

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
PŘÍLOHA C**

Koncepční studie vozu pro přepravu nákladů vyššími rychlostmi

Výpočtová dokumentace návrhu vypružení

Autor práce: Bc. et Bc. Daniel Drnec

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Heptner

2022

Obsah

Obsah.....	1
1 Návrh svislého vypružení	2
1.1 Maximální rozdíl výšky nárazníků/otočných čepů nad TK.....	2
1.2 Využitelný prostor pro deformaci primárního a sekundárního vypružení.....	2
1.3 Hmotnostní parametry vozu.....	3
1.4 Tuhosti a pracovní deformace primárního vypružení	3
1.5 Tuhosti a pracovní deformace sekundárního vypružení	5
1.6 Vlastní frekvence netlumené soustavy.....	6
1.7 Tlumení.....	7
1.8 Obrys.....	9
2 Bezpečnost proti vykolejení na zborcené koleji	10
2.1 Zkušební zkroucení	10
2.2 Změna kolové síly postavením podvozku na zborcené koleji	10
2.3 Změna kolové síly postavením skříně na zborcené koleji	11
2.4 Výsledná změna kolové síly	12
2.5 ČSN EN 14363 – Metoda 2	12
3 Návrh příčného vypružení.....	14
3.1 Boční silové působení	14
3.2 Příčná tuhost sekundárního vypružení	15
3.3 Příčné tlumení sekundárního vypružení.....	16
3.4 Příčná tuhost primárního vypružení.....	16
3.5 Příčné tlumení primárního vypružení	17

1 Návrh svislého vypružení

Pro návrh svislého vypružení byl použit model ve formě dvouhmotové soustavy.

1.1 Maximální rozdíl výšky nárazníků/otočných čepů nad TK

Minimální výška středů nárazníků byla zvolena 960 mm, protože vůz není vybaven přechodovými můstky (s nimi by byl požadavek 980 mm), ale je připraven pro použití automatického spráhla (jinak by postačovalo 940 mm).

Maximální rozdíl výšky nárazníků/otočných čepů nad temenem kolejnice (TK):

$$\text{Maximální výška středů nárazníků nad TK:} \quad h_{Nmax} = 1\,065 \text{ mm}$$

$$\text{Minimální výška středů nárazníků nad TK:} \quad h_{Nmin} = 960 \text{ mm}$$

$$\Delta h_N = h_{Nmax} - h_{Nmin} \quad (\text{C.1})$$

$$\Delta h_N = 1\,065 - 960$$

$$\Delta h_N = 105 \text{ mm}$$

1.2 Využitelný prostor pro deformaci primárního a sekundárního vypružení

Využitelný prostor pro deformaci:

$$\text{Tolerance montáže nárazníků:} \quad z_{mN} = 15 \text{ mm}$$

$$\text{Tolerance ojetí kol:} \quad z_{oK} = 10 \text{ mm}$$

$$z_u = \Delta h_N - z_{mN} - z_{oK} \quad (\text{C.2})$$

$$z_u = 105 - 15 - 10$$

$$z_u = 80 \text{ mm}$$

1.3 Hmotnostní parametry vozu

Vstupním parametrem pro výpočet hmotnostní bilance byla určená hmotnost prázdného vozu 32 000 kg a zvolené nápravové zatížení 17 t (pro umožnění provozu na vysokorychlostních tratích). Dále byla odhadnuta hmotnost podvozku (7 t) a hmotnost neodpružených hmot podvozku (2,5 t). Údaje o hmotnostech jsou uvedeny v tabulce C1.

Hmotnost prázdného vozu	m_0	32 000 kg
Maximální nápravové zatížení	m_n	17 t
Užitečné zatížení vozu	m_u	36 000 kg
Hmotnost podvozku	m_p	7 000 kg
Hmotnost neodpružených hmot podvozku	m_{pn}	2 500 kg
Hmotnost primárně odpružených hmot podvozku	m_{po1}	4 500 kg
Zatížení primárního vypružení prázdného vozu	m_{pr1}	27 000 kg
Zatížení sekundárního vypružení prázdného vozu	m_{pr2}	18 000 kg
Užitečné zatížení jednoho podvozku	m_{uz}	18 000 kg
Zatížení primárního vypružení loženého vozu	m_1	63 000 kg
Zatížení sekundárního vypružení loženého vozu	m_2	54 000 kg

Tabulka C1: Hmotnostní parametry vozu

1.4 Tuhosti a pracovní deformace primárního vypružení

Jako primární vypružení byly zvoleny odvalovací pružiny (clouth rolling spring, clouth rollfeder) s progresivní charakteristikou, jejíž průběh je dán exponenciálou. Výchozím parametrem byl zvolený prostor pro deformaci primárního vypružení.

