti a kvadratického momentu plochy budou uvedeny konkrétní hodnoty pro dva typy kolejnic – 49E1 a 60E2.

1.1.1 Délka

Kolejnicové pásy se vyrábí ve více variantách délek dle požadavků zákazníka. Český výrobce kolejnic, Třinecké železářny, a.s., na svých stránkách [1] uvádí, že standardně je v jeho nabídce maximem sedmdesát pět metrů. Určíme si tedy pro analýzu celkem čtyři varianty délek kolejnic, jež nelze naložit na jeden konvenční železniční vůz – 25 m, 30 m, 50 m a 75 m.

1.1.2 Jednotková hmotnost a spojitě zatížení od vlastní tíhy

Protože hmotnost kolejnicového pásu je rovnoměrně rozložena po celé jeho délce, vlastní tíhu nahradíme ve výpočetním modelu spojitým zatížením obdélníkového tvaru. To se vypočte dle následujícího vzorce:

$$q = m_0 \cdot g_{\text{norm}} \quad (1.1)$$

Číselné hodnoty obou veličin, jak jednotkové hmotnosti, tak spojitěho zatížení, jsou pro vybrané druhy kolejnic uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 – Údaje o jednotkové hmotnosti a spojitém zatížení od vlastní tíhy

Veličina	Jednotka	Kolejnice 49E1	Kolejnice 60E2
m_0	kgm^{-1}	49,390	60,030
q	Nm^{-1}	484,350	588,693

Zdroj: [2]

1.1.3 Modul pružnosti v tahu

Za předpokladu, že se pohybujeme v oblasti elastických deformací (platí Hookův zákon), jednou z veličin udávajících odpor kolejnice proti ohýbání je modul pružnosti v tahu. U kolejnic existuje více typů ocelí, z nichž mohou být vyrobeny (viz norma [2]), což znamená, že i modul pružnosti v tahu se pro každou z nich může lišit. Pro účely výpočtů si určíme pevnou hodnotu modulu 205 000 MPa, v základních jednotkách $2,05 \cdot 10^{11}$ Pa.

1.1.4 Kvadratický moment průřezu v ohybu

Míru odporu kolejnice vůči deformaci při ohýbání udává kromě Youngova modulu i veličina zvaná kvadratický moment průřezu v ohybu. Ten je vždy definován k ose kolmé na působící zatížení. To znamená, že pro zatížení v rovině x - z užitíme moment k ose y (J_{oy}), analogicky v rovině x - y pak moment k ose z (J_{oz}). Pro námi zvolené druhy kolejnic jsou kvadratické momenty vypsány v tab. 2.

Tab. 2 – Velikost kvadratických momentů průřezu v ohybu

Veličina	Jednotka	Kolejnice 49E1	Kolejnice 60E2
J_{oy}	cm^4	1816,0	3021,5
J_{oz}	cm^4	319,1	510,5

Zdroj: [2]

Lze si povšimnout, že v hodnotách této veličiny jsou mezi oběma druhy značné rozdíly – zejména u momentu k ose y činí rozdíl přes 1200 cm^4 . Na první pohled vyplyne příčina této odlišnosti z porovnání průřezů obou kolejnic, které najdeme v příloze A. Z tvaru profilu kolejnic lze odvodit i příčinu dalšího rozdílu – kvadratický moment průřezu k ose z je v obou případech přibližně šestinásobně menší než ten k ose y . To je dáno odlišným rozložením elementů plochy od každé z os.

1.2 Technologie přepravy kolejnic na více vozech

V této podkapitole se zaměříme na nejdůležitější pravidla, která se vztahují s přepravou kolejnicových pásů na více vozech; detailnější rozbor a popis této problematiky již byl proveden v práci [3]. Veškeré informace jsou čerpány (až na označené výjimky) z nakládacích směrnic UIC, tj. ze zdrojů [4] a [5].

1.2.1 Vozy a jejich zatížení

Směrnice tento druh zboží považují za ohebnou ložnou jednotku. Určují použití nízkostěnných či plošinových vozů s nápravami v podvozku, klanicemi (či bočnicemi) a dřevěnou podlahou, druhu R nebo S. V České republice se k tomuto účelu využívají čtyřnápravové vozy řady RES (jeden z nich je zachycen na obr. 1) se sklopnými čelnicemi, bočnicemi i klanicemi. Maximální hmotnost na nápravu vozu RES z konstrukční skupiny 51 je dvacet tun, celková délka přes nárazníky 19,9 m a z toho ložná délka 18,528 m [6]. Maximální ložná hmotnost činí 56 t a za vlastní hmotnost vozu budeme ve výpočtech dosazovat dle zdroje [6] 24 t.



Obr. 1 – Vůz řady RES, konstrukční skupiny 69

Právě ložná hmotnost je omezena směrnicemi UIC u podvozkových vozů na 85 % z maximální hodnoty pro danou traťovou třídu či z hodnoty maximálního konstrukčního nápravového zatížení. Tabulku s údaji o maximální ložné hmotnosti nalezneme na rámu (podélníku) každého vozu – příklad takové tabulky je na obr. 2. Zároveň na žádném z podvozků nesmí být vlivem ložení překročeno maximální povolené nápravové zatížení, opět s ohledem na traťovou třídu či konstrukční omezení vozu. To je nutné přepočítat.



Obr. 2 – Tabulka s údaji o maximální ložné hmotnosti na voze řady RES, konstrukční skupiny 51

Taktéž se nesmí způsobem ložení překročit poměr hmotností na nápravu mezi podvozky, který činí tři ku jedné. Pakliže se souprava nepohybuje, při přepravě dlouhých kolejnic by tento stav neměl hrozit, avšak při průjezdu zlomem sklonu by se poměr mezi podvozky mohl změnit, což nám ukáže rozbor – viz kapitola 3.

1.2.2 Způsob uložení kolejnic na více vozech

Samotné ukládání kolejnicových pásů na vozy probíhá vedle sebe do jednotlivých vrstev, mezi nimiž jsou proložky. První vrstva se nenachází přímo na podlaze vozu, nýbrž na dřevěných podložkách o počtu minimálně dvě na vůz. Tento počet se zvyšuje úměrně délce – jde o to, aby nedocházelo k přílišnému průhybu kolejnic a nebezpečnému kmitání. Maximálně mohou být takto vrstvy tři, v případě kolejnic na dvou vozech dokonce čtyři. Pakliže není poslední vrstva zcela zaplněna, je nutné kolejnice upevnit příslušnými prostředky (lana, rozpěry aj.). Podložky i proložky se v horizontálním směru rozepřou ocelovými rozpěrami, aby byla dodržena potřebná vzdálenost od klanic. Proložky se pak v podélném směru vkládají obvykle nad podložky. Zároveň je nutné při ukládání kolejnic na vozy dodržet potřebné vzdálenosti od čel vozů – tyto závisejí na jejich délce. Konkrétní hodnoty nalezneme přímo ve směrnících UIC.

Potřebný počet vozů i přesné rozložení (rozmístění) podložek tak, aby byly splněny všechny závazné nakládací podmínky, převezme z práce [3], v níž se tato problematika podrobněji rozebírala. Pro účely výpočtů budeme předpokládat, že veškeré síly mezi vozem a kolejnicemi se přenáší pouze v oblasti podložek. Zároveň bude uvažováno, že mezi kolejnicemi a podložkami se tyto síly přenesou v obou směrech, tj. jak vzhůru, tak ale i dolů.

2 Výpočetní model

S využitím teorie ohybu přímého prizmatického nosníku si v následujících podkapitolách sestavíme zjednodušený výpočetní model a jeho prostřednictvím vyřešíme deformace kolejnic při přepravě na více vozech.

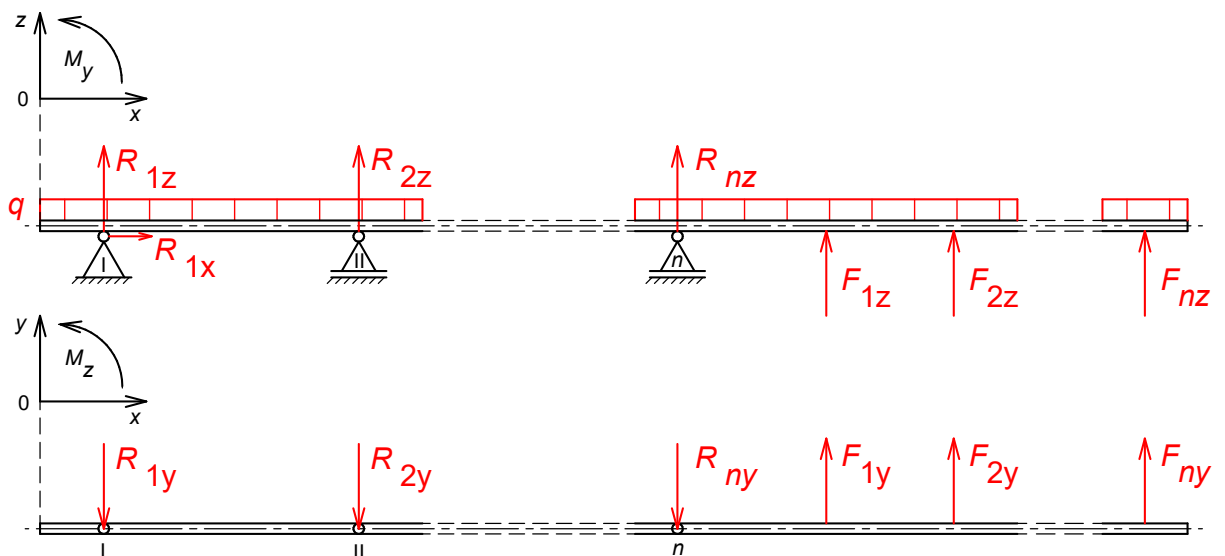
2.1 Popis uvažovaného výpočetního modelu

Výpočetní model, který zohledňuje zatížení nákladního vozu a pojezděné koleje jak v důsledku vlastní tíhy kolejnicových pásů, tak v důsledku jejich ohybu, respektuje následující dva možné případy, jež mohou v reálném provozu nastat:

- průjezd zlomem podélného sklonu, tedy ohyb kolejnic v rovině x - z ,
- průjezd směrovým obloukem, tedy ohyb kolejnic v rovině x - y .

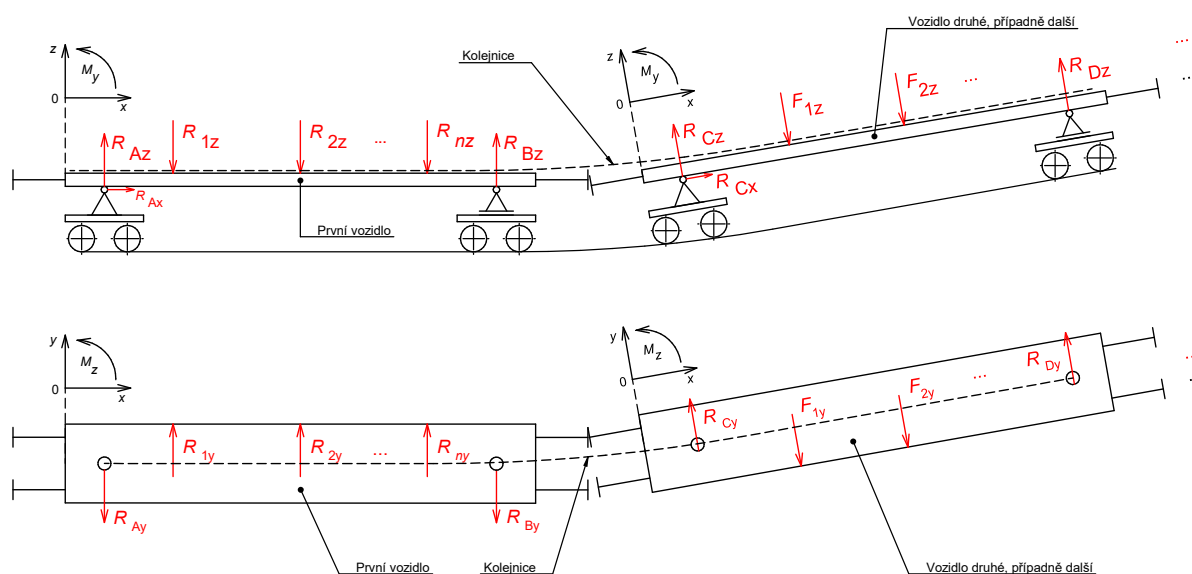
Principiálně se tyto případy od sebe neliší, jediným rozdílem jsou odlišné okrajové podmínky a charakteristiky kolejnic z hlediska pružnosti a pevnosti.

Základem modelu na obr. 3 je tedy nosník v podobě kolejnice, jenž se deformuje podle postavení jednotlivých vozů v koleji. Pro výpočet silových účinků je myšlený nosník rozdělen na dvě části. První z nich (obr. 3 vpravo) virtuálně způsobuje ohyb, což znamená, že podložkám na těchto vozech jsou přiřazena příslušné průhyby způsobené vnějšími silami F_k . Část druhá (obr. 3 vlevo), spočívající na zbylých vozech, nevykazuje žádné průhyby v místě podložek – v nich působí pouze neznámé reakce R_j .



Obr. 3 – Schématické znázornění kolejnice jako nosníku na několika podporách

Dílčí úkol spočívá ve stanovení velikosti veškerých sil působících na kolejnicový pás. Jelikož se ale jedná o staticky neurčitou úlohu, musíme zavést deformační podmínky s využitím diferenciální rovnice průhybové čáry. Hlavní úkol pak představuje určení zatížení dopravních prostředků a infrastruktury. Budeme uvažovat, že spodek vozové skříně (rám) zatěžují síly stejné velikosti, jen opačného smyslu než kolejnice, jak je znázorněno na obr. 4. Cílem je určit buď nápravové zatížení, anebo příčnou sílu působící na dvojkolí při průjezdu obloukem.



