



VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Strana č.1 viz vzor



VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Zadání DP



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana doc. Ing. Břetislava Mynáře, CSc. a s použitím uvedené literatury.

Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Břetislavu Mynářovi, CSc., asistentu Ing. Přemyslu Pokornému a také konzultantovi ve firmě Královopolská, a.s. panu Ing. Přikrylovi. Dále chci poděkovat své matce a svým přátelům Lucii Báborské, Slávce Teličákové a manželům Mohaplovým za podporu při studiu na vysoké škole.



ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá posouzením ocelové konstrukce pojízdného mostového jeřábu o rozpětí 28 metrů, nosnosti 18 tun s výškou zdvihu 6,5 metrů. Jeřáb bude umístěn v hale. Řešení daného zadání obsahuje výpočet zatížení a posouzení konstrukce jeřábu při únavě dle ČSN 27 0103 a EN 13001 a následným srovnáním výpočtů podle obou norem.

ANNOTATION

This diploma thesis deals with examination of a steel construction of an overhead travelling crane with a span of 28 metres, lifting capacity of 18 tons and maximum lifting height of 6,5 metres. The crane will be installed in a hall. Solution of this project contains calculation of load and examination of the crane construction with fatigue under the Czech standard ČSN 27 0103 and the European standard EN 13001 and comparison of calculations under both of the technical standards.

VESELÝ, V. Mostový jeřáb 18 t x 28 m. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Břetislav Mynář, CSc.

Obsah

	Seznam použitých symbolů.....	7
1	Úvod.....	10
2	Vstupní údaje.....	10
2.1	Druh jeřábu a jeho základní parametry.....	10
2.2	Schéma jeřábu a popis nosné ocelové konstrukce.....	12
2.3	Provozní zařazení a součinitelé zatížení.....	13
2.3.1	Provozní zařazení a součinitelé zatížení dle ČSN 27 0103.....	13
2.3.2	Provozní zařazení a součinitelé zatížení dle ČSN EN 13001.....	14
2.4	Navrhované materiály.....	16
2.5	Návrhové (výpočtové) hodnoty mechanických vlastností.....	16
2.5.1	Návrhové hodnoty mechanických vlastností dle ČSN 27 0103.....	16
2.5.2	Návrhové hodnoty mechanických vlastností dle ČSN EN 13001.....	17
3	Charakteristická zatížení.....	17
3.1	Přehled hmotností jednotlivých částí jeřábu.....	17
3.2	Charakteristická zatížení stálá.....	18
3.3	Charakteristická zatížení nahodilá.....	20
4	Návrhová zatížení.....	22
4.1	Návrhová zatížení dle ČSN 27 0103.....	22
4.1.1	Zatížení stálá.....	22
4.1.2	Zatížení nahodilá.....	22
4.1.2.1	Zatížení od svislých setrvačných sil.....	22
4.1.2.2	Zatížení od horizontálních setrvačných sil.....	23
4.1.2.3	Přehled tlaků kol kočky – kočka s břemenem.....	27
4.1.2.4	Přehled tlaků kol kočky – kočka bez břemene.....	28
4.1.3	Kombinace zatížení při únavě.....	29
4.2	Návrhová zatížení dle ČSN EN 13001	30
4.2.1	Zatížení pravidelná od hmotnosti jeřábu.....	30
4.2.2	Zatížení pravidelná od hmotnosti břemene a hmotnosti kočky.....	30
4.2.2.1	Zatížení od svislých setrvačných sil.....	30
4.2.3	Zatížení pravidelná od zrychlení pohonů.....	31
4.2.4	Přehled účinků kol kočky – kočka s břemenem.....	33
4.2.5	Přehled účinků kol kočky – kočka bez břemene.....	34
4.2.6	Kombinace zatížení při únavě.....	36
5	Model ocelové konstrukce jeřábu.....	36
5.1	Fyzikální model.....	36
5.2	Geometrický model.....	37

6	Přehled výsledných vnitřních sil.....	37
6.1	Přehled výsledných vnitřních sil dle zatížení podle ČSN 27 0103.....	37
6.2	Přehled výsledných vnitřních sil dle zatížení podle ČSN EN 13001.....	37
7	Posouzení ocelové konstrukce při únavě – hlavní nosník.....	38
7.1	Schéma průřezu a průřezové charakteristiky.....	38
7.2	Posouzení dle ČSN 27 0103.....	38
7.3	Posouzení dle ČSN EN 13001.....	42
8	Závěr.....	45
9	Literatura.....	45
10	Seznam příloh.....	46

Seznam použitých symbolů

a	délka strany tělesa u výpočtu hm. momentu setrvačnosti	[mm]
A	plocha průřezu	[mm ²]
a_k	rozchod kol kočky	[mm]
b	délka strany tělesa u výpočtu hm. momentu setrvačnosti	[mm]
b_k	rozvor kol kočky	[mm]
b_s	šířka průřezu sochoru	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[N.mm ⁻²]
$F_{\check{c}}$	charakteristická síla působící od hmotnosti uložení táhel	[N]
$F_{\check{c}}^{UN}$	návrhová síla působící od hmotnosti uložení táhel	[N]
$F_{ix}^{A,B}$	síla od působení kol kočky ve směru x; indexy označují působišťe	[kN]
$F_{iy}^{A,B}$	síla od působení kol kočky ve směru y; indexy označují působišťe	[kN]
$F_{iz}^{A,B}$	síla od působení kol kočky ve směru z; indexy označují působišťe	[kN]
f_{Rd}	návrhová hodnota napětí únosnosti (dle EN)	[N.mm ⁻²]
f_u	mez pevnosti materiálu (dle EN)	[N.mm ⁻²]
f_y	mez kluzu materiálu (dle EN)	[N.mm ⁻²]
g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
G	modul pružnosti ve smyku	[N.mm ⁻²]
H_k	poloha těžiště kočky	[mm]
H_Q	poloha těžiště závěsu	[mm]
h_s	výška průřezu sochoru	[mm]
i	poměr mezi poháněnou a celkovou hmotou jeřábu	[-]
I_y	moment setrvačnosti průřezu k ose y	[mm ⁴]
I_z	moment setrvačnosti průřezu k ose z	[mm ⁴]
I_{ω}	hmotnostní moment setrvačnosti	[t.m ²]
I_{ok}	hmotnostní moment setrvačnosti kočky	[t.m ²]
I_{ot}	hmotnostní moment setrvačnosti traverzy	[t.m ²]
I_{om}	hmotnostní moment setrvačnosti magnetů	[t.m ²]
I_{ob}	hmotnostní moment setrvačnosti břemene	[t.m ²]
L	rozpětí jeřábu	[mm]
l_A	délka nosníku A	[m]
l_B	délka nosníku B	[m]
l_p	délka příčnicku	[m]
l_s	vzdálenost těžiště tělesa od osy otáčení	[m]
l_T	celková délka táhel	[m]
m	hmotnost tělesa u výpočtu hm. momentu setrvačnosti	[t]
m_A	hmotnost nosníku A	[kg]

m_B	hmotnost nosníku B	[kg]
m_{dpt}	hmotnost dráhy příčné troleje	[kg]
m_{el}	hmotnost elektra na plošině	[kg]
m_H	hmotnost zdvihaného břemene (dle EN)	[kg]
Δm_H	hmotnost uvolněné části břemene (dle EN)	[kg]
m_i	hmotnost přemísťovaného břemene	[kg]
m_j	hmotnost jeřábu	[kg]
m_k	hmotnost kočky	[kg]
m_{kab}	hmotnost kabeláže a elektrorozvodů	[kg]
m_{mg}	hmotnost magnetů	[kg]
m_{mot}	hmotnost pojezdu jeřábu včetně motorů	[kg]
m_n	hmotnost hlavních nosníků	[kg]
m_p	hmotnost příčníků	[kg]
m_{pel}	hmotnost plošiny elektro	[kg]
m_{pr}	hmotnost pojezdového rámu	[kg]
m_t	hmotnost táhel	[kg]
m_{ij}	hmotnost příčné troleje	[kg]
m_{tr}	hmotnost traverzy	[kg]
m_{ut}	hmotnost uložení táhel včetně čepů	[kg]
m_z	nosnost zdvihu	[t]
M_y	moment ve směru osy y vyvozený účinkem zatížení	[kN.m]
M_z	moment ve směru osy z vyvozený účinkem zatížení	[kN.m]
M_ω	kroutící moment	[kN.m]
n	otáčky kočky	[min ⁻¹]
n_s	počet sochorů	[ks]
n_{ut}	počet uložení táhel	[ks]
Q	hmotnost břemene	[kg]
q_A	spojité zatížení vyvozené vlastní hmotností nosníku A	[kN.m ⁻¹]
q_B	spojité zatížení vyvozené vlastní hmotností nosníku B	[kN.m ⁻¹]
q_p	spojité zatížení vyvozené vlastní hmotností příčníků	[kN.m ⁻¹]
q_A	spojité zatížení vyvozené vlastní hmotností táhel	[kN.m ⁻¹]
R_d	výpočtová pevnost materiálu (dle ČSN)	[MPa]
$R_{fat(-1)}$	základní výpočtová pevnost materiálu v únavě (dle ČSN)	[MPa]
$R_{fat(\kappa)}$	výpočtová pevnost materiálu v únavě pro dané κ (dle ČSN)	[MPa]
R_m	mez pevnosti materiálu v tahu (dle ČSN)	[MPa]
R_{xfat}	výpočtová pevnost materiálu v tahu odpovídající σ_x (dle ČSN)	[MPa]
R_{yfat}	výpočtová pevnost materiálu v tahu odpovídající σ_y (dle ČSN)	[MPa]
s	rozvor jeřábu	[mm]
$s_{(m)}$	parametr průběhu napětí (dle EN)	[-]