Prostor pro deformaci primárního vypružení:

$$\text{Zvolený prostor pro deformaci primárního vypružení: } z_1 = 50 \text{ mm}$$

Tuhost primárního vypružení vozu v prázdném stavu:

$$k_{1min} = m_{pr1} \cdot \frac{g}{z_1} \cdot \ln \frac{m_1 \cdot g}{m_{pr1} \cdot g} \quad (C.3)$$

$$k_{1min} = 27\,000 \cdot \frac{9,81}{0,050} \cdot \ln \frac{63\,000 \cdot 9,81}{27\,000 \cdot 9,81}$$

$$k_{1min} = 4\,488\,476 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tuhost primárního vypružení vozu v loženém stavu:

$$k_{1max} = m_1 \cdot \frac{g}{z_1} \cdot \ln \frac{m_1 \cdot g}{m_{pr1} \cdot g} \quad (C.4)$$

$$k_{1max} = 63\,000 \cdot \frac{9,81}{0,050} \cdot \ln \frac{63\,000 \cdot 9,81}{27\,000 \cdot 9,81}$$

$$k_{1max} = 10\,473\,110 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tuhost jedné pružiny primárního vypružení vozu v prázdném stavu:

Počet pružin primárního vypružení na jednom podvozku: $n_{p1} = 8$

$$k_{p1min} = \frac{k_{1min}}{2 \cdot n_{p1}} \quad (C.5)$$

$$k_{p1min} = \frac{4\,488\,476}{2 \cdot 8}$$

$$k_{p1min} = 280\,530 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tuhost jedné pružiny primárního vypružení vozu v loženém stavu:

$$k_{p1max} = \frac{k_{1max}}{2 \cdot n_{p1}} \quad (C.6)$$

$$k_{p1max} = \frac{10\,473\,110}{2 \cdot 8}$$

$$k_{p1max} = 654\,569 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

1.5 Tuhosti a pracovní deformace sekundárního vypružení

V případě sekundárního vypružení jsou použity pružiny ve formě pryžokovových sloupků s progresivní charakteristikou ve formě exponenciály. Průběh charakteristiky je dán prostorem pro deformaci sekundárního vypružení, který je určen využitelným prostorem pro deformaci obou stupňů vypružení a zvoleným prostorem pro deformaci primárního vypružení.

Prostor pro deformaci sekundárního vypružení:

$$z_2 = z_u - z_1 \quad (C.7)$$

$$z_2 = 80 - 50$$

$$z_2 = 30 \text{ mm}$$

Tuhost sekundárního vypružení vozu v prázdném stavu:

$$k_{2min} = m_{pr2} \cdot \frac{g}{z_2} \cdot \ln \frac{m_2 \cdot g}{m_{pr2} \cdot g} \quad (C.8)$$

$$k_{2min} = 18\,000 \cdot \frac{9,81}{0,030} \cdot \ln \frac{54\,000 \cdot 9,81}{18\,000 \cdot 9,81}$$

$$k_{2min} = 6\,466\,432 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tuhost sekundárního vypružení vozu v loženém stavu:

$$k_{2max} = m_2 \cdot \frac{g}{z_2} \cdot \ln \frac{m_2 \cdot g}{m_{pr2} \cdot g} \quad (C.9)$$

$$k_{2max} = 54\,000 \cdot \frac{9,81}{0,030} \cdot \ln \frac{54\,000 \cdot 9,81}{18\,000 \cdot 9,81}$$

$$k_{2max} = 19\,399\,296 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tuhost jedné pružiny sekundárního vypružení vozu v prázdném stavu:

Počet pružin sekundárního vypružení na jednom podvozku: $n_{p2} = 2$

$$k_{p2min} = \frac{k_{2min}}{2 \cdot n_{p2}} \quad (C.10)$$

$$k_{p2min} = \frac{6\,466\,432}{2 \cdot 2}$$

$$k_{p2min} = 1\,616\,608 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tuhost jedné pružiny sekundárního vypružení vozu v loženém stavu:

$$k_{p2max} = \frac{k_{2max}}{2 \cdot n_{p2}} \quad (C.11)$$

$$k_{p2max} = \frac{19\,399\,296}{2 \cdot 2}$$

$$k_{p2max} = 4\,849\,824 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

1.6 Vlastní frekvence netlumené soustavy

Vlastní frekvence byly počítány pro dvoumotovou bez tlumení soustavu. Vzhledem k tomu, že se jedná o nákladní vůz, byla požadována frekvence v rozmezí 1-3 Hz. Tento požadavek byl splněn.

Souběžné vlastní frekvence prázdného vozu:

$$f_{P1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{A + B - \sqrt{(A + B)^2 - C}} \quad (C.12)$$

$$A = \frac{k_{2min}}{2 \cdot m_{pr2}} = \frac{6\,466\,432}{2 \cdot 18\,000}$$

$$B = \frac{k_{1min} + k_{2min}}{2 \cdot m_{pr1}} = \frac{4\,488\,476 + 6\,466\,432}{2 \cdot 27\,000}$$

$$C = \frac{k_{1min} \cdot k_{2min}}{m_{pr1} \cdot m_{pr2}} = \frac{4\,488\,476 \cdot 6\,466\,432}{27\,000 \cdot 18\,000}$$

$$f_{P1} = 1,50 \text{ Hz}$$

Protiběžné vlastní frekvence prázdného vozu:

$$f_{P2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{A + B + \sqrt{(A + B)^2 - C}} \quad (C.13)$$

$$A = \frac{k_{2min}}{2 \cdot m_{pr2}} = \frac{6\,466\,432}{2 \cdot 18\,000}$$

$$B = \frac{k_{1min} + k_{2min}}{2 \cdot m_{pr1}} = \frac{4\,488\,476 + 6\,466\,432}{2 \cdot 27\,000}$$

$$C = \frac{k_{1min} \cdot k_{2min}}{m_{pr1} \cdot m_{pr2}} = \frac{4\,488\,476 \cdot 6\,466\,432}{27\,000 \cdot 18\,000}$$

$$f_{P2} = 4,14 \text{ Hz}$$

Souběžné vlastní frekvence loženého vozu:

$$f_{L1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{A + B - \sqrt{(A + B)^2 - C}} \quad (\text{C.14})$$

$$A = \frac{k_{2max}}{2 \cdot m_2} = \frac{19\,399\,296}{2 \cdot 54\,000}$$

$$B = \frac{k_{1max} + k_{2max}}{2 \cdot m_1} = \frac{10\,473\,110 + 19\,399\,296}{2 \cdot 63\,000}$$

$$C = \frac{k_{1max} \cdot k_{2max}}{m_1 \cdot m_2} = \frac{10\,473\,110 \cdot 19\,399\,296}{63\,000 \cdot 54\,000}$$

$$f_{L1} = 1,42 \text{ Hz}$$

Protiběžné vlastní frekvence loženého vozu:

$$f_{L2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{A + B + \sqrt{(A + B)^2 - C}} \quad (\text{C.15})$$

$$A = \frac{k_{2max}}{2 \cdot m_2} = \frac{19\,399\,296}{2 \cdot 54\,000}$$

$$B = \frac{k_{1max} + k_{2max}}{2 \cdot m_1} = \frac{10\,473\,110 + 19\,399\,296}{2 \cdot 63\,000}$$

$$C = \frac{k_{1max} \cdot k_{2max}}{m_1 \cdot m_2} = \frac{10\,473\,110 \cdot 19\,399\,296}{63\,000 \cdot 54\,000}$$

$$f_{L2} = 4,37 \text{ Hz}$$

1.7 Tlumení

Modelový vůz má primární i sekundární vypružení s progresivní charakteristikou a oba stupně jsou tlumené. Optimální volba tlumení jednotlivých stupňů vypružení je v takovémto případě komplikovaná, proto bylo přistoupeno k aproximaci modelu na soustavu s jedním stupněm vypružení s lineární charakteristikou, pro kterou bylo poté spočítáno vhodné tlumení. Následně bylo vypočítáno, jaké tlumení by musely mít dva sériově zapojené tlumiče, aby měly stejný účinek, a tyto hodnoty byly použity pro celkové tlumení v primárním a sekundárním stupni vypružení.