Obr. 4 – Schematicky zakreslené nákladní vozy a jejich zatížení od ohybu kolejnicových pásů

2.2 Rovnice statické rovnováhy pro kolejnici

Prvotní podmínky pro stanovení sil působících na kolejnicový pás nám poskytnou rovnice statické rovnováhy. Pro těleso v prostoru bychom jich měli napsat celkem šest – my ale předpokládejme, že síly F i reakce R působí v neutrálních osách průřezu kolejnic (zakresleny v příloze A), a tudíž reakční podporové momenty k ose x (M_x) se rovnají nule. Zbývá tedy vypsát těchto pět rovnic:

$$\sum_{(i)} F_{ix} = 0; R_{1x} = 0, \quad (2.1)$$

kde $\sum_{(i)} F_{ix}$ (N) součet veškerých sil v ose x ,
 R_{1x} (N) reakce podpory I ve směru osy x ;

$$\sum_{(i)} F_{iz} = 0; \sum_{(j)} R_{jz} + \sum_{(k)} F_{kz} - q \cdot x = 0, \quad (2.2)$$

kde $\sum_{(i)} F_{iz}$ (N) součet veškerých sil v ose z;

$$\sum_{(i)} F_{iy} = 0; \sum_{(j)} R_{jy} - \sum_{(k)} F_{ky} = 0, \quad (2.3)$$

kde $\sum_{(i)} F_{iy}$ (N) součet veškerých sil v ose y;

$$\sum_{(i)} M_{iy} = 0; \sum_{(j)} R_{jz} \cdot x_{Rj} + \sum_{(k)} F_{kz} \cdot x_{Fk} - \frac{1}{2} \cdot q \cdot l^2 = 0, \quad (2.4)$$

kde $\sum_{(i)} M_{iy}$ (Nm) součet momentů sil k ose y;

$$\sum_{(i)} M_{iz} = 0; \sum_{(j)} R_{jy} \cdot x_{Rj} - \sum_{(k)} F_{ky} \cdot x_{Fk} = 0, \quad (2.5)$$

kde $\sum_{(i)} M_{iz}$ (Nm) součet momentů sil k ose z.

Ze vztahu (2.1) vyplývá, že zanedbáváme podélné síly působící na kolejnice. Protože se jedná o přibližný a teoretický výpočet, můžeme si toto zjednodušení dovolit, avšak v praxi nemusí být tento předpoklad splněn. Taktéž jsme si dovolili opomenout změny směrových vektorů jednotlivých sil při deformaci.

2.3 Vnitřní účinky v ohýbané kolejnici

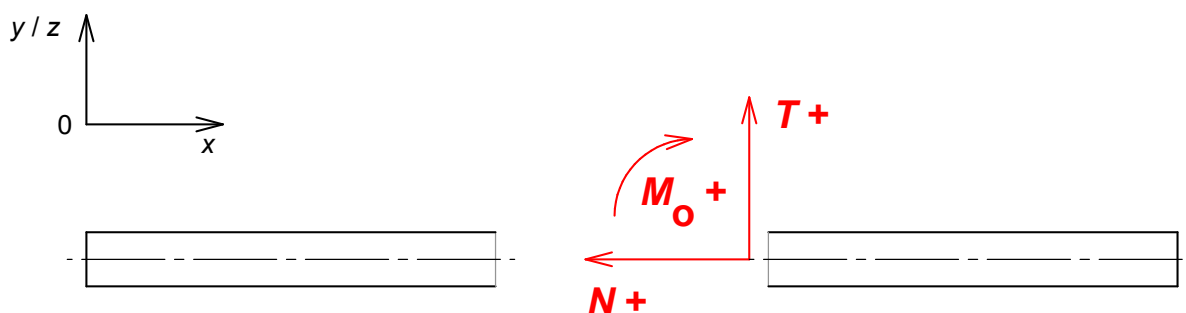
Ještě před určením dalších podmínek potřebných k řešení naší úlohy je zapotřebí zjistit (vyšetřit) průběhy vnitřních účinků po celé délce kolejnice.

2.3.1 Vyšetřování vnitřních účinků

K vyšetřování vnitřních účinků slouží metoda myšleného řezu. Její hlavní myšlenka spočívá v rozdělení uvolněného nosníku na dvě fiktivní, oddělené části. Pro to, aby zůstaly ve statické rovnováze, musíme vzít v úvahu i síly a momenty (obecně vnitřní účinky), jimiž se obě části vzájemně ovlivňují [8]. K těmto účinkům se řadí:

- normálová (osová) síla – N ,
- smyková (posouvající) síla – T ,
- ohybový moment – M_o .

Normálová síla se v tomto případě nevyskytuje, a tak jsou v následujících dvou oddílech vypsány obecné rovnice pouze pro smykovou sílu a ohybový moment. Rovnice vychází z obr. 3 s tím, že velikost rozměrových konstant x_{Rj} a x_{Fk} obsahuje příloha B. K vyšetření vnitřních účinků využijeme řešení zleva, tj. budeme se zabývat vlivem sil z levé oddělené části na pravou. Pro odečítání kladných smyslů slouží zavedený souřadný systém, který je na obr. 5 nakreslen červenou barvou.



Obr. 5 – Souřadný systém pro vyšetření vnitřních účinků zleva

2.3.2 Obecné rovnice ve svislé rovině

Začneme v krajním levém poli, kde se vyskytuje pouze spojitě rozložené zatížení od vlastní tíhy. To vždy nahrazujeme ekvivalentní osamělou silou a podle obr. 5 platí:

$$T_z(x \in \langle 0; x_{R1} \rangle) = -q \cdot x, \quad (2.6)$$

$$M_{oz}(x \in \langle 0; x_{R1} \rangle) = -\frac{1}{2} \cdot q \cdot x^2. \quad (2.7)$$

Pokračujeme dalšími poli, tj. těmi, jejichž levou hranici tvoří j -tá podpora. Pro smykovou sílu a ohybový moment píšeme následující vzorce:

$$T_z(x \in \langle x_{Rj}; x_{R(j+1)} \rangle) = -q \cdot x + \sum_{i=1}^{i=j} R_{iz}, \quad (2.8)$$

$$M_{oz} (x \in \langle x_{Rj}; x_{R(j+1)} \rangle) = -\frac{1}{2} \cdot q \cdot x^2 + \sum_{i=1}^{i=j} R_{iz} \cdot (x - x_{Ri}). \quad (2.9)$$

V posledním kroku nám zbývají pole, jež jsou zleva ohraničena působíštěm k -té osamělé síly F . Sestavíme pro ně tyto rovnice:

$$T_z (x \in \langle x_{Fk}; x_{F(k+1)} \rangle) = -q \cdot x + \sum_{(j)} R_{jz} + \sum_{i=1}^{i=k} F_{iz}, \quad (2.10)$$

$$M_{oz} (x \in \langle x_{Fk}; x_{F(k+1)} \rangle) = -\frac{1}{2} \cdot q \cdot x^2 + \sum_{(j)} R_{jz} \cdot (x - x_{Rj}) + \sum_{i=1}^{i=k} F_{iz} \cdot (x - x_{Fi}). \quad (2.11)$$

2.3.3 Obecné rovnice v horizontální rovině

V rovině horizontální se vztahy zjednoduší, poněvadž v intervalu prvním zleva není přítomna žádná síla, ani ohybový moment z důvodu absence spojitého zatížení. Ostatní intervaly rozdělíme pouze do dvou kategorií – do první z nich patří opět ty s levou hranicí tvořenou j -tou podporou. Výrazy pro vnitřní účinky mají tvar:

$$T_y (x \in \langle x_{Rj}; x_{R(j+1)} \rangle) = -\sum_{i=1}^{i=j} R_{iy}, \quad (2.12)$$

$$M_{oy} (x \in \langle x_{Rj}; x_{R(j+1)} \rangle) = -\sum_{i=1}^{i=j} R_{iy} \cdot (x - x_{Ri}). \quad (2.13)$$

Do skupiny druhé spadají, obdobně jako v rovině svislé, intervaly ohraničené zleva působíštěm k -té osamělé síly F . Rovnice pro posouvající sílu a ohybový moment mají tuto podobu:

$$T_y (x \in \langle x_{Fk}; x_{F(k+1)} \rangle) = -\sum_{(j)} R_{jy} + \sum_{i=1}^{i=k} F_{iy}, \quad (2.14)$$

$$M_{oy} (x \in \langle x_{Fk}; x_{F(k+1)} \rangle) = -\sum_{(j)} R_{jy} \cdot (x - x_{Rj}) + \sum_{i=1}^{i=k} F_{iy} \cdot (x - x_{Fi}). \quad (2.15)$$

2.4 Deformace kolejnice pod zatížením

Nosník v podobě kolejnice na železničním voze není dokonale tuhý, při zatížení se pružně deformuje, prohýbá se a mění svůj tvar. Tuto problematiku si v následujícím textu blíže rozebereme.

2.4.1 Matematický popis průhybové čáry

Následkem působení vnějších sil na nosník (na kolejnici) se původní přímka spojující těžiště všech průřezů¹ přemění v průhybovou čáru. Její křivost je dána takto [7]:

$$\frac{1}{r} = \frac{\frac{d^2w}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (2.16)$$

kde r (m) poloměr křivosti průhybové čáry;
 w (m) průhyb.

Pokud zavedeme předpoklad malých deformací, pak se výraz ve jmenovateli přibližně rovná jedné a celá rovnice se zjednoduší na tvar:

$$\frac{1}{r} \cong \frac{d^2w}{dx^2}. \quad (2.17)$$

Zároveň pro křivost existuje i tato rovnost [8]:

$$\frac{1}{r} = (-) \frac{1}{E \cdot J_0} \cdot M_0(x). \quad (2.18)$$

kde $M_0(x)$ Nm ohybový moment jako funkce souřadnice x .

Znaménko mínus ve výraze (2.18) se zapisuje tehdy, pakliže za kladné považujeme posunutí bodu na střednici směrem do záporných hodnot příslušné souřadnice [8]. My se uchýlíme k opačnému postupu a znaménko nebudeme zapisovat.

Pokud za křivost dosadíme druhou derivaci průhybu a provedeme integraci, dostaneme (znovu za předpokladu malých deformací) úhel tečny k průhybové čáře (natočení) v obecném bodě x z daného intervalu:

¹ Ve starší literatuře se obvykle označuje jako střednice.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dw}{dx} \cong \varphi(x) \cong \frac{1}{E \cdot J_0} \cdot \int M_0(x) dx + k, \quad (2.19)$$

kde φ rad úhel natočení průhybové čáry;
 k rad první integrační konstanta.

Přibližnou funkci průhybu pak získáme opětovným integrováním rovnice (2.19).
 Obecně zapsaný vztah pro průhyb v libovolném bodě x tedy vypadá následovně:

$$w(x) \cong \frac{1}{E \cdot J_0} \cdot \int \left(\int M_0(x) dx + k \right) dx + c, \quad (2.20)$$

kde c m druhá integrační konstanta.

Za ohybový moment je nutné dosadit pouze vztah z příslušného intervalu, v němž hledáme rovnici pro průhyb. Celkem tedy dostaneme tolik funkcí pro průhybové čáry, na kolik intervalů je nosník rozdělen z hlediska průběhu vnitřních účinků.

Bylo uvedeno, že vztahy (2.17), (2.19) a (2.20) platí v případě malých deformací. Tuto podmínku se nám ne vždy podaří splnit, nicméně z celkového pohledu se jedná pouze o přibližný výpočet, a tak tyto vztahy přesto použijeme.

2.4.2 Deformační podmínky

Vztahy popsané v oddíle 2.4.1 použijeme k vypočtení neznámých sil působících na kolejnicový pás. Pro každý interval, v závislosti na jeho poloze, dosadíme za jednotlivé průhyby a natočení některé z těchto deformačních podmínek:

- nulový průhyb nad podporami (tj. v místě reakcí R),
- definovaný průhyb v místě působitě osamělých sil F_k , vypočítaný na základě geometrie pojižděné tratě (viz následující podkapitola 2.5)
- spojitost průhybových čar (shodné natočení) v krajních stykových bodech dvou sousedních polí.

Zapíšeme tato kritéria pomocí rovnic:

$$w_{yp} \text{ nebo } w_{zp}(x_{Rj}) = 0, \quad (2.21)$$

$$w_{yp} \text{ nebo } w_{zp} (x_{Fk}) \neq 0, \quad (2.22)$$

$$\varphi_{yp} \text{ nebo } \varphi_{zp} (x_{Rj}) = \varphi_{y(p+1)} \text{ nebo } \varphi_{z(p+1)} (x_{Rj}), \quad (2.23)$$

$$\varphi_{yp} \text{ nebo } \varphi_{zp} (x_{Fk}) = \varphi_{y(p+1)} \text{ nebo } \varphi_{z(p+1)} (x_{Fk}), \quad (2.24)$$

kde p - index nosníkového pole, vyjadřující jeho pořadí od počátku souřadného systému.

Tímto postupem získáme již dostatečně rovnic pro to, aby mohly být určeny veškeré neznámé veličiny – jak síly působící na kolejnice, tak integrační konstanty (ty však nejsou hledány). Jejich celkový počet (n_{rov}) činí:

$$n_{rov} = (n_R + n_F) \cdot 3 + 2, \quad (2.25)$$

kde n_R - počet vazeb (podpor) nosníku;
 n_F - počet osamělých sil působících na nosník (buď v ose y , anebo v ose z).

Koeficienty u neznámých sil ve všech rovnicích sepíšeme do čtvercové matice, tzv. matice soustavy (A), pokračujeme sestavením vektoru neznámých sil (B) a též vektoru pravých stran (C), který zahrnuje zbylé konstanty. Pro tyto matice platí následující vztah:

$$A \cdot B = C. \quad (2.26)$$

Výsledkem násobení obou stran inverzní maticí A^{-1} je hledaný vektor neznámých sil:

$$B = A^{-1} \cdot C. \quad (2.27)$$

neboť součin $A \cdot A^{-1}$ se rovná jedné. Autor provedl číselné řešení maticových rovnic v tabulkovém procesoru MS Excel a jejich verifikace proběhla na základě výsledků práce [3] se zadanými nulovými deformacemi. Jeda z matic je vložena jako příklad v příloze C.