T	frekvence otáčení	[s]
v_h	rychlost zdvihu	[m.s ⁻²]
v_{hk}	rychlost pojezdu kočky	[m.s ⁻²]
v_t	rychlost pojezdu jeřábu	[m.s ⁻²]
V_z	vertikální síla ve směru osy z vyvozená účinkem zatížení	[kN]
y^{PL}	y-ová vzdálenost levého okraje pásnice od těžiště průřezu	[mm]
y^{PP}	y-ová vzdálenost pravého okraje pásnice od těžiště průřezu	[mm]
z^{DP}	z-ová vzdálenost dolního okraje spodní pásnice od těžiště průřezu	[mm]
z^{HP}	z-ová vzdálenost horního okraje horní pásnice od těžiště průřezu	[mm]
β_2	výraz používaný při výpočtu Φ_2 (dle EN)	[-]
β_3	výraz používaný při výpočtu Φ_3 (dle EN)	[-]
γ_g	součinitel zatížení (dle ČSN)	[-]
γ_{Mf}	dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti (dle EN)	[-]
γ_p	součinitel bezpečnosti (dle EN)	[-]
δ	výraz používaný při výpočtu Φ_1 (dle EN)	[-]
δ_h	dynamický zdvihový součinitel (dle ČSN)	[-]
δ_t	dynamický pojezdový součinitel (dle ČSN)	[-]
ε	úhlové zrychlení	[-]
μ	součinitel tření	[-]
μ_G	Poissonova konstanta	[-]
ρ	měrná hmotnost materiálu	[kg.m ⁻³]
ρ_s	měrná hmotnost sochorů	[kg.m ⁻³]
Φ_1	dynamický součinitel zdvihání a hmotnostní (dle EN)	[-]
Φ_2	dynamický součinitel pro účinky setrvačnosti (dle EN)	[-]
Φ_{2min}	výraz používaný při výpočtu Φ_2 (dle EN)	[-]
Φ_3	dynamický součinitel pro tíhy při uvolnění části břemene (dle EN)	[-]
Φ_4	dynamický součinitel pro pojezd po nerovném povrchu (dle EN)	[-]
Φ_5	dynamický součinitel pro akceleraci pohonu jeřábu (dle EN)	[-]
τ	smykové napětí	[MPa]
τ_{fat}	výpočtová pevnost materiálu ve smyku (dle ČSN)	[MPa]
$\Delta\sigma_c$	charakteristická hodnota rozkmitu napětí (dle EN)	[MPa]
$\Delta\sigma_{Rd}$	dovolený rozkmit napětí (dle EN)	[MPa]
σ_{min}	minimální hodnota návrhového napětí (dle EN)	[MPa]
σ_{max}	maximální hodnota návrhového napětí (dle EN)	[MPa]
$R_{fat(-1)}$	základní výpočtová pevnost materiálu v únavě (dle ČSN)	[MPa]

1 Úvod

Předmětem této diplomové práce je výpočet zatížení a posouzení ocelové konstrukce jeřábu podle ČSN a EN a srovnání postupů těchto dvou výpočtů. V současné době není situace (co se týká norem pro posuzování) zcela přehledná, neboť z nové normy ČSN EN 13001, která je harmonizována s Evropskou normou, není ještě v platnosti její 3. část (ČSN P CEN/TS 13001-3-1 Jeřáby – Návrh všeobecně – Část 3-1: Mezní stavy prokázání způsobilosti ocelových konstrukcí). Nicméně výpočty byly provedeny v případě prvním dle ČSN 27 0103/89 Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů a ČSN 73 1401/84 Navrhování ocelových konstrukcí, v případě druhém dle ČSN EN 13001-2 Jeřáby – Návrh všeobecně – Část 2: Účinky zatížení a již zmiňované předběžné ČSN EN 13001-3-1 Jeřáby – Návrh všeobecně – Část 3-1: Mezní stavy prokázání způsobilosti ocelových konstrukcí. Bylo zvoleno posouzení, které je nejčastěji rozhodující, a to posouzení pevnosti při únavě. Na vybraném prvku ocelové konstrukce jeřábu je dokumentován postup výpočtu tak, aby byly zřejmé rozdíly obou postupů.

2 Vstupní údaje

2.1 Druh jeřábu a jeho základní parametry

Předmětem statického výpočtu je nosná ocelová konstrukce mostového jeřábu. Mostový jeřáb o jmenovité nosnosti zdvihu 18 tun a rozpětí 28m je určen pro převážení horkých sochorů ve vnitřním skladovém prostoru v provozu válcovny ISPAT NOVÁ HUŤ Ostrava. Kočka jeřábu má otočný rám, na kterém je zavěšena traverza s magnety. Traverza je zavěšena na lanovém prostorovém závěsu, který stabilizuje boční výkyvy traverzy. Jeřáb pojíždí po ocelové jeřábové dráze s kontinuálně uloženou kolejnicí. Dráha je uložena na ocelových sloupech s výškovou úrovní hlavy kolejnice +10m nad hutní úrovní. Jeřáb pracuje ve vnitřním prostředí s okolní teplotou -5 až +40 °C. Teplota odebíraných sochorů je do cca 300 °C. Teplota na povrchu spodních pasů hlavních nosníků nepřesahuje +60 °C. Současně může být odebíráno až 12 ks sochorů o rozměrech 115 x 115 x 12 000 mm. Na traverzu jeřábu lze na krajní závěsy zavěšovat alternativně nové magnety fy GANTRY případně stávající magnety fy STEINERT. Na středové závěsy je možné zavěsit vanu s okujemi.

ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ ÚDAJE - jeřáb

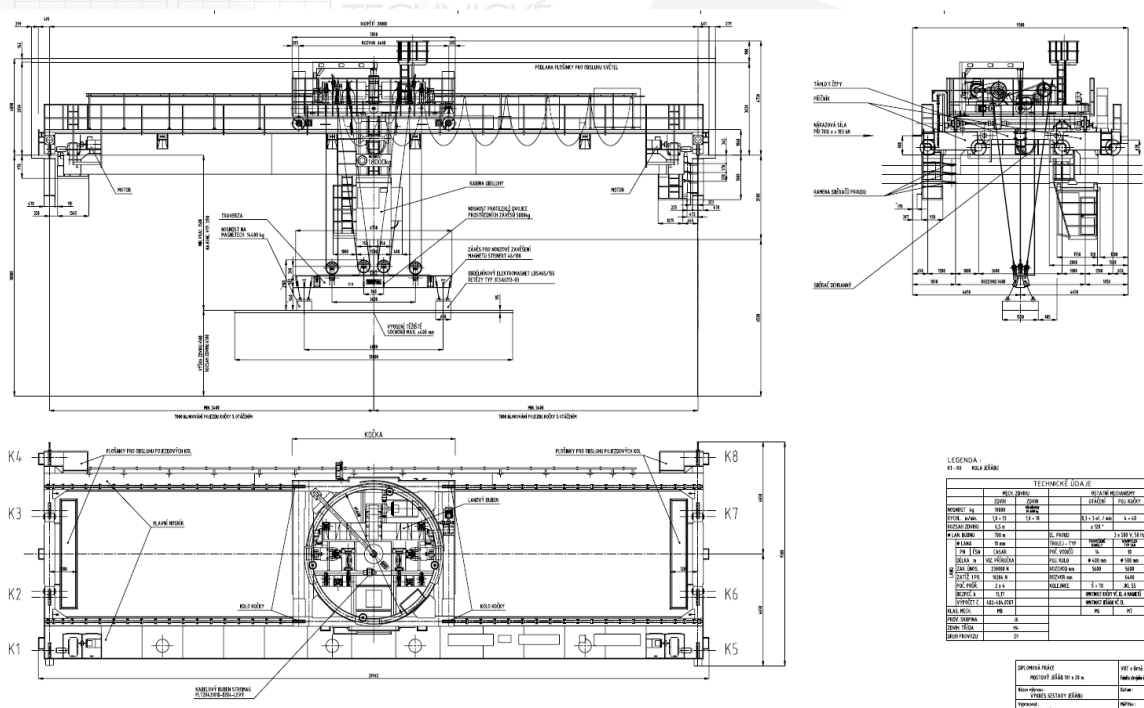
Nosnost zdvihu	$m_z = 18 \text{ t}$
Rozpětí	$L = 28\,000 \text{ mm}$
Rozvor	$s = 8\,000 \text{ mm}$
Počet hnacích/všech kol	2/8 ks
Rychlost pojezdu	$v_t = 0\text{--}120 \text{ m/min}$
Rychlost hlavního zdvihu (při hmotnosti břemene 18 t)	$v_h = 0\text{--}13 \text{ m/min}$
Rychlost hlavního zdvihu (při hmotnosti břemene 8 t)	$v_{hQ} = 0\text{--}18 \text{ m/min}$
Kolejnice	KB 100
Ovládání	Kabina na kočce

ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ ÚDAJE - kočka

Rozchod	$a_k = 5\,600 \text{ mm}$
Rozvor	$b_k = 6\,480 \text{ mm}$
Počet hnacích/všech kol	2/4 ks
Rychlost pojezdu	0-40 m/min
Kolejnice	JKL 55

PŘEMISŤOVANÉ BŘEMENO – sochory

Počet sochorů	$n_s = 12 \text{ ks}$
Výška, šířka průřezu	$h_s = b_s = 0,115 \text{ m}$
Délka	$l_s = 12 \text{ m}$
Měrná hmotnost	$\rho_s = 7\,850 \text{ kg.m}^{-3}$



Obr. 1: Schéma jeřábu

Nosná ocelová konstrukce mostu je tvořena horizontálním rámem tvořeným dvěma hlavními nosníky s krátkými příčníky, které jsou mezi sebou propojeny kloubovými táhly.

V rovině horizontálního rámu působí toto propojení jako tuhé (zajišťuje přenos momentu), ve svislé rovině je propojení kloubové (zajišťuje staticky určité rozdělení tlaků kol jeřábu na jeřábovou dráhu). Jak hlavní nosníky tak příčníky s táhly jsou uzavřeného truhlíkového průřezu svařeného z plechů a vyztuženy systémem tuhých příčných a podélných výztuh.

Hlavní nosníky jsou připojeny k příčnickům svarovými spoji. Kolejnice kočky JKL 55 je bezstyková, uložená kontinuálně na pružné podložce na pásnici nad vnitřní stojinou hlavních nosníků a je upevněna k pásnici nosníku pomocí bočně stavitelných šroubovaných příchytetek GANTRY s navulkanizovanými pružnými upevňovacími prvky. Tupé svary pásnic a stojin jsou provedeny s plně provařeným kořenem a defektoskopicky kontrolované. Podél hlavního nosníku na straně elektrovýzbroje jsou ke stěně nosníku v úrovni horního pasu přivařeny konzoly plošiny s elektrovýzbrojí. Na krajích u příčníků jsou na stěně téhož nosníku nad spodním pasem připevněny pojezdové rámy pro pohon pojezdu jeřábu. U nosníku na straně příčné troleje jsou pak přivařeny konzoly, na kterých jsou přišroubovány sloupky dráhy příčné troleje, na kraji u větve jeřábové dráhy s hlavní trolejí je zavěšen na konzolách koš pro obsluhu troleje. Na obou stranách jsou na vnitřní straně spojovacího táhla zavěšeny obslužné plošinky pro přístup k pojezdovým kolům. Pojezdová kola jsou uložena v příčnicích

v rohových ložiskách. Poháněna jsou vnější kola, a to přes ležaté převodovky se spojkami a brzdou pomocí měničově řízených elektromotorů. Na koncích příčniců jsou přišroubovány pružné nárazníky

- na straně sjetí se sousedním jeřábem nárazník WAMPFLER typu GUMIPUFFER
- na straně koncových nárazníků JD nárazník BIBUS typu CB 63-300

Kabina jeřábníka je umístěna přímo na otočném rámu kočky na závěsu z vnitřní strany mostu jeřábu.

2.3 Provozní zařazení a součinitelé zatížení

2.3.1 Provozní zařazení a součinitelé zatížení dle ČSN 27 0103

Provozní zařazení určuje ČSN 27 0103 příloha II. Pro daný typ jeřábu je stanoveno následující:

Zdvihová třída	H4
Druh provozu	D1 (zařízení proti přetížení)
Spektrum napětí	S3
Provozní skupina	J6

Dynamické namáhání konstrukce zohledníme ve výpočtu zdvihovým a pojezdovým součinitelem. Jejich hodnoty stanovuje norma ČSN 27 0103 takto:

Dynamický zdvihový součinitel pro zdvihovou třídu H4 (v_h – rychlost zdvihu v m.s^{-1}):

$$\delta_h = 1,4 + 0,52 \cdot v_h \quad (2.1)$$

$$\delta_h = 1,4 + 0,52 \cdot 0,217$$

$$\delta_h = 1,513$$

Dynamický pojezdový součinitel je určen tab. 4 normy ČSN 270103:

$$\delta_t = 1,2 \text{ (Platí pro stykovanou kolejnici jeřábové dráhy a rychlost pojezdu } v_h = 2 \text{ m.s}^{-1}\text{)}$$

2.3.2 Provozní zařazení a součinitelé zatížení dle ČSN EN 13001

Jeřáb je nutno zařadit dle ČSN CEN/TS 13001-3-1, přílohy B do příslušné S třídy. Podle této klasifikace se jedná o dílenský jeřáb s traverzou v nepřetržitém provozu s možností zařazení do třídy S6-S8. Ve výpočtu bude uvažováno s ohledem na těžké provozní podmínky s kategorií S8. Rovněž zařazení do zdvihové třídy není příslušnou normou (ČSN EN 13001-2) striktně stanoveno, norma rozděluje zdvihové třídy na HC1–HC4. Ve výpočtu bude uvažováno s třídou HC4. Co se týká pohonu zdvihu (určuje ČSN EN 13001-2), je jeřáb zařazen do skupiny HD1 (není možné zdvihání pomocí mikrozdvihu).

Shrnuto:

S třída	S8
Zdvihová třída	HC4
Typ pohonu zdvihu	HD1

Dynamické namáhání konstrukce je zohledněno několika součiniteli (dle ČSN EN 13001-2) :

a) Gravitační účinky působící na hmotnost jeřábu (dle normy se hodnota δ pohybuje v rozmezí $0 \leq \delta \leq 0,1$ a závisí na konstrukci jeřábu, není přesně stanovena, je však třeba ji určit, $\delta = 0,1$):

$$\Phi_1 = 1 + \delta \quad (2.2)$$

$$\Phi_1 = 1 + 0,1$$

$$\Phi_1 = 1,1$$

b) Setrvačné a gravitační účinky působící svisle na hmotnost břemene:

$$\Phi_2 = \Phi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h, \quad (2.3)$$

kde součinitele $\Phi_{2,\min}$ a β_2 stanoví norma v závislosti na zdvihové třídě, v případě třídy HC4

$\beta_2 = 0,68$ a $\Phi_{2,\min} = 1,2$. Tedy:

$$\Phi_2 = 1,2 + 0,6 \cdot 0,217$$

$$\Phi_2 = 1,347$$

c) Náhlé uvolnění zdvihaného břemene:

Chyba! Objekty nemohou být vytvořeny úpravami kódů polí.,

(2.4)

kde Δm_H je uvolněná část břemene, m_H je hmotnost zdvihaného břemene, součinitel β_3 závisí na typu uvolňování břemene, v tomto případě:

$\beta_3 = 1,0$ (jeřáb s magnetem)