Celková linearizovaná tuhost vypružení:

$$k_{clin} = \frac{m_u \cdot g}{z_u} \quad (C.16)$$

$$k_{clin} = \frac{36\,000 \cdot 9,81}{0,080}$$

$$k_{clin} = 4\,414\,500 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Celkové tlumení při linearizované tuhosti:

$$b_c = 0,25 \cdot 2 \cdot \sqrt{k_{clin} \cdot m_2} \quad (C.17)$$

$$b_c = 0,25 \cdot 2 \cdot \sqrt{4\,414\,500 \cdot 54\,000}$$

$$b_c = 244\,122 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určené tlumení primárního vypružení:

$$b_1 = \frac{b_c}{2} \quad (C.18)$$

$$b_1 = \frac{244\,122}{2}$$

$$b_1 = 122\,061 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určené tlumení sekundárního vypružení:

$$b_2 = \frac{b_c}{2} \quad (C.19)$$

$$b_2 = \frac{244\,122}{2}$$

$$b_2 = 122\,061 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určené tlumení jedné pružiny primárního vypružení:

$$b_{p1} = \frac{b_1}{2 \cdot n_{p1}} \quad (C.20)$$

$$b_{p1} = \frac{122\,061}{2 \cdot 8}$$

$$b_{p1} = 7\,629 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určené tlumení jedné pružiny sekundárního vypružení:

$$b_{p2} = \frac{b_2}{2 \cdot n_{p2}} \quad (C.21)$$

$$b_{p2} = \frac{122\,061}{2 \cdot 2}$$

$$b_{p2} = 30\,515 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

1.8 Obrys

Pro potřeby výpočtu obrysu je potřeba spočítat maximální možné stlačení pružin. Celkový rozsah deformace (až na narážku) byl spočítán jako součet prostoru pro deformaci daného stupně vypružení a nárůstu deformace při 1,3násobku hmotnosti maximálně loženého vozu.

Stlačení primárního vypružení na narážku:

$$p_{zx} = z_1 + z_1 \cdot \frac{\ln \frac{m_1 \cdot 1,3}{m_1}}{\ln \frac{m_1}{m_{pr1}}} \quad (C.22)$$

$$p_{zx} = 0,050 + 0,050 \cdot \frac{\ln \frac{63\,000 \cdot 1,3}{63\,000}}{\ln \frac{63\,000}{27\,000}}$$

$$p_{zx} = 65,48 \text{ mm}$$

Stlačení sekundárního vypružení na narážku – varianta B:

$$s_{zx} = z_2 + z_2 \cdot \frac{\ln \frac{m_2 \cdot 1,3}{m_2}}{\ln \frac{m_2}{m_{pr2}}} \quad (C.23)$$

$$s_{zx} = 0,030 + 0,030 \cdot \frac{\ln \frac{54\,000 \cdot 1,3}{54\,000}}{\ln \frac{54\,000}{18\,000}}$$

$$s_{zx} = 37,16 \text{ mm}$$

Na základě hodnot p_{zx} a s_{zx} byly zvoleny hodnoty $p_z = 67 \text{ mm}$ a $s_z = 39 \text{ mm}$.

2 Bezpečnost proti vykolejení na zborcené koleji

Kontrola bezpečnosti proti vykolejení byla provedena podle metody 2 dle ČSN EN 14363+A1.

2.1 Zkušební zkroucení

Vzorce pro výpočet zkušebního zkroucení se volí podle rozvoru podvozku (v případě zkroucení podvozku (C.24)) a podle vzdálenosti otočných čepů (v případě zkroucení skříně vozidla (C.25)).