Poslední operace k dosažení plnohodnotných výsledků spočívá ve vynásobení vektoru neznámých maximálním počtem kolejnicových pásů n_k , jež je možné na vozy naložit. Ten se vypočte podle následujícího vzorce, přičemž výsledek se zaokrouhlí na nejbližší nižší celé číslo:

$$n_k = \frac{m_{\text{lož}} \cdot 0,85}{m_0 \cdot l_{\text{úlož}}} \quad (2.28)$$

kde	$m_{\text{lož}}$	kg	ložná hmotnost vozu pro danou traťovou třídu;
	$l_{\text{úlož}}$	m	úložná délka kolejnic, tzn. jaká délka kolejnic připadá na daný vůz – maximálně to může celá jeho délka, pakliže se bude jednat o vůz uprostřed soupravy.

2.5 Stanovení průhybu v místě působišť osamělých sil F_k

Jak již bylo zmíněno v úvodu druhé kapitoly, uvažujeme ohyb kolejnicového pásu ve dvou rovinách podle dvou provozních situací, jež mohou nastat. Abychom mohli určit konkrétní průhyby a z nich vypočítat neznáme síly, musíme se zaměřit na profil pojížděné trati.

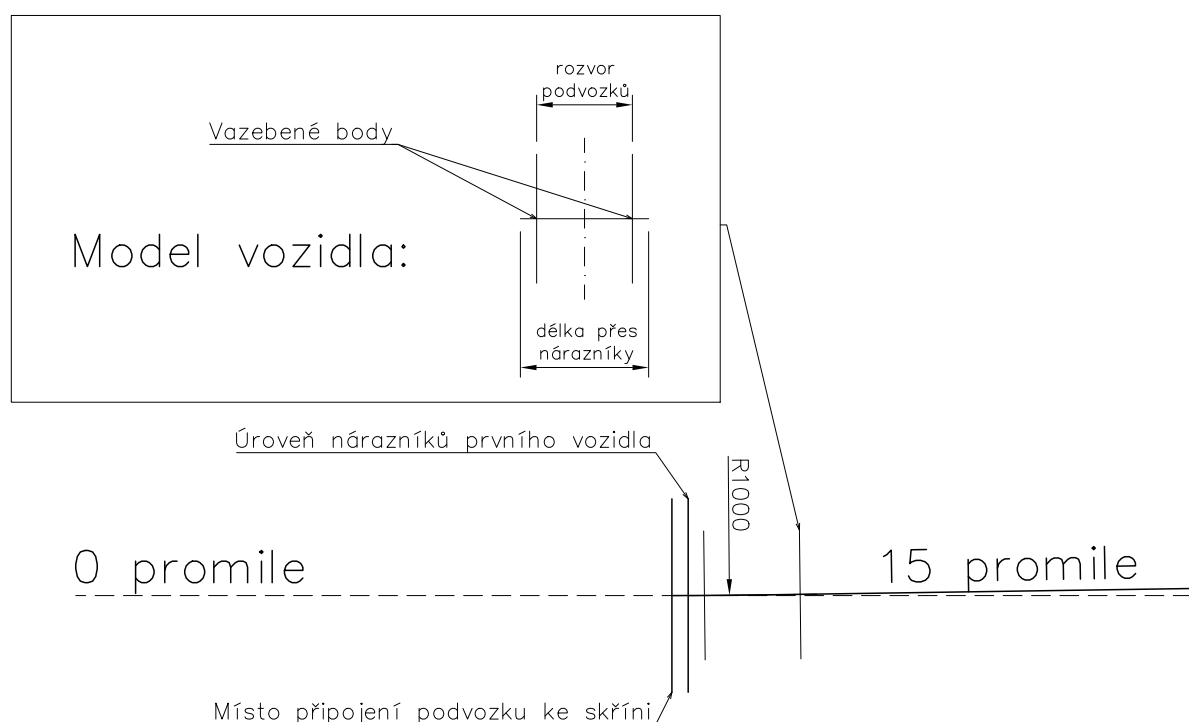
2.5.1 Průjezd zlomem sklonu

V případě změny podélného sklonu koleje nastává ohyb kolejnic ve svislém směru (rovina x - z). Zlom sklonu nemůže být náhlý, vždy by se mezi dvěma úseky s odlišným podélným sklonem měla nacházet přechodová část v podobě zaoblení se zadaným poloměrem. Z hlediska norem není předepsána maximální hodnota změny sklonu ($z - n_a$), avšak je určen právě minimální poloměr zaoblení lomu sklonu.

Dle platné české normy pro návrh konstrukčních a geometrických parametrů koleje [9] toto zaoblení nemá mít menší poloměr než 2000 m a nesmí překročit limitní hodnotu 1000 m. To v případě maximální dovolené rychlosti menší než 80 kmh⁻¹. Ačkoliv TSI pro infrastrukturu [10] připouští i menší poloměr, my se budeme řídit nařízením české normy a poloměr zaoblení lomu sklonu tedy zvolíme 1000 m. V analýze se pak budeme zabývat přechodem sklonu z nula promile na plus nebo minus deset či patnáct promile. Výsledky pak platí pro každou kladnou nebo zápornou změnu sklonu o deset či

patnáct promile. Na sklonu se nejprve bude nacházet pouze jeden vůz, až dojdeme do situace, kdy na sklonu budou všechny vozy kromě jednoho.

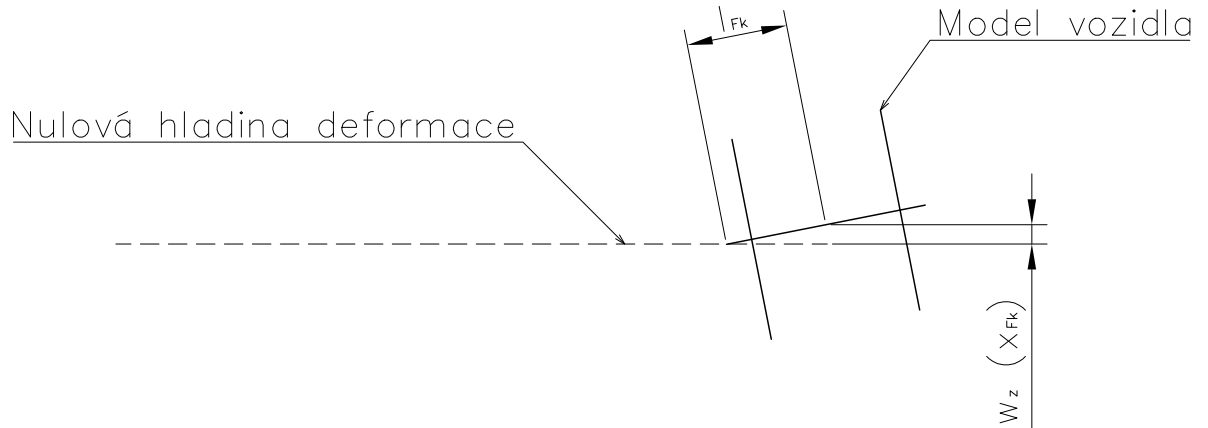
Pro určení deformací si sestavíme zjednodušený model vozu, skládající se výhradně z přímek. Zvolíme si, že zaoblení lomu sklonu začíná přesně pod místem připojení podvozku ke skříni toho vozu, který je situován nejbližší zlomu sklonu. V některém ze softwarů pro tvorbu výkresové dokumentace zavazbíme model ve dvou bodech ke křivce reprezentující profil pojížděné koleje. Zároveň přichytíme koncový bod modelu na hranici, na níž končí předchozí model vozu. Tím jsme zajistili to, že oba vozy se v reálné situaci dotýkají svými nárazníky. Případné další modely již vazbíme stejným postupem. Pro názornost je celá situace přehledně ukázána na obr. 6.



Obr. 6 – Zjednodušený model pro odečet deformací kolejnic při průjezdu soupravy lomem sklonu

Hodnotu deformace pak odečítáme podle detailu na obr. 7. Od počátku souřadného systému vozu naneseeme příslušnou kótu l_{FK} (dle přílohy B) a z tohoto bodu dále kolmici na přímku, jež reprezentuje nulovou deformační hladinu. Délka této kolmice je hledanou deformací kolejnice w_z (x_{FK}). Obecně můžeme říci, že na nulové deformační hladině jsou vozy, které se nachází stále ještě před zlomem sklonu. Pro zlom do záporných (nižších)

hodnot sklonu lze použít záporně vzaté deformace pro zlom do kladných (větších) hodnot sklonu, neboť celá situace je zrcadlově převrácena okolo nulové hladiny deformace.



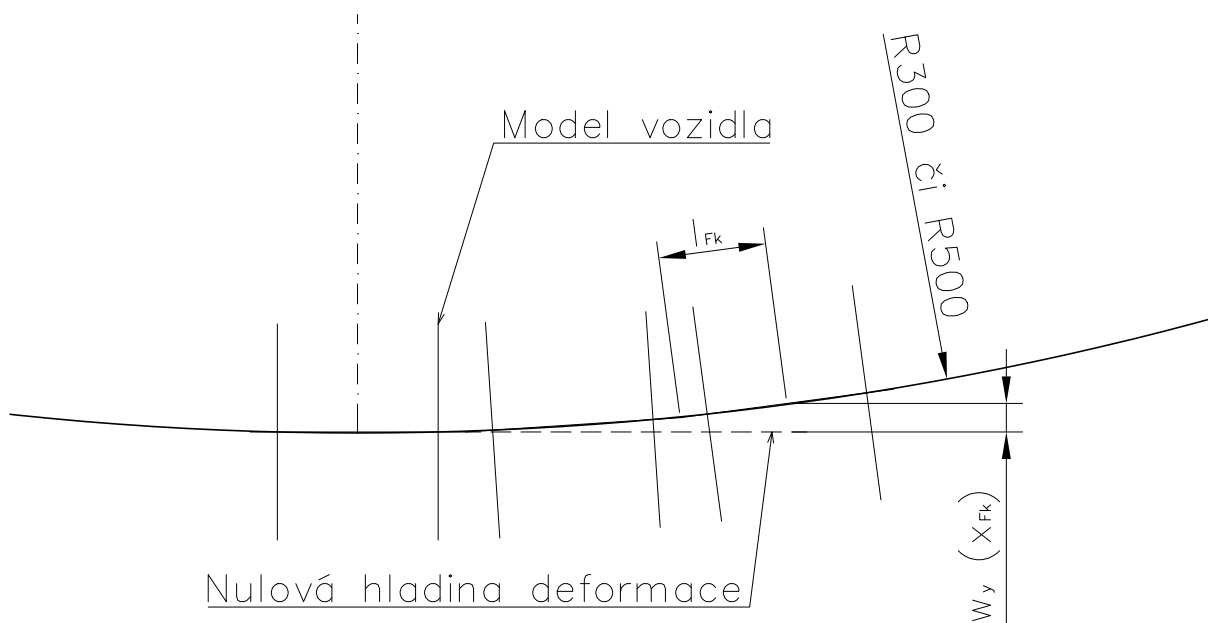
Obr. 7 – Upravený detail obr. 6 se zakóvanou deformací v ose z

2.5.2 Průjezd směrovým obloukem

Obdobně jako na zlomu sklonu, tak i v oblouku musí kolejnice naložené na více vozech změnit svůj tvar. Jediný rozdíl spočívá v tom, že v oblouku dochází k ohybu ve směru horizontálním (rovina $x-y$). Co se týče poloměru směrového oblouku, budeme se opět řídit českou normou pro návrh konstrukčních a geometrických parametrů koleje [9].

Dle této normy má minimální poloměr oblouku činit 300 m, v krajním případě 190 m. Pro nově vystavěné těleso dráhy je minimální hodnota omezena dokonce na 500 m. Jelikož v tomto případě jsou deformace již v řádu jednotek metrů (už se tedy nejedná o malé deformace, dle nichž platí vztahy z podkapitoly 2.4), zvolíme následující řešení. V případě kolejnice do 50 m včetně budou vozy postaveny v oblouku s poloměrem 300 m, zatímco pro délku 75 m v oblouku o poloměru 500 m.

Princip zjišťování deformací je shodný jako v případě zlomu sklonu. Situace se liší pouze tvarem křivky, k níž se modely vážou, jak můžeme vidět na obr. 8. V tomto případě však univerzálně platí, že na nulové hladině deformace je pouze první ze skupiny vozů. Podložkám na zbylých vozech jsou přiřazeny průhyby $w_y(x_{Fk})$. Číselně jsou hodnoty všech průhybů w_z a w_y v místě působíšť osamělých sil uvedeny v příloze C.



Obr. 8 – Zjednodušený model pro odečet deformací kolejnic při průjezdu soupravy obloukem

2.6 Rovnice statické rovnováhy pro vůz

O rovnicích rovnováhy jsme se již jednou zmínili v podkapitole 2.2, proto je zde jen aplikujeme pro vůz, na jehož podlahu či bočnice působí opačné síly z podložek než na kolejnice, jak je znázorněno na obr. 4. Zajímají nás reakce (značeny R_A , R_B , ...) ve dvou místech, kde je rám spodku připojen k pojezdu (podvozku), a následně síly na jednotlivá dvojkolí. To znamená, že hledáme dvě neznámé, k čemuž jsou zapotřebí dvě rovnice rovnováhy. Lze napsat dvě momentové, my však zvolíme jednu silovou a jednu momentovou:

$$\sum_{(i)} F_{iz} = 0; \quad \sum_{(i)} M_{iy} = 0 \text{ v rovině } x-z, \quad (2.29)$$

$$\sum_{(i)} F_{iy} = 0; \quad \sum_{(i)} M_{iz} = 0 \text{ v rovině } x-y, \quad (2.30)$$

- kde $\sum_{(i)} F_{iz}$ (N) součet veškerých sil v ose z;
 $\sum_{(i)} M_{iy}$ (Nm) součet momentů sil k ose y;
 $\sum_{(i)} F_{iy}$ (N) součet veškerých sil v ose y;
 $\sum_{(i)} M_{iz}$ (Nm) součet momentů sil k ose z.

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Podélné síly opět nebereme v úvahu, a proto reakce ve směru osy x (R_{Ax} , R_{Bx} , ...) se vždy rovnají nule, ač jsou v obr. 4 formálně naznačeny.