Je nutné posoudit dva případy uvolnění břemene:

ca) V případě výpadku proudu se stanoví Φ_3 následovně:

$$m_H = m_{tr} + m_{mg} + m_i, \quad (2.5)$$

kde m_{tr} je hmotnost traverzy ($m_{tr} = 1\,750\text{ kg}$), m_{mg} hmotnost magnetů ($m_{mg} = 3\,600\text{ kg}$) a m_i hmotnost přemísťovaného břemene, tedy

$$m_i = n_s \cdot l_s \cdot b_s \cdot h_s \cdot \rho_s \quad (2.6)$$

(12 sochorů), výsledné m_H je potom:

$$m_H = m_{tr} + m_{mg} + n_s \cdot l_s \cdot b_s \cdot h_s \cdot \rho_s \quad (2.7)$$

$$m_H = 1\,750 + 3\,600 + 12 \cdot 12 \cdot 0,115 \cdot 0,115 \cdot 7\,850$$

$$m_H = 20\,299,54\text{ kg}$$

$$\Delta m_H = m_i = n_s \cdot l_s \cdot b_s \cdot h_s \cdot \rho_s \quad (2.8)$$

$$\Delta m_H = 12 \cdot 12 \cdot 0,115 \cdot 0,115 \cdot 7\,850$$

$$\Delta m_H = 14\,949,54\text{ kg}$$

$$\Phi_3 = 1 - \frac{14\,949,54}{20\,299,54} (1 + 1)$$

$$\Phi_3 = -0,47$$

cb) V případě odpadnutí sochoru se stanoví Φ_3 následovně:

$$m_H = 20\,299,54\text{ kg}$$

$$\Delta m_H = l_s \cdot b_s \cdot h_s \cdot \rho_s \quad (2.9)$$

(hmotnost 1 ks sochoru)

$$\Delta m_H = 12 \cdot 0,115 \cdot 0,115 \cdot 7\,850$$

$$\Delta m_H = 1\,245,80\text{ kg}$$

$$\Phi_3 = 1 - \frac{1\,245,80}{20\,299,54} (1 + 1)$$

$$\Phi_3 = -0,88$$

d) Pojezd po nerovném povrchu:

Za předpokladu, že jsou dodrženy tolerance pro geometrii ustavení kolejnice jeřábové dráhy dle požadavků norem je uvažováno:

$$\Phi_4 = 1,0$$

e) Zatížení způsobená zrychlením pohonů pojezdu jeřábu:

Dle typu pohonu určíme dle normy součinitele Φ_5 , v tomto případě $\Phi_5 = 1,5$ (pohony bez brzdění protiproudem a bez náhlých změn sil – měničově řízený pohon pojezdu jeřábu)

2.4 Navrhované materiály

Nosná ocelová konstrukce rámu mostu je navržena z jemnozrnné houževnaté oceli pevnostní tř. 37 se zaručenou svařitelností a vrubovou houževnatostí při 0 °C.

Základní materiál

Plech	S 235 JO, příp. S 235 J2G3 nosníky, příčníky, táhla	typ 3.1 B
	S 355 J2 G3 uložení čepů táhel	typ 3.1 B
Čepy táhel	12 061.6 zušlechtěno na pevnost $R_y = 700-750 \text{ N/mm}^2$	typ 3.1 B
Profily	S 355 J2G3 vnější podélná výztuha pod kolejnicí	typ 3.1 B
	S 235 JRG2 vnitřní podélné výztuhy	typ 3.1 B
Kolejnice JKL 55	10 750.0	typ 2.2
Podružné části OK jsou navrženy z oceli jakosti S 235 JR		typ 2.1
Spojovací materiál		typ 2.1

2.5 Návrhové (výpočtové) hodnoty mechanických vlastností

2.5.1 Výpočtové hodnoty mechanických vlastností ČSN 27 1401/84

Výpočtové hodnoty mechanických vlastností materiálu určuje norma ČSN 27 1401/84 v závislosti na pevnostní řadě a tloušťce daného materiálu. Jsou zde uvedeny hodnoty materiálu rozhodujících pro posouzení hlavních nosníků jeřábu (R_d – výpočtová pevnost pro namáhání tahem i tlakem).

Plech	$R_d = 210 \text{ MPa}$	pevnostní třída 37 (pro tl. do 25 mm)
	$R_d = 290 \text{ MPa}$	pevnostní třída 52 (pro tl. do 25 mm)

2.5.2 Návrhové hodnoty mechanických vlastností ČSN EN 13001

Návrhové (dle terminologie ČSN 27 1401/84 výpočtové) hodnoty mechanických vlastností materiálu určuje norma ČSN P CEN/TS 13001-3-1 v závislosti na pevnostní třídě a tloušťce daného materiálu. Opět jsou uvedeny hodnoty rozhodující pro posouzení hlavních nosníků jeřábu (f_u – jmenovitá hodnota meze pevnosti, f_y – jmenovitá hodnota meze kluzu, f_{Rd} – návrhová únosnost normálová).

Plech	$f_u = 340 \text{ N/mm}^2$	S 235
	$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, $f_{Rd} = 214 \text{ N/mm}^2$	S 235 (pro tl. do 16 mm včetně)
	$f_y = 225 \text{ N/mm}^2$, $f_{Rd} = 205 \text{ N/mm}^2$	S 235 (pro tl. od 16 do 40 mm včetně)
	$f_u = 490 \text{ N/mm}^2$	S 355
	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$, $f_{Rd} = 323 \text{ N/mm}^2$	S 355 (pro tl. do 16 mm)
	$f_y = 345 \text{ N/mm}^2$, $f_{Rd} = 314 \text{ N/mm}^2$	S 235 (pro tl. od 16 do 40 mm včetně)

3 Charakteristická zatížení

3.1 Přehled hmotností jednotlivých částí jeřábu

V tabulce jsou uvedeny hmotnosti jednotlivých částí jeřábu.

Ocelová konstrukce mostu

Hlavní nosníky

$m_n = 35\,000 \text{ kg}$

Příčníky

$m_p = 4\,400 \text{ kg}$

Táhla

$m_t = 600 \text{ kg}$

Uložení táhel vč. čepů

$m_{ut} = 1\,000 \text{ kg}$

Pojezdové rámy

$m_{pr} = 800 \text{ kg}$

Plošina elektro

$m_{pel} = 2\,800 \text{ kg}$

Dráha příčné troleje

$m_{dpt} = 400 \text{ kg}$

Vybavení

Elektro na plošině

$m_{el} = 2\,000 \text{ kg}$

Kabeláž a rozvody

$m_{kab} = 3\,000 \text{ kg}$

Příčná trolej

$m_{tj} = 500 \text{ kg}$

Pojezd jeřábu vč. motorů

$m_{mot} = 4\,500 \text{ kg}$

Ostatní

Kočka
Traverza
Magnety

$$m_k = 24\,650 \text{ kg}$$
$$m_{tr} = 1\,750 \text{ kg}$$
$$m_{mg} = 3\,600 \text{ kg}$$

Jeřáb celkem

$$m_j = 85\,000 \text{ kg}$$

3.2 Zatížení stálá

Do stálého zatížení je uvažováno zatížení od vlastní hmotnosti ocelové konstrukce mostu včetně pevně zabudovaných částí.

a) Spojitá zatížení

Pro zjednodušení je započítána do hmotnosti nosníků i hmotnost plošin, pojezdových rámců a elektro s polovinou kabeláže na jedné straně (nosník A) a hmotnost dráhy příčné troleje a příčné troleje s polovinou kabeláže na druhé straně (nosník B).

Jednotlivé velikosti spojitých zatížení pro ocelovou konstrukci jeřábu jsou určeny ze vztahů:

$$q_e = \frac{m_e \cdot g}{l_e}, \quad (3.1)$$

kde q_e je velikost spojitého zatížení pro jednotlivý prvek, m_e je hmotnost jednotlivého prvku a l_e jeho délka. Hodnota veličin tedy bude pro jednotlivé prvky:

$$m_A = 0,5m_n + m_{pel} + m_{el} + m_{pr} + 0,5m_{kab} \quad (m_A, l_A - \text{hmotnost, délka nosníku A}) \quad (3.2)$$

$$m_A = 0,5 \cdot 35\,000 + 2\,800 + 2\,000 + 800 + 0,5 \cdot 3\,000$$

$$m_A = 24\,600 \text{ kg}$$

$$l_A = 28 \text{ m}$$

$$m_B = 0,5m_n + m_{dpt} + m_{pt} + 0,5m_{kab} \quad (m_B, l_B - \text{hmotnost, délka nosníku B}) \quad (3.3)$$

$$m_B = 0,5 \cdot 35\,000 + 400 + 500 + 0,5 \cdot 3\,000$$

$$m_B = 19\,900 \text{ kg}$$

$$l_B = 28 \text{ m}$$

$$m_p = 4\,400 \text{ kg} \quad (m_p, l_p - \text{hmotnost, délka příčniců})$$

$$l_p = 10 \text{ m}$$

$$m_t = 600 \text{ kg} \quad (m_t, l_t - \text{hmotnost, délka táhel})$$

$$l_t = 6 \text{ m}$$

Velikosti spojitých zatížení:

Nosník A:

$$q_A = \frac{24600 \cdot 9,81}{28}$$

$$q_A = 8\,618,79 \text{ N.m}^{-1}$$

Nosník B:

$$q_B = \frac{19900 \cdot 9,81}{28}$$

$$q_B = 6\,972,11 \text{ N.m}^{-1}$$

Příčnický:

$$q_P = \frac{4400 \cdot 9,81}{10}$$

$$q_P = 4\,316,4 \text{ N.m}^{-1}$$

Táhla:

$$q_t = \frac{600 \cdot 9,81}{6}$$

$$q_t = 981 \text{ N.m}^{-1}$$

Pro přehled jsou všechna spojitá zatížení uvedena v tab. 1 v kNm^{-1}

Tab. 1: Spojitá zatížení od vlastní hmotnosti

Nosník A	Nosník B	Příčník	Táhlo
8,62	6,97	4,32	0,98

b) Osamělé síly

Jako osamělé síly je uvažováno zatížení od uložení táhel včetně čepů působící v ose čepů táhel. Velikost síly působící na jeden čep určuje vztah:

$$F_{\xi} = \frac{m_{ut}}{n_{ut}} \cdot g, \quad (3.4)$$

kde n_{ut} je počet uložení táhel ($n_{ut} = 4 \text{ ks}$) a g je gravitační zrychlení ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$), tedy:

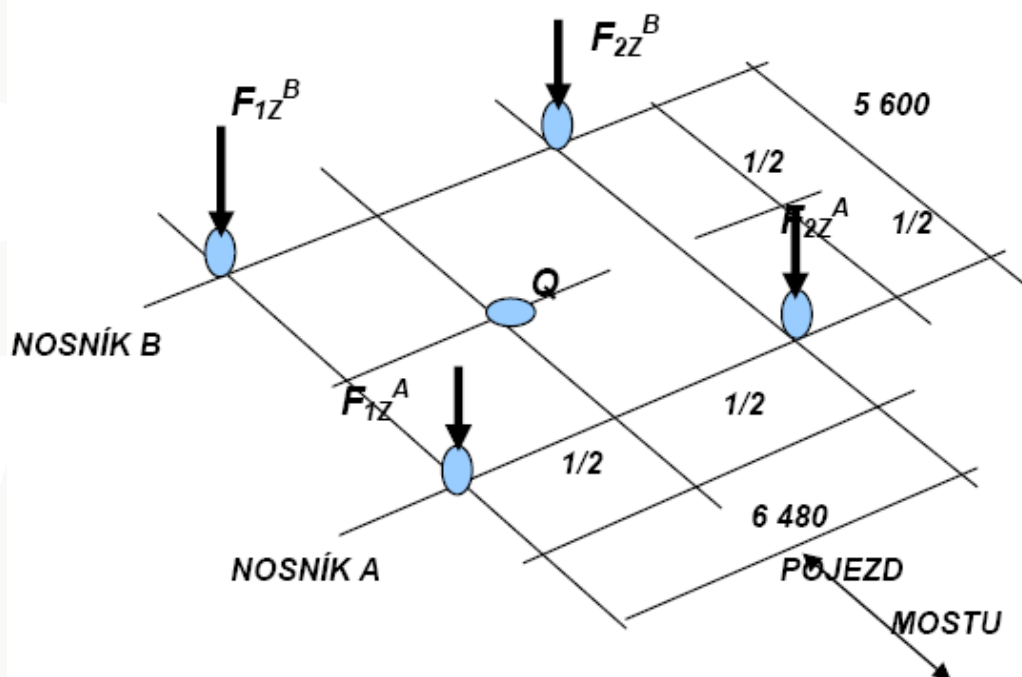
$$F_{\xi} = \frac{1000}{4} \cdot 9,81$$

$$F_{\xi} = 2\,452,5 \text{ N}$$

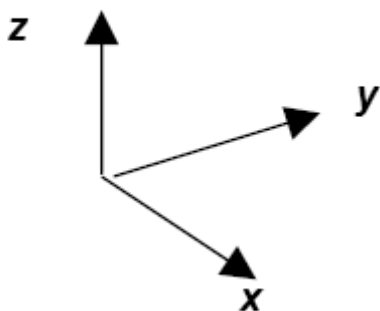
Zatížení od pojezdů jeřábu bylo pro zjednodušení vypuštěno vzhledem k zanedbatelným účinkům na nosnou konstrukci jeřábu.

3.3 Zatížení nahodilá

Jako zatížení nahodilé je uvažováno zatížení od vlastní hmotnosti kočky, traverzy, magnetů a břemene. Vzhledem k symetrii rámu kočky i zdvihu jsou tato zatížení rozdělena rovnoměrně na jednotlivá kola kočky. Jednotlivé síly představující účinky tlaku kol kočky jsou označeny dle směru a umístění F_{1z}^A , F_{2z}^A , F_{1z}^B , F_{2z}^B (viz obr.2 a obr.3).



Obr. 2: Účinky tlaku kol kočky



Obr. 3: Souřadný systém

Hmotnost břemene Q je již vypočítána v kapitole 2.3.2 jako Δm_H , tedy :

$$Q = \Delta m_H = 14\,949,54 \text{ kg}$$

Velikost tlaku jednotlivých kol kočky od jednotlivých prvků stanovuje vztah (pro tento typ zatížení):

$$F_{iz}^{A,B} = 0,25 \cdot m_e \cdot g \quad (3.5)$$

kde m_e je hmotnost jednotlivého prvku. Přehled výsledných účinků dle tohoto vztahu uvádí tab. 2, hodnoty jsou uvedeny v kN.

Tab.2: Tlaky kol kočky v kN

Zatížení	F_{1z}^A	F_{2z}^A	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Kočka	60,45	60,45	60,45	60,45
Traverza	4,29	4,29	4,29	4,29
Magnety	8,83	8,83	8,83	8,83
Břemeno (Q)	36,66	36,66	36,66	36,66
Součet bez Q	73,57	73,57	73,57	73,57
Součet s Q	110,23	110,23	110,23	110,23

4 Návrhová zatížení

Vzhledem k provoznímu zařazení jeřábu je pro posouzení nosné ocelové konstrukce jeřábu rozhodující zatížení při únavě. Další výpočty je tudíž zaměřeny na tento typ namáhání konstrukce.

4.1 Návrhová zatížení dle ČSN 27 0103

Konstrukce na únavu se posuzují dle ČSN 27 0103 podle kombinací zatížení 53C, uvedené v tabulce 11 této normy. Tabulka je sestavena z účinků zatížení stálých a nahodilých, vyskytujících se při převážném počtu pracovních cyklů posuzovaných částí jeřábu.

4.1.1 Zatížení stálá

Norma ČSN 27 0103 uvažuje pro zatížení od vlastní hmotnosti se součinitelem zatížení γ_g . V případě posuzování konstrukce na únavu se uvažuje s hodnotou součinitele $\gamma_g = 1,0$. Dynamické namáhání konstrukce zohledníme u zatížení vyvozená vlastní hmotností vynásobením dynamického součinitele δ_t . Tab. 3 uvádí spojitá zatížení přenásobená tímto součinitelem.

Tab.3: Spojitá zatížení se započítáním dynamických účinků v kN/m

Nosník A	Nosník B	Příčník	Táhlo
10,34	8,36	5,18	1,18

Dynamický účinek se projeví i u zatížení osamělými silami:

$$F_{\xi}^{UN} = \delta_t \cdot F_{\xi} \quad (4.1)$$

$$F_{\xi}^{UN} = 1,2 \cdot 2\,452,5$$

$$F_{\xi}^{UN} = 2\,943 \text{ kN}$$

4.1.2 Zatížení nahodilá

4.1.2.1 Zatížení od svislých setrvačných sil

a) Zatížení od svislých setrvačných sil vznikajících při zvedání nebo spouštění břemene

Toto zatížení počítá s účinkem dynamických sil vznikajících zvedáním nebo spouštěním břemene. Do výpočtu se tento účinek zahrne tak, že zatížení od celkového břemena (konkrétně traverza, magnety a přemísťované břemeno) se násobí dynamickým zdvihovým součinitelem δ_h (určeným v kapitole 2.3.1).

b) Zatížení od svislých setrvačných sil vznikajících při pojíždění

Toto zatížení počítá s účinkem dynamických sil vznikajících pojížděním jeřábu nebo některé jeho části. Do výpočtu se tento účinek zahrne tak, že zatížení od vlastní hmotnosti pojezdové části (konkrétně kočka) se násobí dynamickým zdvihovým součinitelem δ_t (určeným v kapitole 2.3.1). Hodnoty svislých setrvačných sil (v kN) tedy dostaneme vynásobením účinků zatížení uvedených v tab. 2 příslušným součinitelem (viz tab. 3).

Tab. 4: Svislé setrvačné síly

Zatížení	Součinitel zatížení	F_{1z}^A	F_{2z}^A	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Kočka	$\delta_t = 1,2$	72,54	72,54	72,54	72,54
Traverza	$\delta_h = 1,513$	6,49	6,49	6,49	6,49
Magnety	$\delta_h = 1,513$	13,36	13,36	13,36	13,36
Břemeno (Q)	$\delta_h = 1,513$	53,44	53,44	53,44	53,44
Součet bez Q		92,39	92,39	92,39	92,39
Součet s Q		145,83	145,83	145,83	145,83

4.1.2.2 Zatížení od horizontálních setrvačných sil

Tento typ zatížení zohledňuje účinky sil vznikající při zrychlování nebo zpomalování pohybů (pojíždění, otáčení).

a) Horizontální setrvačné síly od rozjezdu mostu

Tyto účinky se stanoví jako součin adhezní síly hnacích (brzděných) kol a součinitele tření.