Zkušební zkroucení podvozku:

$$\text{rozvor podvozku: } 2a^+ = 2,5 \text{ m} \quad \rightarrow \quad 2a^+ < 4 \text{ m}$$

$$g_{lim}^+ = 7 - \frac{5}{2a^+} \quad (C.24)$$

$$g_{lim}^+ = 7 - \frac{5}{2,5}$$

$$g_{lim}^+ = 5,00 \text{ ‰}$$

Zkušební zkroucení skříně:

$$\text{vzdálenost otočných čepů: } 2a = 18,4 \text{ m} \quad \rightarrow \quad 4 \text{ m} \leq 2a \leq 20 \text{ m}$$

$$g_{lim}^* = \frac{15}{2a} + 2,0 \quad (C.25)$$

$$g_{lim}^* = \frac{15}{18,4} + 2,0$$

$$g_{lim}^* = 2,82 \text{ ‰}$$

2.2 Změna kolové síly postavením podvozku na zborcené koleji

Úhlová tuhost vypružení dvojkolí:

$$\text{příčná vzdálenost středů pružin primárního vypružení: } 2w_1 = 2,0 \text{ m}$$

$$k_{tDv} = 2 \cdot k_{k1min} \cdot \left(\frac{2w_1}{2}\right)^2 = 4 \cdot k_{p1min} \cdot \left(\frac{2w_1}{2}\right)^2 \quad (C.26)$$

$$k_{tDv} = 4 \cdot 280\,530 \cdot \left(\frac{2}{2}\right)^2$$

$$k_{tDv} = 1\,122\,119 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Úhlová tuhost podvozku:

úhlová tuhost rámu podvozku: $k_{tSP} \rightarrow \infty$

$$k_{tCP} = \lim_{k_{tSP} \rightarrow \infty} \frac{k_{tDv} \cdot k_{tSP}}{k_{tDv} + 2 \cdot k_{tSP}} = \frac{k_{tDv}}{2} \quad (C.27)$$

$$k_{tCP} = \frac{1\,122\,119}{2}$$

$$k_{tCP} = 561\,059 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Změna kolové síly postavením podvozku na zborčené koleji:

$$a_p = 2a^+ = 2,5 \text{ m}$$

$$\alpha_{ZP} = g_{lim}^+ = 5,00 \text{ ‰}$$

vzdálenost styčných kružnic: $2s = 1,5 \text{ m}$

$$\Delta Q_P = \frac{a_p}{(2s)^2} \cdot k_{tCP} \cdot \frac{\alpha_{ZP}}{1\,000} \quad (C.28)$$

$$\Delta Q_P = \frac{2,5}{1,5^2} \cdot 561\,059 \cdot \frac{5}{1\,000}$$

$$\Delta Q_P = 3\,117,00 \text{ N}$$

2.3 Změna kolové síly postavením skříně na zborčené koleji

Tuhost rámu podvozku vůči koleji:

$$k_{t1} = 2 \cdot k_{tDv} \quad (C.29)$$

$$k_{t1} = 2 \cdot 1\,122\,119$$

$$k_{t1} = 2\,244\,238 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Tuhost sekundárního vypružení skříně vůči rámu podvozku:

příčná vzdálenost středů pružin sekundárního vypružení: $2w_2 = 1,5 \text{ m}$

$$k_{t2} = 2 \cdot k_{p2min} \cdot \left(\frac{2w_2}{2}\right)^2 \quad (C.30)$$

$$k_{t2} = 2 \cdot 1\,616\,608 \cdot \left(\frac{1,5}{2}\right)^2$$

$$k_{t2} = 1\,818\,684 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Výsledná torzní poddajnost modelu podvozkového vozidla:

úhlová tuhost skříně vozu: $k_{tS} \rightarrow \infty$

$$k_{tCV} = \lim_{k_{tS} \rightarrow \infty} \frac{k_{t1} \cdot k_{t2} \cdot k_{tS}}{2 \cdot k_{t2} \cdot k_{tS} + 2 \cdot k_{t1} \cdot k_{tS} + k_{t1} \cdot k_{t2}} \quad (C.31)$$

$$k_{tCV} = \frac{k_{t1} \cdot k_{t2}}{2 \cdot k_{t2} + 2 \cdot k_{t1}}$$

$$k_{tCV} = \frac{2\,244\,238 \cdot 1\,818\,684}{2 \cdot 1\,818\,684 + 2 \cdot 2\,244\,238}$$

$$k_{tCV} = 502\,294 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$$

Změna kolové síly postavením skříně na zborcené koleji:

$$a_s = 2a = 18,4 \text{ m}$$

$$\alpha_{zS} = g_{lim}^* = 2,82 \text{ ‰}$$

$$\Delta Q_S = \frac{1}{2} \cdot \frac{a_s}{(2s)^2} \cdot k_{tCV} \cdot \frac{\alpha_{zS}}{1\,000} \quad (C.32)$$

$$\Delta Q_S = \frac{1}{2} \cdot \frac{18,4}{1,5^2} \cdot 502\,294 \cdot \frac{2,82}{1\,000}$$

$$\Delta Q_S = 5\,781,96 \text{ N}$$

2.4 Výsledná změna kolové síly

Výsledná změna kolové síly:

$$\Delta Q = \Delta Q_S + \Delta Q_P \quad (C.33)$$

$$\Delta Q = 5\,781,96 + 3\,117,00$$

$$\Delta Q = 8\,898,95 \text{ N}$$

2.5 ČSN EN 14363 – Metoda 2

V případě metody 2 se posuzuje riziko vyšplhání okolku poměrem vodorovné vodící síly Y a svislé kolové síly Q. Zkouška se provádí na zkrucovacím zkušebním stavu a nepřevýšené zkušební koleji, v tomto projektu byla zkouška provedena pouze výpočetně, proto byla nejvyšší považovaná hodnota poměru Y/Q snížena o 10 % z hodnoty 1,2 na 1,08.

Tíha působící na jedno kolo prázdného vozu:

$$Q_0 = \frac{m_0 \cdot g}{8} \quad (\text{C.34})$$

$$Q_0 = \frac{32\,000 \cdot 9,81}{8}$$

$$Q_0 = 39\,240,00 \text{ N}$$

Řídící síla P dle Heumannovy metody:

poloměr směrového oblouku: $r = 150 \text{ m}$

součinitel tření kolo kolejnice: $\mu = 0,40$

iterovaná vzdálenost středu tření: $x = 2,788 \text{ m}$

$$P = \frac{2 \cdot Q_0 \cdot \mu \cdot \left(\sqrt{x^2 + s^2} + \sqrt{(x - a_p)^2 + s^2} \right)}{x} \quad (\text{C.35})$$

$$P = \frac{2 \cdot 39\,240,00 \cdot 0,40 \cdot \left(\sqrt{2,788^2 + 0,75^2} + \sqrt{(2,788 - 2,5)^2 + 0,75^2} \right)}{2,788}$$

$$P = 41\,554,00 \text{ N}$$

Vodorovná vodící síla Y :

$$Y = P - Q_0 \cdot \mu \quad (\text{C.36})$$

$$Y = 41\,554,00 - 39\,240,00 \cdot 0,40$$

$$Y = 25\,858,00 \text{ N}$$

Poměr Y/Q_{\min} :

$$\frac{Y}{Q_{\min}} = \frac{Y}{Q_0 - \Delta Q} \quad (\text{C.37})$$

$$\frac{Y}{Q_{\min}} = \frac{25\,858,00}{39\,240,00 - 8\,898,95}$$

$$\frac{Y}{Q_{\min}} = 0,852$$

Poměr Y/Q_{\min} je menší než požadovaná hodnota 1,08; navrhované vypružení tedy vyhovuje požadavkům bezpečnosti proti vykolejení podle metody 2 dle ČSN EN 14363.

3 Návrh příčného vypružení

Řešení příčného vypružení je uvažováno příčnou poddajností pryžokovových pružin svislého vypružení. Pro zjednodušení bylo modelováno s lineární charakteristikou a odděleně pro primární a sekundární vypružení. Pro výpočet tlumení byla z působící síly vypočítána ekvivalentní hmotnost, která by vyvolala stejné silové působení ve svislém směru v tíhovém poli Země.

3.1 Boční silové působení

Uvažováno je silové působení vlivem nevyrovnaného příčného zrychlení, jehož hodnota byla stanovena s ohledem na požadavek na vysokou rychlost vozu na 1 m/s^2 . Pro dynamické účinky a vliv bočního větru byla uvažována rezerva 20 % dostupné příčné vůle mezi podvozkem a skříní vozu (v případě loženého vozu).