Jelikož počet podložek se různí v závislosti na zvolené délce kolejnic, nejsou zde vypsány konkrétní vztahy pro jednotlivé vozy. Potřebné rozměry jsou ale zapsány v příloze B. Kromě nich potřebujeme znát, v jakém místě působí reakce podvozků. Pro vozy typu RES (konstrukční skupina 51 nebo 69) jsou tyto vzdálenosti následující [6]:

1. souřadnice reakce prvního podvozku: $l_{RA,RC,RE,\dots} = 1,934 \text{ m}$,
2. souřadnice reakce druhého podvozku: $l_{RB,RD,RF,\dots} = 16,794 \text{ m}$.

Výslednou sílu na jedno dvojkolí obdržíme vydělením příslušné reakce podvozku (R_A , R_B nebo jiné) dvěma. Nápravové zatížení (zjišťujeme pouze ve svislém směru) se vypočte takto:

$$m_{nzA,B,\dots} = \frac{R_{A,B,\dots}}{2 \cdot 1000 \cdot g_{\text{norm}}} + \frac{m_{\text{vozu}}}{4}, \quad (2.31)$$

kde m_{vozu} t vlastní hmotnost vozu.

3 Analýza silových účinků na vozy a pojižděnou kolej

S využitím všech předchozích poznatků stanovíme v této kapitole svislé a horizontální zatížení dopravních prostředků i tratě při přepravě dlouhých kolejnic na více vozech. Ze získaných výsledků vyvodíme závěry, které porovnáme s nařízeními nakládacích směrnic UIC.

3.1 Výsledky analýzy

Výsledky rozboru silového působení se dělí celkem do čtyř kategorií podle délky kolejnic. Hodnoty nápravových zatížení (m_{nz}) nebo příčných sil na dvojkolí (R_{dv}) jsou pro jednotlivé jízdní situace (průjezd zlomem sklonu nebo obloukem) zapsány v tabulkách, v příloze E jsou pak zapsány veškeré síly působící v podložkách. Na začátku každé délkové varianty jsou uvedena nápravová zatížení pro výchozí stav, tj. při postavení soupravy v přímé vodorovné koleji; příčné síly se v přímé koleji teoreticky rovnají nule. Žlutě vyznačené hodnoty jsou v dané tabulce těmi maximálními.

3.1.1 Kolejnice o délce 25 m

Kolejnicové pásy o této délce se nakládají přes dva vozy, umístěny jsou na šesti podložkách [3]. Na zlomu sklonu tedy existuje pouze jediná analyzovaná možnost, a sice ta, při níž je jeden vůz na sklonu (ten s podvozky C a D), druhý ještě nikoliv. V tab. 3 je uveden maximální počet kolejnicových pásů, které lze přepravit (naložit).

Tab. 3 – Maximální počet přepravovaných kolejnic

(-)	Kolejnice 49E1	Kolejnice 60E2
n_k	60	50

Přímá vodorovná kolej

Tab. 4 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	10,80	19,72	19,72	10,80
60E2	10,86	19,90	19,90	10,86

SILOVÉ PŮSOBNÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ**Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m**

Tab. 5 – Nápravná zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	10,7	27,0	10,2	13,2
60E2	10,8	30,0	6,7	14,2

Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Tab. 6 – Nápravná zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	10,3	32,0	4,6	14,3
60E2	10,1	36,9	-1,1	15,7

Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Tab. 7 – Nápravná zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	11,0	12,5	29,3	8,4
60E2	11,0	9,8	33,1	7,6

Zlom sklonu z 0 na -15‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Tab. 8 – Nápravná zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	11,3	7,5	34,9	7,4
60E2	11,6	2,9	40,9	6,1

Směrový oblouk o poloměrem 300 m

Tab. 9 – Příčné síly na dvojkolí v podvozcích

(kN)	R_{dvA}	R_{dvB}	R_{dvC}	R_{dvD}
49E1	-14,4	14,4	-14,4	14,4
60E2	-19,2	19,2	-19,2	19,2

3.1.2 Kolejnice o délce 30 m

Třicetimetrové kolejnicové pásy se loží opět přes dva vozy, oproti pětadvaceti-metrovým kolejnicím však spočívají na osmi podložkách (namísto šesti) [3]. Stejně jako u kolejnic o délce 25 m tedy máme na zlomu sklonu jedinou možnost k analýze, a sice takovou, kdy jeden vůz se nachází na zlomu (ten s podvozky C a D), druhý ještě před ním. V tab. 10 nalezneme maximální počet kolejnic, které lze přepravit (naložit).

Tab. 10 – Maximální počet přepravovaných kolejnic

(-)	Kolejnice 49E1	Kolejnice 60E2
n_k	57	47

Přímá vodorovná kolej

Tab. 11 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	13,19	19,92	19,92	13,19
60E2	13,21	19,95	19,95	13,21

Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Tab. 12 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	13,1	27,0	10,7	15,5
60E2	13,1	29,6	7,3	16,3

Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Tab. 13 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	12,7	31,8	5,2	16,5
60E2	12,5	36,3	-0,2	17,8

Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Tab. 14 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	13,3	12,9	29,2	10,9
60E2	13,3	10,3	32,6	10,1

Zlom sklonu z 0 na -15‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Tab. 15 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}
49E1	13,7	8,0	34,6	9,9
60E2	13,9	3,7	40,1	8,6

Směrový oblouk o poloměrem 300 m

Tab. 16 – Příčné síly na dvojkolí v podvozcích

(kN)	R_{dvA}	R_{dvB}	R_{dvC}	R_{dvD}
49E1	-13,8	13,8	-13,8	13,8
60E2	-18,2	18,2	-18,2	18,2

3.1.3 Kolejnice o délce 50 m

V tomto případě kolejnice ložíme na tři vozy, na nichž je dohromady dvanáct podložek [3]. Tím se nám rozšířily možnosti, jak provést analýzu na zlomu sklonu. U každé z variant se tedy nejprve bude na zlomu sklonu nacházet jen jeden vůz (ten s podvozky E a F) a posléze i druhý (tj. vozy s podvozky C, D, E a F). V tab. 17 je uveden maximální počet kolejnicových pásů, jež je možno naložit (přepřavit).

Tab. 17 – Maximální počet přepravovaných kolejnic

(-)	Kolejnice 49E1	Kolejnice 60E2
n_k	48	39

Přímá vodorovná kolej

Tab. 18 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	12,13	17,75	17,76	17,76	17,75	12,13
60E2	12,05	17,61	17,61	17,61	17,61	12,05

Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m1) Jeden vůz na sklonu (s podvozky E a F)

Tab. 19 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	12,1	17,8	17,7	23,6	10,1	14,0
60E2	12,1	17,6	17,5	25,5	7,2	14,6

2) Dva vozy na sklonu (s podvozky C až F)

Tab. 20 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	12,2	22,0	12,1	18,3	18,7	12,1
60E2	12,2	23,4	9,9	18,3	18,8	12,0

Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m1) Jeden vůz na sklonu (s podvozky E a F)

Tab. 21 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	12,1	17,8	17,4	27,3	5,8	14,9
60E2	12,1	17,6	17,1	30,5	1,5	15,8

2) Dva vozy na sklonu (s podvozky C až F)

Tab. 22 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	11,9	25,3	8,9	15,8	21,5	11,8
60E2	11,7	27,9	5,7	15,0	22,7	11,6

Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m1) Jeden vůz na spádu (s podvozky E a F)

Tab. 23 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	12,1	17,8	17,8	11,9	25,4	10,2
60E2	12,1	17,6	17,7	9,7	28,0	9,5

2) Dva vozy na spádu (s podvozky C až F)

Tab. 24 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	12,1	13,5	23,5	17,2	16,9	12,2
60E2	12,0	11,8	25,3	16,9	16,4	12,2

Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m1) Jeden vůz na spádu (s podvozky E a F)

Tab. 25 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	12,1	17,7	18,1	8,2	29,7	9,4
60E2	12,1	17,6	18,1	4,7	33,7	8,3

2) Dva vozy na spádu (s podvozky C až F)

Tab. 26 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}
49E1	12,4	10,2	26,6	19,7	14,0	12,5
60E2	12,4	7,4	29,5	20,2	12,5	12,5

Směrový oblouk o poloměrem 300 m

Tab. 27 – Příčná síla na dvojkolí v podvozcích

(kN)	R_{dvA}	R_{dvB}	R_{dvC}	R_{dvD}	R_{dvE}	R_{dvF}
49E1	-12,4	22,0	9,5	9,6	-21,9	12,4
60E2	-16,1	28,5	12,3	12,4	-28,4	16,1

3.1.4 Kolejnice o délce 75 m

Pětasedmdesátimetrové kolejnicové pásy jsou rozloženy na pět vozů a šestnáct podložek [3]. Analýza silového působení při průjezdu vozů zlomem sklonu tedy zahrnuje čtyři možné případy – od jednoho vozu na sklonu (ten s podvozky I a J) až po čtyři vozy na sklonu (ty s podvozky B až J). V tab. 28 nalezneme maximální počet kolejnic, které lze přepravit (naložit).

Tab. 28 – Maximální počet přepravovaných kolejnic

(-)	Kolejnice 49E1	Kolejnice 60E2
n_k	48	39

Přímá vodorovná kolej

Tab. 29 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,40	15,06	17,72	17,86	17,83	17,79	17,84	17,63	13,30	6,48
60E2	7,38	14,95	17,57	17,71	17,68	17,65	17,69	17,49	13,21	6,47

Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

1) Jeden vůz na sklonu (s podvozky I a J)

Tab. 30 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	17,9	17,8	17,8	17,8	23,2	5,9	8,3
60E2	7,4	15,0	17,6	17,7	17,7	17,6	17,6	25,0	3,2	9,0

2) Dva vozy na sklonu (s podvozky G až J)

Tab. 31 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	17,8	18,0	21,1	13,4	17,7	14,4	6,4
60E2	7,4	15,0	17,6	17,7	17,9	22,1	11,6	17,6	14,7	6,4

SILOVÉ PŮSOBNÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ3) Tři vozy na sklonu (s podvozky E až J)

Tab. 32 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,8	21,2	13,3	18,3	18,5	17,7	13,2	6,5
60E2	7,4	14,9	17,7	22,2	11,6	18,3	18,6	17,6	13,0	6,5

4) Čtyři vozy na sklonu (s podvozky C až J)

Tab. 33 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	20,5	10,7	19,3	18,2	17,8	17,8	17,7	13,3	6,5
60E2	7,3	22,2	8,0	19,6	18,1	17,6	17,7	17,5	13,2	6,5

Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m1) Jeden vůz na sklonu (s podvozky I a J)

Tab. 34 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	17,9	17,8	17,8	17,4	27,1	1,6	9,2
60E2	7,4	15,0	17,6	17,7	17,7	17,7	17,2	30,2	-2,7	10,1

2) Dva vozy na sklonu (s podvozky G až J)

Tab. 35 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	17,9	17,8	23,5	11,2	15,1	17,2	6,2
60E2	7,4	15,0	17,6	17,7	17,6	25,4	8,7	14,0	18,4	6,1

3) Tři vozy na sklonu (s podvozky E až J)

Tab. 36 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	23,5	11,1	16,4	20,5	17,4	13,4	6,5
60E2	7,4	15,0	17,5	25,3	8,6	15,8	21,3	17,1	13,3	6,5

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ4) Čtyři vozy na sklonu (s podvozky C až J)

Tab. 37 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,2	22,0	9,4	17,2	20,2	17,6	17,9	17,7	13,3	6,5
60E2	7,2	24,3	6,4	16,8	21,0	17,4	17,7	17,6	13,1	6,5

Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m1) Jeden vůz na spádu (s podvozky I a J)

Tab. 38 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	17,9	17,8	17,8	17,9	12,0	20,7	4,6
60E2	7,4	15,0	17,6	17,7	17,7	17,7	17,7	9,9	23,2	4,0

2) Dva vozy na spádu (s podvozky G až J)

Tab. 39 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	17,9	17,7	14,5	22,3	17,6	12,2	6,6
60E2	7,4	15,0	17,6	17,7	17,5	13,2	23,7	17,4	11,8	6,6

3) Tři vozy na spádu (s podvozky E až J)

Tab. 40 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,6	14,5	22,4	17,3	17,2	17,5	13,5	6,5
60E2	7,4	15,0	17,4	13,2	23,8	17,0	16,8	17,3	13,4	6,5

4) Čtyři vozy na spádu (s podvozky C až J)

Tab. 41 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	9,7	24,8	16,4	17,5	17,8	17,8	17,6	13,3	6,5
60E2	7,4	7,7	27,1	15,8	17,3	17,7	17,7	17,5	13,3	6,5

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ**Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m**1) Jeden vůz na spádu (s podvozky I a J)

Tab. 42 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	17,9	17,8	17,8	18,2	8,2	25,0	3,8
60E2	7,4	15,0	17,6	17,7	17,7	17,6	18,2	4,7	29,1	2,8

2) Dva vozy na spádu (s podvozky G až J)

Tab. 43 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,7	17,9	17,9	12,1	24,5	20,2	9,5	6,8
60E2	7,4	15,0	17,6	17,7	17,8	9,9	26,6	21,0	8,0	6,9

3) Tři vozy na spádu (s podvozky E až J)

Tab. 44 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,4	15,1	17,8	12,2	24,6	19,1	15,2	17,9	13,2	6,5
60E2	7,4	15,0	17,7	10,1	26,8	19,5	14,1	17,9	13,1	6,5

4) Čtyři vozy na spádu (s podvozky C až J)

Tab. 45 – Nápravová zatížení dvojkolí v podvozcích

(t)	m_{nzA}	m_{nzB}	m_{nzC}	m_{nzD}	m_{nzE}	m_{nzF}	m_{nzG}	m_{nzH}	m_{nzI}	m_{nzJ}
49E1	7,6	8,2	26,0	18,6	15,4	18,0	17,8	17,6	13,4	6,5
60E2	7,6	5,6	28,8	18,7	14,4	17,9	17,7	17,4	13,3	6,5

Směrový oblouk o poloměru 500 m

Tab. 46 – Příčná síla na dvojkolí v podvozcích

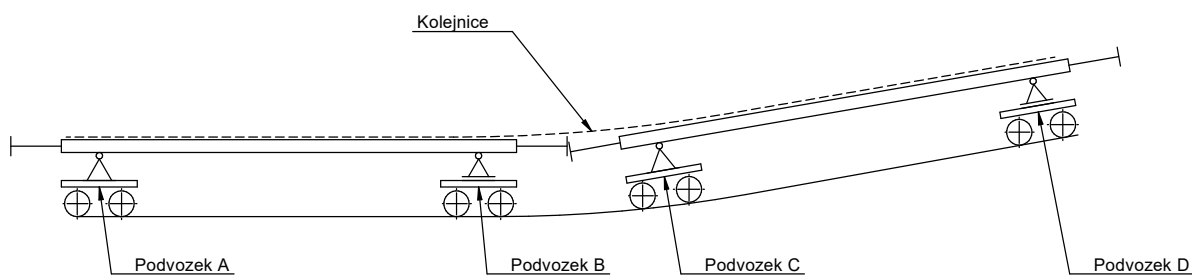
(kN)	R_{dvA}	R_{dvB}	R_{dvC}	R_{dvD}	R_{dvE}	R_{dvF}	R_{dvG}	R_{dvH}	R_{dvI}	R_{dvJ}
49E1	-5,3	3,5	-2,6	0,5	0,9	-2,2	3,2	-1,1	-7,2	6,7
60E2	-6,9	4,6	-3,3	0,6	1,2	-2,9	4,1	-1,4	-9,3	8,8

3.2 Vyhodnocení výsledků

Tato část práce je zaměřena na rozbor a komentář výsledků prezentovaných v předchozí podkapitole 3.1. Zvláště projdeme výsledky pro průjezd zlomem sklonu a pro průjezd obloukem.