Jsou stanoveny vztahem:

$$F_{ix}^{A,B} = \mu \cdot i \cdot F_{iz}^{A,B}, \quad (4.2)$$

kde μ představuje součinitel tření, který je definován ČSN 27 0103 hodnotou $\mu = 0,14$.

Součinitel i představuje poměr mezi poháněnou a celkovou hmotou jeřábu. Vzhledem ke skutečnosti, že poháněná jsou 2 kola jeřábu z 8, je uvažováno s hodnotou součinitele $i = 0,25$.

Veličina $F_{iz}^{A,B}$ představuje charakteristické hodnoty tlaky kol kočky. Tab.4 uvádí hodnoty horizontálních setrvačných sil (v kN) od rozjezdu mostu.

Tab. 5: Horizontální setrvačné síly od rozjezdu mostu

Zatížení	F_{1x}^A	F_{2x}^A	F_{1x}^B	F_{2x}^B
Kočka	2,12	2,12	2,12	2,12
Traverza	0,15	0,15	0,15	0,15
Magnety	0,31	0,31	0,31	0,31
Břemeno (Q)	1,28	1,28	1,28	1,28
Součet bez Q	2,58	2,58	2,58	2,58
Součet s Q	3,86	3,86	3,86	3,86

Vzhledem k tomu, že horizontální setrvačné síly od rozjezdu mostu nepůsobí na ocelovou konstrukci mostu v rovině mostu, je nutné uvažovat se svislými přítlaky od horizontálních setrvačných sil. Ty definují vztahy:

$$F_{1z}^{A,B} = \sum F_{1x}^{A,B} \cdot (H_K, H_Q) / a_k \quad (4.3)$$

$$F_{2z}^{A,B} = \sum F_{2x}^{A,B} \cdot (H_K, H_Q) / a_k \quad (4.4)$$

kde H_K je poloha těžiště rámu kočky ($H_K = 1\,200\text{ mm}$), H_Q je poloha těžiště závěsu břemene ($H_Q = 1\,600\text{ mm}$), a_k je rozchod kočky a $F_{1x}^{A,B}$, $F_{2x}^{A,B}$ příslušné horizontální síly.

Tab.6 uvádí hodnoty svislých přítlaků od horizontálních setrvačných sil (v kN) od rozjezdu mostu.

Tab. 6: Svislé přítlaky od horizontálních setrvačných sil od rozjezdu mostu

Zatížení	F_{1z}^A	F_{2z}^A	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Kočka	0,91	0,91	0,91	0,91
Traverza	0,09	0,09	0,09	0,09
Magnety	0,18	0,18	0,18	0,18
Břemeno (Q)	0,73	0,73	0,73	0,73
Součet bez Q	1,18	1,18	1,18	1,18
Součet s Q	1,91	1,91	1,91	1,91

b) Horizontální setrvačné síly od rozjezdu kočky

Tyto účinky se stanoví jako součin adhezní síly hnacích (brzděných) kol a součinitele tření.

Jsou stanoveny vztahem (za předpokladu, že na kočce jsou poháněna kola č.2):

$$F_{2y}^{A,B} = \mu \cdot F_{2z}^{A,B}, \quad (4.5)$$

kde μ představuje součinitel tření, který je definován ČSN 27 0103 hodnotou $\mu = 0,14$.

Veličina $F_{2z}^{A,B}$ představuje charakteristické hodnoty tlaku poháněných kol kočky. Tab.7 uvádí hodnoty horizontálních setrvačných sil (v kN) od rozjezdu kočky.

Tab. 7: Horizontální setrvačné síly od rozjezdu kočky

Zatížení	F_{1y}^A	F_{2y}^A	F_{1y}^B	F_{2y}^B
Kočka	-	8,46	-	8,46
Traverza	-	0,60	-	0,60
Magnety	-	1,24	-	1,24
Břemeno (Q)	-	4,95	-	4,95
Součet bez Q	-	10,30	-	10,30
Součet s Q	-	15,25	-	15,25

Také horizontální setrvačné síly od rozjezdu kočky nepůsobí na ocelovou konstrukci mostu v rovině mostu, také zde je nutné uvažovat se svislými přítlaky od horizontálních setrvačných sil. Ty definují vztahy:

$$F_{iz}^A = F_{2y}^A \cdot (H_K, H_Q) / b_k \quad (4.6)$$

$$F_{iz}^B = F_{2y}^B \cdot (H_K, H_Q) / b_k, \quad (4.7)$$

kde H_K je poloha těžiště rámu kočky ($H_K = 1\,200\text{ mm}$), H_Q je poloha těžiště závěsu břemene ($H_Q = 1\,600\text{ mm}$), b_k je rozvor kočky a F_{2y}^A , F_{2y}^B příslušné horizontální síly.

Tab.8 uvádí hodnoty svislých přítlaků od horizontálních setrvačných sil (v kN) od rozjezdu kočky.

Tab. 8: Svislé přítlaky od horizontálních setrvačných sil od rozjezdu kočky

Zatížení	F_{1z}^A	F_{2z}^A	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Kočka	1,57	1,57	1,57	1,57
Traverza	0,15	0,15	0,15	0,15
Magnety	0,31	0,31	0,31	0,31
Břemeno (Q)	1,22	1,22	1,22	1,22
Součet bez Q	2,03	2,03	2,03	2,03
Součet s Q	3,25	3,25	3,25	3,25

c) Horizontální setrvačné síly od otáčení kočky

Setrvačné síly od rozjezdu otáčení kočky a excentricity břemene se přenášejí do horizontálních reakcí mezi koly kočky a kolejnicí jeřábu. Jejich velikost závisí na velikosti kroutícího momentu, který vyvozuje otáčející se kočka. Velikost kroutícího momentu je určena vztahem:

$$M_\omega = I_\omega \cdot \varepsilon, \quad (4.8)$$

kde I_ω je celkový hmotnostní moment setrvačnosti a ε úhlové zrychlení. Úhlové zrychlení určuje vztah

$$\varepsilon = (2\pi \cdot n) / T, \quad (4.9)$$

kde n – rychlost otáčení ($n = 3$ otáčky za minutu) a T – periodu, frekvenci otáčení, $T = 3s$.

$$\varepsilon = \frac{2\pi \cdot 3/60}{3}$$

$$\varepsilon = 0,105 \text{ rad.s}^{-2}$$

Pro určení jednotlivých hmotnostních momentů setrvačnosti je třeba vyjít ze vzorce pro hmotnostní moment setrvačnosti otáčejícího se kvádrového tělesa o stranách a, b (tyto strany tvoří rovinu kolmou na osu otáčení):

$$I_\omega = \frac{1}{12} m \cdot (a^2 + b^2) + m \cdot l_c^2 \quad (4.10)$$

kde m je hmotnost tělesa, l_c – vzdálenost těžiště tělesa od osy otáčení.

Jednotlivé hmotnostní momenty setrvačnosti tedy jsou:

$$\text{Kočka: } I_{\omega k} = \frac{1}{12} \cdot 24,65 \cdot (6,48^2 + 5,6^2)$$

$$I_{\omega k} = 150,67 \text{ t.m}^2$$

Traverza: $I_{\omega t} = \frac{1}{12} \cdot 1,75 \cdot (6,75^2 + 0,3^2) \quad (\text{délka } a = 6,75 \text{ m, šířka } b = 0,3 \text{ m})$

$$I_{\omega t} = 6,65 \text{ t.m}^2$$

Magnety: $I_{\omega m} = 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot 1,8 \cdot (1,55^2 + 0,65^2) + 1,8 \cdot 3^2 \right] \quad (a = 1,55 \text{ m, } b = 0,65 \text{ m})$

$$I_{\omega m} = 33,25 \text{ t.m}^2$$

Břemeno: $I_{\omega b} = \frac{1}{12} \cdot 14,95 \cdot (12^2 + 1,38^2) \quad [a = 12 \text{ m, } b = 1,38 \text{ m (12 sochorů po 0,155 m)}]$

$$I_{\omega b} = 181,77 \text{ t.m}^2$$

Celkový hmotnostní moment setrvačnosti s břemenem (součet momentů setrvačnosti kočky, traverzy, magnetů a břemene):

$$I_{\omega} = I_{\omega k} + I_{\omega t} + I_{\omega m} + I_{\omega b} \quad (4.11)$$

$$I_{\omega} = 150,67 + 6,65 + 33,25 + 181,77$$

$$I_{\omega} = 372,34 \text{ t.m}^2$$

Celkový hmotnostní moment setrvačnosti bez břemene (součet momentů setrvačnosti kočky, traverzy a magnetů):

$$I_{\omega} = I_{\omega k} + I_{\omega t} + I_{\omega m} \quad (4.12)$$

$$I_{\omega} = 150,67 + 6,65 + 33,25$$

$$I_{\omega} = 190,57 \text{ t.m}^2$$

Dosažením do již uvedeného vzorce je velikost kroučícího momentu:

Pro kočku s břemenem:

$$M_{\omega} = 372,34 \cdot 0,105$$

$$M_{\omega} = 39,10 \text{ kNm}$$

Pro kočku bez břemene:

$$M_{\omega} = 190,57 \cdot 0,105$$

$$M_{\omega} = 20,01 \text{ kNm}$$

Ze známého kroučícího momentu je již snadné vypočítat horizontální účinky na kolo, a to ze

$$\text{vztahu: } F_{ix}^{A,B} = \frac{M_{\omega}}{2b}, \quad (4.13)$$

kde b je rameno dvojice sil, v tomto případě rozvor kočky ($b = b_k$). Po vyčíslení tedy platí:

$$F_{ix}^{A,B} = \frac{39,10}{2 \cdot 6,48}$$

$$F_{ix}^{A,B} = 3,02 \text{ kN} \quad (\text{kočka s břemenem})$$

$$F_{ix}^{A,B} = \frac{20,01}{2 \cdot 6,48}$$

$$F_{ix}^{A,B} = 1,54 \text{ kN} \quad (\text{kočka bez břemene})$$

4.1.2.3 Přehled účinků kol kočky – kočka s břemenem

V tabulkách 9a a 9b jsou jednak uvedeny jednotlivé účinky od jednotlivých zatížení, jednak výsledné účinky od kombinace jednotlivých zatížení. Hodnoty jsou uvedeny v kN. Účinky $F_{ix}^{A,B}$ jsou předpokládány pro rozjezd kočky a otáčení kočky shodně orientované u prvního kola kočky. Je nutné dbát na správnou orientaci sil u různých zatížení.

Tab. 9a: Přehled účinků kol kočky – kočka s břemenem (nosník A)

Nosník A

Zatížení	F_{1x}^A	F_{2x}^A	F_{2y}^A	F_{1z}^A	F_{2z}^A
Svislé setr. síly	-	-	-	-145,83	-145,83
Rozjezd most	+3,86	+3,86	-	±1,91	±1,91
Rozjezd kočka	-	-	+15,25	+3,25	±3,25
Otáčení	+3,02	±3,02	-	-	-
RMRK	-6,88	-0,84	-15,25	-147,17	-140,67
RMBK	-6,88	-0,84	+15,25	-140,67	-147,17
BMRK	+6,88	+0,84	-15,25	-150,99	-144,49
BMBK	+6,88	+0,84	+15,25	-144,49	-150,99

RMRK- rozjezd most, rozjezd kočka

RMBK- rozjezd most, brzdění kočka

BMRK- brzdění most, rozjezd kočka

BMBK- brzdění most, brzdění kočka

Tab. 9b: Přehled účinků kol kočky – kočka s břemenem (nosník B)

Nosník B

Zatížení	F_{1x}^B	F_{2x}^B	F_{2y}^B	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Svislé setr. síly	-	-	-	-145,83	-145,83
Rozjezd most	+3,86	+3,86	-	+1,91	+1,91
Rozjezd kočka	-	-	+15,25	+3,25	±3,25
Otáčení	+3,02	±3,02	-	-	-
RMRK	-6,88	-0,84	-15,25	-150,99	-144,49
RMBK	-6,88	-0,84	+15,25	-144,49	-150,99
BMRK	+6,88	+0,84	-15,25	-147,17	-140,67
BMBK	+6,88	+0,84	+15,25	-140,67	-147,17

4.1.2.4 Přehled účinků kol kočky – kočka bez břemene

V tabulkách 10a a 10b jsou jednak uvedeny jednotlivé účinky od jednotlivých zatížení, jednak výsledné účinky od kombinace jednotlivých zatížení. Hodnoty jsou uvedeny v kN. Účinky $F_{ix}^{A,B}$ jsou předpokládány pro rozjezd kočky a otáčení kočky shodně orientované u prvního kola kočky. Je nutné dbát na správnou orientaci sil u různých zatížení.

Tab. 10a: Přehled účinků kol kočky – kočka bez břemene (nosník A)

Nosník A

Zatížení	F_{1x}^A	F_{2x}^A	F_{2y}^A	F_{1z}^A	F_{2z}^A
Svislé setr. síly	-	-	-	-92,39	-92,39
Rozjezd most	+2,58	+2,58	-	±1,18	±1,18
Rozjezd kočka	-	-	+10,30	+2,03	±2,03
Otáčení	+1,54	±1,54	-	-	-
RMRK	-6,88	-0,84	-15,25	-93,24	-89,18
RMBK	-6,88	-0,84	+15,25	-89,18	-93,24
BMRK	+6,88	+0,84	-15,25	-95,60	-91,54
BMBK	+6,88	+0,84	+15,25	-91,54	-95,60

Tab. 10b: Přehled účinků kol kočky – kočka bez břemene (nosník B)

Nosník B

Zatížení	F_{1x}^B	F_{2x}^B	F_{2y}^B	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Svislé setr. síly	-	-	-	-92,39	-92,39
Rozjezd most	+3,86	+3,86	-	+1,18	+1,18
Rozjezd kočka	-	-	+15,25	+2,03	+2,03
Otáčení	+3,02	+3,02	-	-	-
RMRK	-6,88	-0,84	-15,25	-95,60	-91,54
RMBK	-6,88	-0,84	+15,25	-91,54	-95,60
BMRK	+6,88	+0,84	-15,25	-93,24	-89,18
BMBK	+6,88	+0,84	+15,25	-89,18	-93,24

4.1.3 Kombinace zatížení při únavě

V tab. 11 jsou uvedena jednotlivá zatížení (L1-L12), která budou kombinována se zatížením stálým. Vzhledem k symetrii ocelové konstrukce mostu tak nastává celkem 12 kombinací (stálé zatížení + L1-L12).

Tab. 11: Přehled zatížení při únavě

Zatížení	Označení	Popis
L1	RMRKSQ	Rozjezd most, rozjezd kočka střed s břemenem
L2	RMBKSQ	Rozjezd most, brzdění kočka střed s břemenem
L3	BMRKSQ	Brzdění most, rozjezd kočka střed s břemenem
L4	BMBKSQ	Brzdění most, brzdění kočka střed s břemenem
L5	RMRKLQ	Rozjezd most, rozjezd kočka vlevo s břemenem
L6	RMBKLQ	Rozjezd most, brzdění kočka vlevo s břemenem
L7	BMRKLQ	Brzdění most, rozjezd kočka vlevo s břemenem
L8	BMBKLQ	Brzdění most, brzdění kočka vlevo s břemenem
L9	RMRKPO	Rozjezd most, rozjezd kočka vpravo bez břemene
L10	RMBKPO	Rozjezd most, brzdění kočka vpravo bez břemene
L11	BMRKPO	Brzdění most, rozjezd kočka vpravo bez břemene
L12	BMBKPO	Brzdění most, brzdění kočka vpravo bez břemene

4.2 Návrhová zatížení dle ČSN EN 13001

Konstrukce na únavu se posuzují dle ČSN EN 13001-2 podle kombinací zatížení A, uvedené v tabulce 10 této normy. Rozhodující je přitom kombinace A1. Všechny dílčí součinitelé bezpečnosti se uvažují $\gamma_p = 1,0$.

4.2.1 Zatížení pravidelná od hmotnosti jeřábu

Norma ČSN EN 13001 zohledňuje dynamické účinky při zvedání břemena na hmotu jeřábu součinitelem Φ_1 . Tab. 12 uvádí spojitá zatížení přenásobená tímto součinitelem.

Tab.12: Spojitá zatížení se započítáním dynamických účinků v kN/m

Nosník A	Nosník B	Příčník	Táhlo
9,48	7,67	4,75	1,08

Dynamický účinek se projeví i u zatížení osamělými silami:

$$F_{\xi}^{UN} = \Phi_1 \cdot F_{\xi} \quad (4.14)$$

$$F_{\xi}^{UN} = 1,1 \cdot 2\,452,5$$

$$F_{\xi}^{UN} = 2\,697,2 \text{ kN}$$

4.2.2 Zatížení pravidelná od hmotnosti břemene a hmotnosti kočky

4.2.2.1 Zatížení od svislých setrvačných sil

a) Zatížení od svislých setrvačných sil působících od hmotnosti kočky

Toto zatížení počítá s účinkem dynamických sil vznikajících zvedáním břemene na hmotu kočky. Do výpočtu se tento účinek zahrne tak, že zatížení od kočky se násobí součinitelem Φ_1 (určeným v kapitole 2.3.2).

b) Zatížení od svislých setrvačných sil působících od zdvihání břemene

Toto zatížení počítá s účinkem dynamických sil vznikajících od břemene při jeho zdvihání. Do výpočtu se tento účinek zahrne tak, že zatížení od vlastní hmotnosti celkového břemene (konkrétně traverza, magnety, zdvihané břemeno) se násobí součinitelem Φ_2 (určeným v kapitole 2.3.2). Hodnoty svislých setrvačných sil (v kN) tedy dostaneme vynásobením účinků zatížení uvedených v tab. 4 příslušným součinitelem (viz tab. 13).