Boční síla působící vlivem nevyrovnaného příčného zrychlení na sekundární vypružení loženého vozu:

$$\text{Nevyrovnané příčné zrychlení: } a_y = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$F_{2yp} = a_y \cdot m_2 \tag{C.38}$$

$$F_{2yp} = 1 \cdot 54\,000$$

$$F_{2yp} = 54\,000 \text{ N}$$

Ekvivalentní hmotnost při příčném zrychlení g působící v příčném směru na sekundární vypružení:

$$m_{2e} = \frac{F_{2yp}}{g} \tag{C.39}$$

$$m_{2e} = \frac{54\,000}{9,81}$$

$$m_{2e} = 5\,505 \text{ kg}$$

Boční síla působící vlivem nevyrovnaného příčného zrychlení na primární vypružení loženého vozu:

$$\text{Nevyrovnané příčné zrychlení: } a_y = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$F_{1yp} = a_y \cdot m_1 \quad (\text{C.40})$$

$$F_{1yp} = 1 \cdot 63\,000$$

$$F_{1yp} = 63\,000 \text{ N}$$

Ekvivalentní hmotnost při příčném zrychlení g působící v příčném směru na primární vypružení:

$$m_{1e} = \frac{F_{2yp}}{g} \quad (\text{C.41})$$

$$m_{1e} = \frac{63\,000}{9,81}$$

$$m_{1e} = 6\,422 \text{ kg}$$

3.2 Příčná tuhost sekundárního vypružení

Příčná tuhost sekundárního vypružení:

$$\text{Příčná vůle mezi podvozkem a skříní vozu: } w = 55 \text{ mm}$$

$$\text{Rezerva příčné vůle pro dynamiku a vliv bočního větru: } w_{rez} = 20 \%$$

$$k_{2p} = \frac{F_{2yp}}{w \cdot \frac{100 - w_{rez}}{100}} \quad (\text{C.42})$$

$$k_{2p} = \frac{54\,000}{55 \cdot \frac{100 - 20}{100}}$$

$$k_{2p} = 1\,227\,273 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určené tlumení jedné pružiny primárního vypružení:

$$k_{p2p} = \frac{k_{2p}}{2 \cdot n_{p2}} \quad (\text{C.43})$$

$$k_{p2p} = \frac{1\,227\,273}{2 \cdot 2}$$

$$k_{p2p} = 306\,818 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

3.3 Příčné tlumení sekundárního vypružení

Příčné tlumení sekundárního vypružení:

$$b_{2p} = 0,25 \cdot 2 \cdot \sqrt{k_{2p} \cdot m_{2e}} \quad (\text{C.44})$$

$$b_{2p} = 0,25 \cdot 2 \cdot \sqrt{1\,227\,273 \cdot 5\,505}$$

$$b_{2p} = 41\,096 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

Příčné tlumení jedné pružiny primárního vypružení:

$$b_{p2p} = \frac{b_{2p}}{2 \cdot n_{p2}} \quad (\text{C.45})$$

$$b_{p2p} = \frac{41\,096}{2 \cdot 2}$$

$$b_{p2p} = 10\,274 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

3.4 Příčná tuhost primárního vypružení

Příčná tuhost primárního vypružení byla na základě konzultací s Ing. Tomášem Heptnerem zvolena 8 000 000 N/m na jednu pružinu.

Určené příčná tuhost jedné pružiny primárního vypružení $k_{p1p} = 8\,000\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

Příčná tuhost primárního vypružení vozu:

$$k_{1p} = k_{p1p} \cdot (2 \cdot n_{p1}) \quad (\text{C.46})$$

$$k_{1p} = 8\,000\,000 \cdot (2 \cdot 8)$$

$$k_{2p} = 128\,000\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

3.5 Příčné tlumení primárního vypružení

Příčné tlumení primárního vypružení:

$$b_{1p} = 0,25 \cdot 2 \cdot \sqrt{k_{1p} \cdot m_{1e}} \quad (\text{C.47})$$

$$b_{1p} = 0,25 \cdot 2 \cdot \sqrt{128\,000\,000 \cdot 6\,422}$$

$$b_{1p} = 453\,326 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

Příčné tlumení jedné pružiny primárního vypružení:

$$b_{p1p} = \frac{b_{1p}}{2 \cdot n_{p1}} \quad (\text{C.48})$$

$$b_{p1p} = \frac{453\,326}{2 \cdot 8}$$

$$b_{p1p} = 28\,333 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$