3.2.1 Průjezd zlomem sklonu

Analýza dle uvedeného výpočetního modelu v případě průjezdu soupravy vypuklým (konvexním) zlomem sklonu ukázala, že ty podvozky, které jsou jako poslední před zlomem sklonu, se přitěžují – na obr. 9 je to podvozek B. Naopak podvozky sousední, první na sklonu, jsou odlehčeny oproti výchozímu stavu (postavení vozů v přímé vodorovné koleji) – na obr. 9 se jedná o podvozek C.

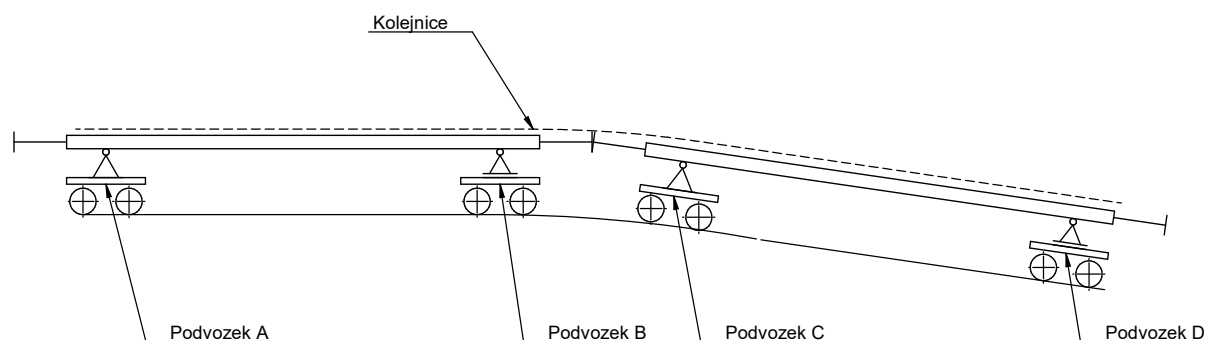


Obr. 9 – Schématické znázornění vozů při průjezdu vydatým zlomem sklonu

V extrémním případě vychází dokonce záporné hodnoty nápravových zatížení – jedná se o červeně vyznačené buňky v tab. 6, tab. 13 a tab. 34. Záporná hodnota nápravového zatížení jako taková nemá žádné rozumné vysvětlení, neboť není síly, která by na dvojkolí působila v opačném smyslu, než směřuje osa z (tj. dolů). Pojžděná kolej působí na dvojkolí pouze ve shodném smyslu s osou z (tj. vzhůru). Tento výsledek lze asi nejlépe okomentovat tak, že k odlehčení by velmi pravděpodobně nedošlo, protože to je spojeno s předpokladem, že podložka dokonale přeneše na vůz velkou zápornou sílu, která by jej měla teoreticky nadlehčit. I když jsou podložky a proložky rozepřeny o klanice, jedná se pouze o třecí vazbu, tudíž by spíše došlo ke ztrátě kontaktu kolejnic s podložkou než k odlehčení podvozku.

Při průjezdu soupravy vydatým (konkávním) zlomem sklonu se při rozboru dle zvoleného výpočetního modelu ukázalo, že nejvíce přitíženy jsou podvozky, které se jako první nachází v klesání – na obr. 10 je to podvozek C. Sousední podvozek proti směru jízdy

(podvozek B na obr. 10) se naopak nadlehčoval, nikoliv však tak výrazně jako podvozek C při průjezdu zlomem sklonu. Zbylé podvozky zůstávají zatíženy obdobně jako v přímé vodorovné koleji.



Obr. 10 – Schématické znázornění vozů při průjezdu vypuklým zlomem sklonu

Bez povšimnutí nelze ponechat ani to, že dle výpočtu se nápravová zatížení v některých případech u jednotlivého vozu rozvážíla natolik, že poměr zatížení mezi nimi byl dle výpočetní modelu vyšší než povolený, tj. tři ku jedné. Faktory, které nejvíce ovlivňují zatížení podvozků při průjezdu zlomem sklonu, jsou následující:

- charakteristika kolejnicových pásů z hlediska pružnosti a pevnosti – kvadratický moment průřezu v ohybu k ose y , modul pružnosti v tahu,
- délka kolejnicových pásů – čím kratší kolejnice jsou, tím vykazují větší tuhost, jsou méně poddajné (i délka je součástí tuhosti kolejnic při ohybu),
- počet naložených kolejnic,
- rozmístění podložek na vozech – jsou-li podložky příliš blízko u sebe (např. na druhém voze u kolejnic 25 a 30 m), vznikají v podložkách velké síly a jednotlivé podvozky se zatěžují více.

3.2.2 Průjezd směrovým obloukem

U statického výpočtu deformace kolejnic v oblouku jsme se dostali maximálně na hodnotu 29 kN pro příčnou sílu R_{dv} na jedno dvojkolí. Mezní hodnota kvazistatické příčné vodící síly Y_{qst} na jedno dvojkolí je normou [11] určena na 60 kN. To znamená, že vlivem deformace kolejnic se přenáší na toto konkrétní dvojkolí síla 29 kN v ose y , zbylých 31 kN (do 60 kN) zůstává na vyrovnání setrvačných účinků vozu a nákladu při průjezdu obloukem (vlivem setrvačné odstředivé síly).

Jednoduchým orientačním výpočtem, při němž uvažujeme působení setrvačné odstředivé síly na jedno dvojkolí, dané součinem hmoty připadající na toto dvojkolí (20 t) a maximálního dovoleného nevyrovnaného příčného zrychlení (dle [11] je to zadané působícím nedostatkem převýšení 100 mm), dojdeme k hodnotě příčné síly 13 kN. Vlivem ohybu kolejnic je tedy dvojkolí zatíženo více než dvojnásobně v porovnání se zatížením od setrvačných účinků.

Až na kolejnice délky 75 m vychází nejvyšší hodnota příčné síly na druhém podvozku prvního vozu (na obr. 4 se jedná o podvozek B). Z porovnání výsledků také vyplývá, že velikost příčných sil je u kolejnic délky 75 m v oblouku o poloměru 500 m v řádu jednotek kN oproti kolejnicím jiných délek v oblouku o poloměru 300 m, kde hodnoty příčných sil vycházejí vyšší, v řádech desítek kN. Taktéž si můžeme povšimnout, že příčné síly u kolejnic v oblouku o poloměru 300 m jsou zrcadlově (tj. podvozek první s podvozkem posledním) co do absolutní hodnoty přibližně stejné. Vychází-li velikost některé ze sil záporně, znamená to, že reakce celého podvozku působí v opačném smyslu, než v jakém je zakreslena na obr. 4

3.3 Návrh úprav pro splnění limitu nápravového zatížení

Nápravový limit dvacet tun pro vybrané vozy řady RES je dle výsledků analýzy v krajním případě až dvojnásobně překročen. Pakliže se ukáže, že zjednodušený postup výpočtu je dostatečně přesný a že není žádoucí, byť jen ojediněle, zatěžovat pojížděnou trať, musí se navrhnout úpravy tak, aby byl tento limit dodržen.

V případě požadavku na zachování maximálního počtu kolejnic, které lze naložit dle nakládacích směrnic UIC, by bylo možné mírně snížit nápravové zatížení změnou rozmístění podložek na vozech. Nedalo by se však docílit výraznějších změn – tato možnost by byla použitelná tam, kde je limit dvacet tun na dvojkolí překročen jen málo.

Nejjednodušším krokem, jak nápravové zatížení snížit, je omezit maximální počet kolejnic, jež lze naložit (přepravit). Vybereme-li u každé délkové varianty kolejnic tu situaci, při níž dochází k největšímu zatížení dvojkolí, a snížíme-li počet naložených kolejnic tak, aby nápravové zatížení vyhovělo, bude zaručeně limit splněn i v ostatních případech. Upravený (i původní) počet kolejnic je uveden v tab. 47.

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮTab. 47 – *Původní a upravený maximální počet kolejnic*

(-) (-)	DÉLKA KOLEJNIC							
	25 m		30 m		50 m		75 m	
POČET	Původní	Upravený	Původní	Upravený	Původní	Upravený	Původní	Upravený
$n_k - 49E1$	60	29	57	27	48	28	48	31
$n_k - 60E2$	50	20	47	19	39	19	39	22

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést úvodní teoretickou studii zaměřenou na rozbor zatížení dopravních prostředků a infrastruktury při přepravě kolejnicových pásů na více železničních vozech. Výsledky analýzy ukázaly, že může docházet ke zvýšenému namáhání vozů i tratě. Byť nakládací směrnice přikazují ponížít ložnou hmotnost vozů, vycházela dle zvoleného výpočetního modelu i tak nápravová zatížení překračující (někdy dokonce výrazně) povolené hodnoty. Celkové hodnoty sil a zatížení se mohou zejména v případě průjezdu zlomem sklonu zdát větší, než bychom očekávali, nicméně je třeba si uvědomit, že kolejnice jsou velmi tuhé a nepoddajné.

Závěrem je třeba poznamenat, že celý přístup k dané problematice je ryze teoretický a výpočet se zakládá na řadě zjednodušujících předpokladů – například:

- 1) Použití diferenciální rovnice průhybové čáry s přibližným vzorcem pro křivost se v pružnosti a pevnosti omezuje na malé průhyby a natočení – u zlomu sklonu lze tento předpoklad dodržet, avšak v případě směrového oblouku jsou již deformace větší.
- 2) Vůz je dokonale tuhý a nepružný nosník. Tento předpoklad není v reálné situaci pravdivý – vůz se pod silovými účinky deformuje.
- 3) Podložky přenesou veškeré síly. Bylo by vhodné v případě větších záporných sil uvažovat, že kolejnice se podložky nedotýkají, tudíž na ně v tomto místě nepůsobí žádná síla.
- 4) Na kolejnice nepůsobí žádné podélné síly (v ose x).

Tímto se však otevírá prostor pro tvorbu další publikací, které by svým výzkumem zpřesňovaly výsledky a braly v úvahu skutečnosti, jež jsou v této práci zanedbány. V teoretické rovině by bylo možné ověřit, jak samotnou konstrukci vozu (rám, podlahu, podvozek, ...) namáhají síly působící na podložky, poněvadž vůz nebyl zřejmě pro přepravu kolejnic původně konstruován. Dále lze upřesnit výpočet například tím, že nebude zahrnut předpoklad 3) z předchozího seznamu. Navázat na tuto práci lze i numerickými výpočty s pomocí metody konečných prvků nebo přímo měřeními sil v podložkách při přepravě.

Literatura

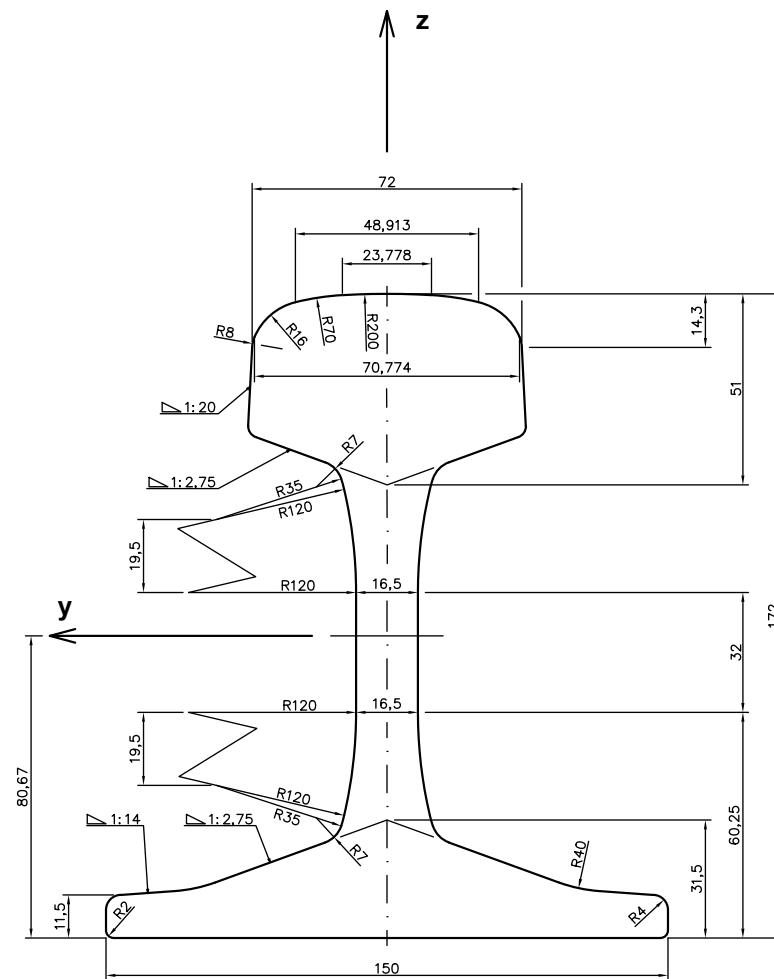
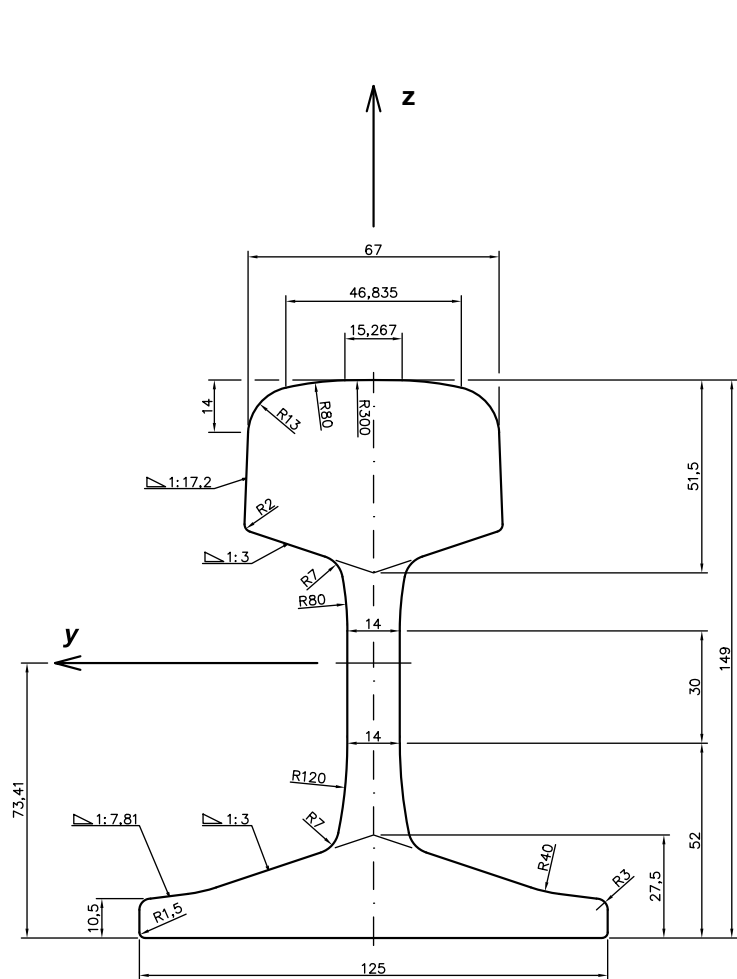
- [1] TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY – MORAVIA STEEL. *Kolejnice a příslušenství*. Online. TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY – MORAVIA STEEL. Třinecké železářny – Moravia Steel. Třinec, 2024. Dostupné z: <https://www.trz.cz/produkty/kolejnice-a-prislusenstvi/>. [cit. 2024-02-02].
- [2] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 13674-1+A1, Železniční aplikace – Kolej – Kolejnice – Část 1: Vignolovy železniční kolejnice o hmotnosti 46 kg/m a větší. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [3] STUHLÍK, Radek. *Přeprava kolejnicových pásů na plošinových vozech ČD Cargo a.s.* Online, Bakalářská práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2013. Dostupné z: <https://dk.upce.cz//handle/10195/54447>. [cit. 2023-10-18].
- [4] INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. *Loading Guidelines, Volume 1 – Principles*. Online. Paris, 2024. ISBN 978-2-7461-3365-5. Dostupné z: https://uic.org/IMG/pdf/uic_loading_guidelines-volume_1-01042024.pdf. [cit. 2024-04-09]. 8th edition.
- [5] INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. *Loading Guidelines, Volume 2 – Goods*. Online. Paris, 2024. ISBN 978-2-7461-3368-6. Dostupné z: https://uic.org/IMG/pdf/uic_loading_guidelines-volume_2-01042024.pdf. [cit. 2024-04-09]. 8th edition.
- [6] ČD CARGO, A.S. – ČLEN SKUPINY ČESKÉ DRÁHY. *Katalog železničních nákladních vozů ČD Cargo, a.s.* Online. ČD CARGO, A.S. – ČLEN SKUPINY ČESKÉ DRÁHY. ČD Cargo. Praha. Dostupné z: <https://www.cdcargo.cz/katalog-nakladnich-vozu>. [cit. 2024-03-05].
- [7] HÖSCHL, Cyril. *Pružnost a pevnost ve strojnictví: učebnice pro vysoké školy*. Praha: SNTL, 1971.
- [8] TIMOŠENKO, Štěpán. *Pružnost a pevnost I*. K. HURÁSEK (překladatel). Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1951.

- [9] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN 73 6360-1, *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 1: Projektování*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [10] EVROPSKÁ UNIE. NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 1299/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii. Online. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2014. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1299>. [cit. 2023-11-14].
- [11] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 14363+A2, *Železniční aplikace – Zkoušení a simulace pro schvalování železničních vozidel z hlediska jízdních vlastností – Jízdní chování a stacionární zkoušky*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2024.

Seznam příloh

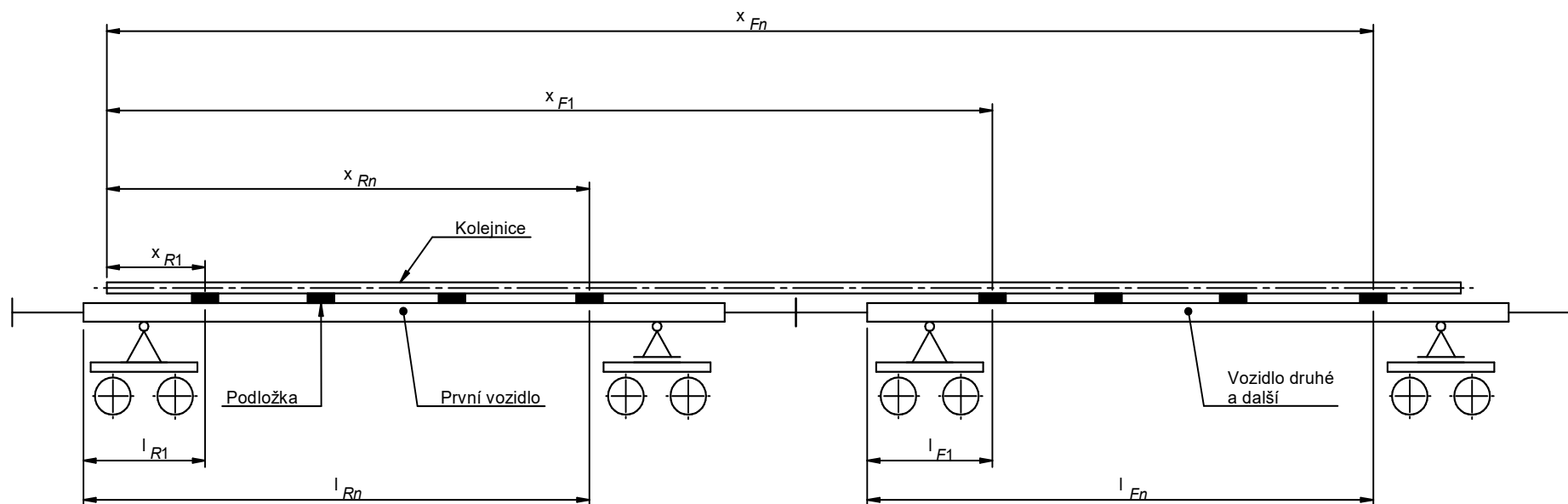
A	Průřezový profil kolejnic 49E1 a 60E2	51
B	Přehled rozměrových konstant	52
C	Příklad výpočtové matice.....	59
D	Přehled posunů působišť osamělých sil F_k	61
E	Přehled sil působících v podložkách.....	69

A Průřezový profil kolejnic 49E1 a 60E2



Zdroj: Autor na základě předlohy z normy [2]

B Přehled rozměrových konstant



Obr. 11 – Vyznačení rozměrových konstant x a l

Vysvětlivka: Index n je indexem poslední reakce podpory R či poslední osamělé síly F . Libovolná reakce podpory má obecný index ve vzorcích z kapitoly 2 j a kterákoliv osamělá síla pak index k . Za j nebo k tedy dosazujeme celá čísla od 1 po n .

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic a varianta	Kóta	Velikost (m)	Kóta	Velikost (m)
25 m platí univerzálně	<i>XR1</i>	1,88	<i>XF1</i>	14,835
	<i>XR2</i>	7,86	<i>XF2</i>	17,14
	<i>XR3</i>	10,165	<i>XF3</i>	23,12
30 m platí univerzálně	<i>XR1</i>	2,06	<i>XF1</i>	17,335
	<i>XR2</i>	7,06	<i>XF2</i>	19,64
	<i>XR3</i>	10,36	<i>XF3</i>	22,94
	<i>XR4</i>	12,665	<i>XF4</i>	27,94
50 m jeden vůz na sklonu	<i>XR1</i>	2,11	<i>XF1</i>	37,285
	<i>XR2</i>	4,11	<i>XF2</i>	39,59
	<i>XR3</i>	10,41	<i>XF3</i>	45,89
	<i>XR4</i>	12,715	<i>XF4</i>	47,89
	<i>XR5</i>	17,385		
	<i>XR6</i>	21,185		
	<i>XR7</i>	28,815		
	<i>XR8</i>	32,615		
50 m dva vozy na sklonu, souprava v oblouku	<i>XR1</i>	2,11	<i>XF1</i>	17,385
	<i>XR2</i>	4,11	<i>XF2</i>	21,185
	<i>XR3</i>	10,41	<i>XF3</i>	28,815
	<i>XR4</i>	12,715	<i>XF4</i>	32,615
			<i>XF5</i>	37,285
			<i>XF6</i>	39,59
			<i>XF7</i>	45,89
			<i>XF8</i>	47,89
75 m jeden vůz na sklonu	<i>XR1</i>	1,85	<i>XF1</i>	70,845
	<i>XR2</i>	6,475	<i>XF2</i>	73,15
	<i>XR3</i>	11,145		
	<i>XR4</i>	15,545		
	<i>XR5</i>	20,175		
	<i>XR6</i>	26,375		
	<i>XR7</i>	31,045		
	<i>XR8</i>	37,145		
	<i>XR9</i>	41,175		
	<i>XR10</i>	46,275		
	<i>XR11</i>	50,945		

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic a varianta	Kóta	Velikost (m)	Kóta	Velikost (m)	
	XR12	56,745			
	XR13	63,675			
	XR14	66,175			
75 m dva vozy na sklonu	XR1	1,85	XF1	50,945	
	XR2	6,475	XF2	56,745	
	XR3	11,145	XF3	63,675	
	XR4	15,545	XF4	66,175	
	XR5	20,175	XF5	70,845	
	XR6	26,375	XF6	73,15	
	XR7	31,045			
	XR8	37,145			
	XR9	41,175			
	XR10	46,275			
75 m tři vozy na sklonu	XR1	1,85	XF1	20,175	
	XR2	6,475	XF2	26,375	
	XR3	11,145	XF3	31,045	
	XR4	15,545	XF4	37,145	
				XF5	41,175
				XF6	46,275
				XF7	50,945
				XF8	56,745
				XF9	63,675
				XF10	66,175
				XF11	70,845
				XF12	73,15
75 m čtyři vozy na sklonu, souprava v oblouku	XR1	1,85	XF1	11,145	
	XR2	6,475	XF2	15,545	
				XF3	20,175
				XF4	26,375
				XF5	31,045
				XF6	37,145
				XF7	41,175
				XF8	46,275
				XF9	50,945
				XF10	56,745

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic a varianta	Kóta	Velikost (m)	Kóta	Velikost (m)
			<i>X_{F11}</i>	63,675
			<i>X_{F12}</i>	66,175
			<i>X_{F13}</i>	70,845
			<i>X_{F14}</i>	73,15

Zdroj dat: [3], příloha č. 3

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic a varianta		Kóta	Velikost (m)		Kóta	Velikost (m)
25 m platí univerzálně	VŮZ 1.	l_{R1}	8,694	VŮZ 2.	l_{F1}	1,749
		l_{R2}	14,674		l_{F2}	4,054
		l_{R3}	16,979		l_{F3}	10,034
30 m platí univerzálně	VŮZ 1.	l_{R1}	6,374	VŮZ 2.	l_{F1}	1,749
		l_{R2}	11,374		l_{F2}	4,054
		l_{R3}	14,674		l_{F3}	7,354
		l_{R4}	16,979		l_{F4}	12,354
50 m jeden vůz na sklonu	VŮZ 1.	l_{R1}	6,374	VŮZ 3.	l_{F1}	1,749
		l_{R2}	8,374		l_{F2}	4,054
		l_{R3}	14,674		l_{F3}	10,354
		l_{R4}	16,979		l_{F4}	12,354
	VŮZ 2.	l_{R5}	1,749			
		l_{R6}	5,549			
		l_{R7}	13,179			
		l_{R8}	16,979			
50 m dva vozy na sklonu, souprava v oblouku	VŮZ 1.	l_{R1}	6,374	VŮZ 2.	l_{F1}	1,749
		l_{R2}	8,374		l_{F2}	5,549
		l_{R3}	14,674		l_{F3}	13,179
		l_{R4}	16,979		l_{F4}	16,979
				VŮZ 3.	l_{F5}	1,749
					l_{F6}	4,054
					l_{F7}	10,354
					l_{F8}	12,354
75 m jeden vůz na sklonu	VŮZ 1.	l_{R1}	12,354	VŮZ 5.	l_{F1}	1,749
		l_{R2}	16,979		l_{F2}	4,054
	VŮZ 2.	l_{R3}	1,749			
		l_{R4}	6,149			
		l_{R5}	10,779			
		l_{R6}	16,979			
	VŮZ 3.	l_{R7}	1,749			
		l_{R8}	7,849			
		l_{R9}	11,879			
		l_{R10}	16,979			

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic a varianta		Kóta	Velikost (m)		Kóta	Velikost (m)		
	VŮZ 4.	l_{R11}	1,749					
		l_{R12}	7,549					
		l_{R13}	14,479					
		l_{R14}	16,979					
75 m dva vozy na sklonu	VŮZ 1.	l_{R1}	12,354	VŮZ 4.	l_{F1}	1,749		
		l_{R2}	16,979		l_{F2}	7,549		
	VŮZ 2.	l_{R3}	1,749		l_{F3}	14,479		
		l_{R4}	6,149		l_{F4}	16,979		
		l_{R5}	10,779	VŮZ 5.	l_{F5}	1,749		
		l_{R6}	16,979		l_{F6}	4,054		
	VŮZ 3.	l_{R7}	1,749					
		l_{R8}	7,849					
		l_{R9}	11,879					
		l_{R10}	16,979					
75 m tři vozy na sklonu	VŮZ 1.	l_{R1}	12,354	VŮZ 3.	l_{F1}	1,749		
		l_{R2}	16,979		l_{F2}	7,849		
	VŮZ 2.	l_{R3}	1,749		l_{F3}	11,879		
		l_{R4}	6,149		l_{F4}	16,979		
		l_{R5}	10,779	VŮZ 4.	l_{F5}	1,749		
		l_{R6}	16,979		l_{F6}	7,549		
						l_{F7}	14,479	
						l_{F8}	16,979	
						VŮZ 5.	l_{F9}	1,749
							l_{F10}	4,054
75 m čtyři vozy na sklonu souprava v oblouku	VŮZ 1.	l_{R1}	12,354	VŮZ 2.	l_{F1}	1,749		
		l_{R2}	16,979		l_{F2}	6,149		
						l_{F3}	10,779	
						l_{F4}	16,979	
				VŮZ 3.		l_{F5}	1,749	
						l_{F6}	7,849	
	l_{F7}	11,879						
	l_{F8}	16,979						
	VŮZ 4.	l_{F9}	1,749					
		l_{F10}	7,549					

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic a varianta	Kóta	Velikost (m)	Kóta	Velikost (m)
			l_{F11}	14,479
			l_{F12}	16,979
			l_{F13}	1,749
			l_{F14}	4,054

Zdroj dat: [3], příloha č. 3

C Příklad výpočtové matice

Na následující straně je ve formě obrázku vložena jako ukázka jedna z výpočtových matic včetně popisu. Jedná se o matici pro kolejnice délky 25 m a ohyb v rovině x - z .

	1	2	3	4	5	6	k_1	c_1	k_2	c_2	k_3	c_3	k_4	c_4	k_5	c_5	k_6	c_6	k_7	c_7	49E1	60E2	
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1,88	7,86	10,165	14,835	17,14	23,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1,7672	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	30,8898	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	51,66361	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	110,0386	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	146,8898	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	267,2672	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1,88	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-2,21489	0	0	0	0	0	0	0	1,88	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	22,85845	0	0	0	0	0	0	0	7,86	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	22,85845	-161,863	0	0	0	0	0	0	0	0	7,86	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	77,92595	-231,022	0	0	0	0	0	0	0	0	10,165	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	77,92595	-231,022	-350,107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,165	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	337,2683	-320,763	-574,402	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,835	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	337,2683	-320,763	-574,402	-1088,28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,835	1	0	0	0	0	0	0	0
17	563,0776	-315,323	-653,904	-1339,88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,14	1	0	0	0	0	0	0	0
18	563,0776	-315,323	-653,904	-1339,88	-1678,46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,14	1	0	0	0	0	0
19	1557,277	-40,981	-657,032	-1905,17	-2521,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,12	1	0	0	0	0	0
20	1557,277	-40,981	-657,032	-1905,17	-2521,22	-4119,48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,12	1	0	0	0
D	-27 344 818																						

Popis matice:

- sloupce 1 až 6 – konstantní koeficienty u neznámých sil působících na kolejnici (R a F)
- sloupce k_1 až c_7 – koeficienty u neznámých integračních konstant k a c
- řádky 1 a 2 – řádky plynoucí z rovnic silové rovnováhy (vždy jsou dvě)
- řádky 3 až 8 – řádky vyplývající ze shodného natočení průhybových čar v místě působících sil R a F (viz rovnice (2.23) a (2.24))
- řádky 8 až 20 – řádky plynoucí ze zadaného průhybu v místě působících sil R (viz rovnice (2.21)) a F (viz rovnice (2.22))
- D – determinant matice (pro řešitelnost úlohy nesmí být roven nule)
- sloupce 49E1 a 60E2 – vektory pravých stran pro dva typy kolejnic

D Přehled posunů působišť osamělých sil F_k **Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m**

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
25 m	jeden vůz na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0111
		$w_z (XF2)$	0,0322
		$w_z (XF3)$	0,0870
30 m	jeden vůz na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0111
		$w_z (XF2)$	0,0322
		$w_z (XF3)$	0,0625
		$w_z (XF4)$	0,1083
50 m	jeden vůz na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0111
		$w_z (XF2)$	0,0322
		$w_z (XF3)$	0,0900
		$w_z (XF4)$	0,1083
	dva vozy na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0111
		$w_z (XF2)$	0,0459
		$w_z (XF3)$	0,1159
		$w_z (XF4)$	0,1507
75 m	jeden vůz na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0111
		$w_z (XF2)$	0,0322
	dva vozy na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0111
		$w_z (XF2)$	0,0643
		$w_z (XF3)$	0,1278
		$w_z (XF4)$	0,1507
	tři vozy na sklonu	$w_z (XF5)$	0,1975
		$w_z (XF6)$	0,2206
tři vozy na sklonu	tři vozy na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0111
		$w_z (XF2)$	0,0669
		$w_z (XF3)$	0,1039

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)	
		$W_z (XF4)$	0,1507	
		$W_z (XF5)$	0,1975	
		$W_z (XF6)$	0,2555	
		$W_z (XF7)$	0,3248	
		$W_z (XF8)$	0,3499	
		$W_z (XF9)$	0,3965	
		$W_z (XF10)$	0,4196	
		čtyři vozy na sklonu	$W_z (XF1)$	0,0111
			$W_z (XF2)$	0,0549
			$W_z (XF3)$	0,0939
	$W_z (XF4)$		0,1507	
	$W_z (XF5)$		0,1975	
	$W_z (XF6)$		0,2585	
	$W_z (XF7)$		0,2988	
	$W_z (XF8)$		0,3498	
	$W_z (XF9)$		0,3965	
	$W_z (XF10)$		0,4545	
	$W_z (XF11)$		0,5238	
	$W_z (XF12)$		0,5488	
	$W_z (XF13)$	0,5955		
	$W_z (XF14)$	0,6186		

Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
25 m	jeden vůz na sklonu	$W_z (XF1)$	0,0105
		$W_z (XF2)$	0,0374
		$W_z (XF3)$	0,1072
30 m	jeden vůz na sklonu	$W_z (XF1)$	0,0105
		$W_z (XF2)$	0,0374
		$W_z (XF3)$	0,0759
		$W_z (XF4)$	0,1342
50 m	jeden vůz na sklonu	$W_z (XF1)$	0,0105
		$W_z (XF2)$	0,0374
		$W_z (XF3)$	0,1109
		$W_z (XF4)$	0,1342

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
75 m	dva vozy na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0105
		$w_z (XF2)$	0,0549
		$w_z (XF3)$	0,1438
		$w_z (XF4)$	0,1889
		$w_z (XF5)$	0,2588
		$w_z (XF6)$	0,2934
		$w_z (XF7)$	0,3879
		$w_z (XF8)$	0,4091
	jeden vůz na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0105
		$w_z (XF2)$	0,0374
	dva vozy na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0105
		$w_z (XF2)$	0,0782
		$w_z (XF3)$	0,1590
		$w_z (XF4)$	0,1889
		$w_z (XF5)$	0,2588
		$w_z (XF6)$	0,2934
tři vozy na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0105	
	$w_z (XF2)$	0,0817	
	$w_z (XF3)$	0,1287	
	$w_z (XF4)$	0,1889	
	$w_z (XF5)$	0,2588	
	$w_z (XF6)$	0,3458	
	$w_z (XF7)$	0,4497	
	$w_z (XF8)$	0,4872	
	$w_z (XF9)$	0,5573	
	$w_z (XF10)$	0,5918	
čtyři vozy na sklonu	$w_z (XF1)$	0,0105	
	$w_z (XF2)$	0,0619	
	$w_z (XF3)$	0,1158	
	$w_z (XF4)$	0,1889	
	$w_z (XF5)$	0,2588	
	$w_z (XF6)$	0,3503	
	$w_z (XF7)$	0,4107	
	$w_z (XF8)$	0,4872	
	$w_z (XF9)$	0,5573	
	$w_z (XF10)$	0,6443	
	$w_z (XF11)$	0,7482	
	$w_z (XF12)$	0,7857	

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
		$W_z (XF13)$	0,8557
		$W_z (XF14)$	0,8903

Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
25 m	jeden vůz na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0111
		$W_z (XF2)$	-0,0322
		$W_z (XF3)$	-0,0870
30 m	jeden vůz na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0111
		$W_z (XF2)$	-0,0322
		$W_z (XF3)$	-0,0625
		$W_z (XF4)$	-0,1083
50 m	jeden vůz na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0111
		$W_z (XF2)$	-0,0322
		$W_z (XF3)$	-0,0900
		$W_z (XF4)$	-0,1083
	dva vozy na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0111
		$W_z (XF2)$	-0,0459
		$W_z (XF3)$	-0,1159
		$W_z (XF4)$	-0,1507
		$W_z (XF5)$	-0,1975
		$W_z (XF6)$	-0,2206
		$W_z (XF7)$	-0,2836
		$W_z (XF8)$	-0,3036
75 m	jeden vůz na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0111
		$W_z (XF2)$	-0,0322
	dva vozy na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0111
		$W_z (XF2)$	-0,0643
		$W_z (XF3)$	-0,1278
		$W_z (XF4)$	-0,1507
		$W_z (XF5)$	-0,1975
		$W_z (XF6)$	-0,2206
	tři vozy na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0111
		$W_z (XF2)$	-0,0669

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)	
		$w_z (XF3)$	-0,1039	
		$w_z (XF4)$	-0,1507	
		$w_z (XF5)$	-0,1975	
		$w_z (XF6)$	-0,2555	
		$w_z (XF7)$	-0,3248	
		$w_z (XF8)$	-0,3499	
		$w_z (XF9)$	-0,3965	
		$w_z (XF10)$	-0,4196	
		čtyři vozy na sklonu	$w_z (XF1)$	-0,0111
			$w_z (XF2)$	-0,0549
	$w_z (XF3)$		-0,0939	
	$w_z (XF4)$		-0,1507	
	$w_z (XF5)$		-0,1975	
	$w_z (XF6)$		-0,2585	
	$w_z (XF7)$		-0,2988	
	$w_z (XF8)$		-0,3498	
	$w_z (XF9)$		-0,3965	
	$w_z (XF10)$		-0,4545	
	$w_z (XF11)$		-0,5238	
	$w_z (XF12)$		-0,5488	
	$w_z (XF13)$	-0,5955		
	$w_z (XF14)$	-0,6186		

Zlom sklonu 0 až -15‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
25 m	jeden vůz na sklonu	$w_z (XF1)$	-0,0105
		$w_z (XF2)$	-0,0374
		$w_z (XF3)$	-0,1072
30 m	jeden vůz na sklonu	$w_z (XF1)$	-0,0105
		$w_z (XF2)$	-0,0374
		$w_z (XF3)$	-0,0759
		$w_z (XF4)$	-0,1342
50 m	jeden vůz na sklonu	$w_z (XF1)$	-0,0105
		$w_z (XF2)$	-0,0374
		$w_z (XF3)$	-0,1109

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
	dva vozy na sklonu	$W_z (XF4)$	-0,1342
		$W_z (XF1)$	-0,0105
		$W_z (XF2)$	-0,0549
		$W_z (XF3)$	-0,1438
		$W_z (XF4)$	-0,1889
		$W_z (XF5)$	-0,2588
		$W_z (XF6)$	-0,2934
		$W_z (XF7)$	-0,3879
		$W_z (XF8)$	-0,4091
75 m	jeden vůz na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0105
		$W_z (XF2)$	-0,0374
	dva vozy na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0105
		$W_z (XF2)$	-0,0782
		$W_z (XF3)$	-0,1590
		$W_z (XF4)$	-0,1889
		$W_z (XF5)$	-0,2588
		$W_z (XF6)$	-0,2934
	tři vozy na sklonu	$W_z (XF1)$	-0,0105
		$W_z (XF2)$	-0,0817
		$W_z (XF3)$	-0,1287
		$W_z (XF4)$	-0,1889
		$W_z (XF5)$	-0,2588
		$W_z (XF6)$	-0,3458
		$W_z (XF7)$	-0,4497
		$W_z (XF8)$	-0,4872
	čtyři vozy na sklonu	$W_z (XF9)$	-0,5573
		$W_z (XF10)$	-0,5918
		$W_z (XF1)$	-0,0105
		$W_z (XF2)$	-0,0619
$W_z (XF3)$		-0,1158	
$W_z (XF4)$		-0,1889	
$W_z (XF5)$		-0,2588	
$W_z (XF6)$		-0,3503	
$W_z (XF7)$		-0,4107	
$W_z (XF8)$		-0,4872	
$W_z (XF9)$	-0,5573		
$W_z (XF10)$	-0,6443		
$W_z (XF11)$	-0,7482		

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
		$w_z (XF12)$	-0,7857
		$w_z (XF13)$	-0,8557
		$w_z (XF14)$	-0,8903

Směrový oblouk o poloměru 300 m

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
25 m	-	$w_y (XF1)$	0,1551
		$w_y (XF2)$	0,3082
		$w_y (XF3)$	0,7054
30 m	-	$w_y (XF1)$	0,1551
		$w_y (XF2)$	0,3082
		$w_y (XF3)$	0,5274
		$w_y (XF4)$	0,8595
50 m	-	$w_y (XF1)$	0,1551
		$w_y (XF2)$	0,4075
		$w_y (XF3)$	0,9143
		$w_y (XF4)$	1,1668
		$w_y (XF5)$	1,6314
		$w_y (XF6)$	1,9369
		$w_y (XF7)$	2,7720
		$w_y (XF8)$	3,0371

Směrový oblouk o poloměru 500 m

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
75 m	-	$w_y (XF1)$	0,0929
		$w_y (XF2)$	0,2681
		$w_y (XF3)$	0,4524
		$w_y (XF4)$	0,6992
		$w_y (XF5)$	0,9786
		$w_y (XF6)$	1,4631
		$w_y (XF7)$	1,7833
		$w_y (XF8)$	2,1884
		$w_y (XF9)$	2,6521
		$w_y (XF10)$	3,3433
		$w_y (XF11)$	4,1691
		$w_y (XF12)$	4,4670

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

Délka kolejnic	Varianta	Kóta	Deformace (m)
		$w_y (XF13)$	5,1154
		$w_y (XF14)$	5,4808

E Přehled sil působících v podložkách

Pakliže je síle v podložce přiděleno označení R , je v tomto místě nulový průhyb. Jestliže ale má síla v podložce označení F , je v místě jejího působení nenulový průhyb. Jeho hodnotu nalezneme v příloze D. Záporná hodnota síly značí, že působí v opačném smyslu, než v jakém je zakreslena na obr. 3.

Kolejnice délky 25 m

1) Přímá vodorovná kolej

(kN)	VŮZ 1.			VŮZ 2.		
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	137	142	84	84	142	137
60E2	139	144	85	85	144	139

2) Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

(kN)	VŮZ 1.			VŮZ 2.		
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}
49E1	137	145	222	-385	485	122
60E2	139	148	276	-565	620	118

3) Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

(kN)	VŮZ 1.			VŮZ 2.		
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}
49E1	140	86	367	-622	640	115
60E2	143	66	478	-894	835	108

4) Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

(kN)	VŮZ 1.			VŮZ 2.		
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}
49E1	138	139	-54	553	-201	153
60E2	139	139	-106	735	-332	160

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

5) Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

(kN)	VŮZ 1.			VŮZ 2.		
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}
49E1	135	199	-200	790	-357	160
60E2	136	222	-309	1064	-548	170

6) Směrový oblouk o poloměru 300 m

(kN)	VŮZ 1.			VŮZ 2.		
	R_{1y}	R_{2y}	R_{3y}	F_{1y}	F_{2y}	F_{3y}
49E1	10	-221	211	-211	221	-10
60E2	13	-295	282	-282	295	-13

Kolejnice délky 30 m

1) Přímá vodorovná kolej

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}	R_{7z}	R_{8z}
49E1	128	125	50	111	111	50	124	128
60E2	128	125	50	111	111	50	125	128

2) Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	128	125	52	246	-362	436	71	133
60E2	128	125	53	297	-538	579	51	135

3) Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	127	135	-17	392	-604	616	43	136
60E2	127	138	-42	497	-869	826	13	139

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ4) Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	128	125	48	-24	584	-335	179	123
60E2	128	125	48	-74	761	-479	199	121

5) Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	129	115	117	-170	826	-516	207	120
60E2	130	112	142	-274	1092	-726	237	117

6) Směrový oblouk o poloměru 300 m

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.			
	R_{1y}	R_{2y}	R_{3y}	R_{4y}	F_{1y}	F_{2y}	F_{3y}	F_{4y}
49E1	-4	36	-249	217	-217	249	-36	4
60E2	-5	48	-329	286	-286	329	-48	5

Kolejnice délky 50 m1) Přímá vodorovná kolej

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	68	100	115	67	80	150
60E2	67	99	114	66	79	149
(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	R_{11z}	R_{12z}
49E1	150	80	67	115	100	68
60E2	149	79	66	114	99	67

2) Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – jeden vůz na sklonu

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	68	100	115	67	80	150
60E2	67	99	114	66	79	148

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	R_{7z}	R_{8z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	152	192	-312	399	68	83
60E2	150	231	-447	497	56	87

3) Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – dva vozy na sklonu

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	F_{1z}	F_{2z}
49E1	69	98	135	134	-140	298
60E2	69	96	141	156	-219	347
(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}	F_{7z}	F_{8z}
49E1	149	53	92	106	101	68
60E2	147	43	100	101	100	67

4) Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – jeden vůz na sklonu

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	68	100	115	68	78	154
60E2	67	99	113	67	77	154
(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	R_{7z}	R_{8z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	125	283	-498	526	52	90
60E2	115	353	-698	669	34	97

5) Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – dva vozy na sklonu

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	F_{1z}	F_{2z}
49E1	67	103	94	231	-260	362
60E2	66	103	85	288	-380	434
(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}	F_{7z}	F_{8z}
49E1	190	-42	232	-58	343	-100
60E2	201	-85	289	-120	426	-159

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ6) Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – jeden vůz na spádu

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	68	100	115	67	80	151
60E2	67	99	114	66	79	149
(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	R_{7z}	R_{8z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	149	-32	447	-169	132	53
60E2	147	-73	579	-270	142	48

7) Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – dva vozy na spádu

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	F_{1z}	F_{2z}
49E1	67	103	95	1	300	3
60E2	66	102	86	-23	377	-50
(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}	F_{7z}	F_{8z}
49E1	152	107	42	124	100	68
60E2	150	116	32	126	98	68

8) Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – jeden vůz na spádu

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	68	100	115	67	82	146
60E2	67	99	114	66	82	143
(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	R_{7z}	R_{8z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	176	-123	632	-296	148	46
60E2	182	-195	830	-442	164	37

9) Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – dva vozy na spádu

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	F_{1z}	F_{2z}
49E1	69	98	137	-97	420	-61
60E2	69	96	143	-156	538	-137

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}	F_{7z}	F_{8z}
49E1	111	202	-98	288	-142	236
60E2	96	244	-157	347	-228	294

10) Směrový oblouk o poloměru 300 m

(kN)	VŮZ 1.				VŮZ 2.	
	R_{1y}	R_{2y}	R_{3y}	R_{4y}	F_{1y}	F_{2y}
49E1	-11	23	-196	202	-63	82
60E2	-14	30	-254	263	-82	106
(kN)	VŮZ 2.		VŮZ 3.			
	F_{3y}	F_{4y}	F_{5y}	F_{6y}	F_{7y}	F_{8y}
49E1	82	-62	-201	195	-23	11
60E2	105	-81	-262	253	-30	14

Kolejnice délky 75 m

1) Přímá vodorovná kolej

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	125
60E2	95	108	106	94	133	124
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	R_{11z}	R_{12z}
49E1	125	123	98	117	113	159
60E2	124	122	97	115	112	157
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	R_{13z}	R_{14z}	R_{15z}	R_{16z}		
49E1	125	63	80	73		
60E2	124	62	79	72		

2) Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – jeden vůz na sklonu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	125
60E2	95	108	106	94	133	124

SILOVÉ PŮSOBNÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	R_{11z}	R_{12z}
49E1	125	123	98	117	114	158
60E2	124	122	97	115	112	156
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	R_{13z}	R_{14z}	F_{1z}	F_{2z}		
49E1	130	168	-254	297		
60E2	130	204	-372	376		

3) Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – dva vozy na sklonu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	125
60E2	95	108	106	94	133	123
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	F_{1z}	F_{2z}
49E1	126	118	114	172	-32	253
60E2	125	115	119	190	-84	284
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}		
49E1	127	26	109	63		
60E2	125	12	118	59		

4) Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – tři vozy na sklonu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	109	91	148	183
60E2	95	107	108	88	150	202
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}
49E1	-18	229	76	97	128	156
60E2	-70	265	66	89	132	153
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{7z}	F_{8z}	F_{9z}	F_{10z}		
49E1	121	70	75	75		
60E2	119	71	72	75		

SILOVÉ PŮSOBNÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ5) Zlom sklonu z 0 na 10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – čtyři vozy na sklonu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	99	212	-165	331	57	129
60E2	98	246	-262	412	28	129
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{5z}	F_{6z}	F_{7z}	F_{8z}	F_{9z}	F_{10z}
49E1	132	121	99	117	113	159
60E2	133	119	98	115	112	157
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{11z}	F_{12z}	F_{13z}	F_{14z}		
49E1	125	64	78	74		
60E2	123	63	77	73		

6) Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – jeden vůz na sklonu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	125
60E2	95	108	106	94	133	124
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	R_{11z}	R_{12z}
49E1	125	123	98	117	112	161
60E2	124	122	97	116	111	160
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	R_{13z}	R_{14z}	F_{1z}	F_{2z}		
49E1	87	277	-423	398		
60E2	72	351	-601	512		

7) Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – dva vozy na sklonu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	125
60E2	95	108	106	94	133	124
(kN)	VŮZ 3.					
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	F_{1z}	F_{2z}
49E1	125	123	98	228	-109	293
60E2	124	122	97	265	-188	338

SILOVÉ PŮSOBNÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.	
	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}
49E1	188	-92	183	39
60E2	208	-147	219	26

8) Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – tři vozy na sklonu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	234
60E2	95	108	106	94	133	271
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}
49E1	-93	268	101	29	172	147
60E2	-172	317	101	-3	191	141
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{7z}	F_{8z}	F_{9z}	F_{10z}		
49E1	130	59	83	71		
60E2	130	57	83	69		

9) Zlom sklonu z 0 na 15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – čtyři vozy na sklonu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	92	246	-194	294	134	53
60E2	89	293	-302	363	132	26
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{5z}	F_{6z}	F_{7z}	F_{8z}	F_{9z}	F_{10z}
49E1	177	112	102	116	114	159
60E2	194	106	102	114	113	157
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{11z}	F_{12z}	F_{13z}	F_{14z}		
49E1	124	65	78	74		
60E2	122	95	76	73		

SILOVÉ PŮSOBNÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ10) Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – jeden vůz na spádu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	125
60E2	95	108	106	94	133	124
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	R_{11z}	R_{12z}
49E1	125	123	98	117	113	159
60E2	124	122	97	115	112	157
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	R_{13z}	R_{14z}	F_{1z}	F_{2z}		
49E1	121	-41	413	-152		
60E2	118	-79	530	-232		

11) Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – dva vozy na spádu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	96	135	125
60E2	95	108	106	94	133	124
(kN)	VŮZ 3.					
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	F_{1z}	F_{2z}
49E1	124	128	82	61	259	64
60E2	123	128	75	40	308	29
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}		
49E1	124	100	51	83		
60E2	122	112	39	85		

12) Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – tři vozy na spádu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	106	100	122	67
60E2	95	108	104	101	115	45
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}
49E1	269	17	120	136	98	161
60E2	318	-21	127	142	92	160

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.	
	F_{7z}	F_{8z}	F_{9z}	F_{10z}
49E1	129	57	85	70
60E2	129	54	85	69

13) Zlom sklonu z 0 na -10 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – čtyři vozy na spádu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	94	6	379	-140	212	121,23
60E2	92	-31	474	-223	238	118,30
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{5z}	F_{6z}	F_{7z}	F_{8z}	F_{9z}	F_{10z}
49E1	118	125	97	117	113	158
60E2	114	124	96	116	112	157
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{11z}	F_{12z}	F_{13z}	F_{14z}		
49E1	126	62	81	72		
60E2	124	61	81	71		

14) Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – jeden vůz na spádu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	125
60E2	95	108	106	94	133	124
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	R_{11z}	R_{12z}
49E1	125	123	98	116	114	156
60E2	124	122	97	115	113	153
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	R_{13z}	R_{14z}	F_{1z}	F_{2z}		
49E1	163	-150	583	-253		
60E2	175	-226	759	-368		

SILOVÉ PŮSOBNÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ15) Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – dva vozy na spádu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	95	135	125
60E2	95	108	106	94	133	124
(kN)	VŮZ 3.					
	R_{7z}	R_{8z}	R_{9z}	R_{10z}	F_{1z}	F_{2z}
49E1	125	123	98	6	336	24
60E2	124	122	97	-35	412	-25
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}		
49E1	63	218	-24	107		
60E2	39	272	-61	118		

16) Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – tři vozy na spádu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	R_{3z}	R_{4z}	R_{5z}	R_{6z}
49E1	96	109	107	96	134	16
60E2	95	108	106	94	133	-24
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}	F_{5z}	F_{6z}
49E1	344	-21	95	204	55	170
60E2	419	-73	93	234	33	172
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{7z}	F_{8z}	F_{9z}	F_{10z}		
49E1	120	67	76	75		
60E2	117	68	74	74		

17) Zlom sklonu z 0 na -15 ‰ s poloměrem zaoblení 1000 m – čtyři vozy na spádu

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1z}	R_{2z}	F_{1z}	F_{2z}	F_{3z}	F_{4z}
49E1	101	-28	409	-103	135	198
60E2	101	-78	514	-174	134	222
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{5z}	F_{6z}	F_{7z}	F_{8z}	F_{9z}	F_{10z}
49E1	73	135	94	118	113	158
60E2	53	137	91	117	111	156

SILOVÉ PŮSOBENÍ PŘI PŘEPRAVĚ DLOUHÝCH KOLEJNICOVÝCH PÁSŮ

(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.	
	F_{11z}	F_{12z}	F_{13z}	F_{14z}
49E1	126	61	82	72
60E2	125	60	81	71

18) Směrový oblouk o poloměru 500 m

(kN)	VŮZ 1.		VŮZ 2.			
	R_{1y}	R_{2y}	F_{1y}	F_{2y}	F_{3y}	F_{4y}
49E1	-34	31	-51	47	31	-31
60E2	-44	40	-66	61	40	-40
(kN)	VŮZ 3.				VŮZ 4.	
	F_{5y}	F_{6y}	F_{7y}	F_{8y}	F_{9y}	F_{10y}
49E1	-30	30	40	-43	-28	33
60E2	-39	39	52	-56	-36	43
(kN)	VŮZ 4.		VŮZ 5.			
	F_{11y}	F_{12y}	F_{13y}	F_{14y}		
49E1	82	-83	-88	87		
60E2	107	-108	-114	113		