Tab. 13: Svislé setrvačné síly (kN)

Zatížení	Součinitel zatížení	F_{1z}^A	F_{2z}^A	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Kočka	$\Phi_1 = 1,1$	66,50	66,50	66,50	66,50
Traverza	$\Phi_2 = 1,347$	5,78	5,78	5,78	5,78
Magnety	$\Phi_2 = 1,347$	11,89	11,89	11,89	11,89
Břemeno (Q)	$\Phi_2 = 1,347$	49,38	49,38	49,38	49,38
Součet bez Q		84,17	84,17	84,17	84,17
Součet s Q		133,55	133,55	133,55	133,55

4.2.3 Zatížení pravidelná od zrychlení pohonů

Tento typ zatížení zohledňuje účinky sil vznikající při zrychlování nebo zpomalování pohybů (pojízdy, otáčení). Do výpočtu se tento účinek zahrne tak, že horizontální účinek vyvolaný zrychlením se násobí součinitelem Φ_5 (určeným v kapitole 2.3.2).

a) Horizontální setrvačné síly od rozjezdu mostu

Tyto účinky se stanoví jako součin adhezní síly hnacích (brzděných) kol, součinitele tření a součinitele Φ_5 .

Jsou stanoveny vztahem:

$$F_{ix}^{A,B} = \Phi_5 \cdot \mu \cdot i \cdot F_{iz}^{A,B}, \quad (4.15)$$

kde μ představuje součinitel tření, který je definován ČSN EN 13001 hodnotou $\mu = 0,2$. Součinitel i představuje poměr mezi poháněnou a celkovou hmotou jeřábu. Vzhledem ke skutečnosti, že poháněná jsou 2 kola jeřábu z 8, je uvažováno s hodnotou součinitele $i = 0,25$. Veličina $F_{iz}^{A,B}$ představuje charakteristické hodnoty tlaky kol kočky. Tab.14 uvádí hodnoty horizontálních setrvačných sil (v kN) od rozjezdu mostu.

Tab. 14: Horizontální setrvačné síly od rozjezdu mostu

Zatížení	F_{1x}^A	F_{2x}^A	F_{1x}^B	F_{2x}^B
Kočka	4,54	4,54	4,54	4,54
Traverza	0,32	0,32	0,32	0,32
Magnety	0,66	0,66	0,66	0,66
Břemeno (Q)	2,75	2,75	2,75	2,75
Součet bez Q	5,52	5,52	5,52	5,52
Součet s Q	8,27	8,27	8,27	8,27

Vzhledem k tomu, že horizontální setrvačné síly od rozjezdu mostu nepůsobí na ocelovou konstrukci mostu v rovině mostu, je nutné uvažovat se svislými přítlaky od horizontálních setrvačných sil. Ty definují vztahy:

$$F_{1z}^{A,B} = \sum F_{1x}^{A,B} \cdot (H_K, H_Q) / a_k \quad (4.16)$$

$$F_{2z}^{A,B} = \sum F_{2x}^{A,B} \cdot (H_K, H_Q) / a_k \quad (4.17)$$

kde H_K je poloha těžiště rámu kočky ($H_K = 1\,200\text{ mm}$), H_Q je poloha těžiště závěsu břemene ($H_Q = 1\,600\text{ mm}$), a_k je rozchod kočky a $F_{1x}^{A,B}$, $F_{2x}^{A,B}$ příslušné horizontální síly.

Tab.15 uvádí hodnoty svislých přítlaků od horizontálních setrvačných sil (v kN) od rozjezdu mostu.

Tab. 15: Svislé přítlaky od horizontálních setrvačných sil od rozjezdu mostu

Zatížení	F_{1z}^A	F_{2z}^A	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Kočka	1,94	1,94	1,94	1,94
Traverza	0,18	0,18	0,18	0,18
Magnety	0,38	0,38	0,38	0,38
Břemeno (Q)	1,57	1,57	1,57	1,57
Součet bez Q	2,51	2,51	2,51	2,51
Součet s Q	4,08	4,08	4,08	4,08

b) Horizontální setrvačné síly od rozjezdu kočky

Tyto účinky se stanoví jako součin adhezní síly hnacích (brzděných) kol, součinitele tření a součinitele Φ_5 .

Jsou stanoveny vztahem (za předpokladu, že na kočce jsou poháněna kola č.2):

$$F_{2y}^{A,B} = \Phi_5 \cdot \mu \cdot F_{2z}^{A,B}, \quad (4.18)$$

kde μ představuje součinitel tření, který je definován ČSN EN 13001 hodnotou $\mu = 0,2$.

Veličina $F_{2z}^{A,B}$ představuje charakteristické hodnoty tlaku poháněných kol kočky. Tab.16 uvádí hodnoty horizontálních setrvačných sil (v kN) od rozjezdu kočky.

Tab. 16: Horizontální setrvačné síly od rozjezdu kočky (kN)

Zatížení	F_{1y}^A	F_{2y}^A	F_{1y}^B	F_{2y}^B
Kočka	-	18,14	-	18,14
Traverza	-	1,29	-	1,29
Magnety	-	2,65	-	2,65
Břemeno (Q)	-	11,00	-	11,00
Součet bez Q	-	22,07	-	22,07
Součet s Q	-	33,07	-	33,07

Také horizontální setrvačné síly od rozjezdu kočky nepůsobí na ocelovou konstrukci mostu v rovině mostu, také zde je nutné uvažovat se svislými přítlaky od horizontálních setrvačných sil. Ty definují vztahy:

$$F_{1z}^A = F_{2y}^A \cdot (H_K, H_Q) / b_k \quad (4.19)$$

$$F_{iz}^B = F_{2y}^B \cdot (H_K, H_Q) / b_k \quad (4.20)$$

kde H_K je poloha těžiště rámu kočky ($H_K = 1\,200\text{ mm}$), H_Q je poloha těžiště závěsu břemene ($H_Q = 1\,600\text{ mm}$), b_k je rozvor kočky a F_{2y}^A , F_{2y}^B příslušné horizontální síly.

Tab.17 uvádí hodnoty svislých přítlaků od horizontálních setrvačných sil (v kN) od rozjezdu kočky.

Tab. 17: Svislé přítlaky od horizontálních setrvačných sil od rozjezdu kočky

Zatížení	F_{1z}^A	F_{2z}^A	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Kočka	1,57	1,57	1,57	1,57
Traverza	0,15	0,15	0,15	0,15
Magnety	0,31	0,31	0,31	0,31
Břemeno (Q)	1,22	1,22	1,22	1,22
Součet bez Q	2,03	2,03	2,03	2,03
Součet s Q	3,25	3,25	3,25	3,25

c) Horizontální setrvačné síly od otáčení kočky

Setrvačné síly od rozjezdu otáčení kočky a excentricity břemene se přenášejí do horizontálních reakcí mezi koly kočky a kolejnicí jeřábu. Jejich velikost závisí na velikosti kroutícího momentu, který vyvozuje otáčející se kočka. Výpočet je analogický jako v kapitole 4.1.2.2., pouze výsledné účinky se zvětšují o součinitel Φ_5 , tedy:

$$F_{ix}^{A,B} = 3,02 \cdot \Phi_5$$

$$F_{ix}^{A,B} = 4,53\text{ kN} \quad (\text{kočka s břemenem})$$

$$F_{ix}^{A,B} = 1,54 \cdot \Phi_5$$

$$F_{ix}^{A,B} = 2,31\text{ kN} \quad (\text{kočka bez břemene})$$

4.2.4 Přehled účinků kol kočky – kočka s břemenem

V tabulkách 18a a 18b jsou jednak uvedeny jednotlivé účinky od jednotlivých zatížení, jednak výsledné účinky od kombinace jednotlivých zatížení. Hodnoty jsou uvedeny v kN. Účinky $F_{ix}^{A,B}$ jsou předpokládány pro rozjezd kočky a otáčení kočky shodně orientované u prvního kola kočky. Je nutné dbát na správnou orientaci sil u různých zatížení.

Tab. 18a: Přehled účinků kol kočky – kočka s břemenem (nosník A)

Nosník A

Zatížení	F_{1x}^A	F_{2x}^A	F_{2y}^A	F_{1z}^A	F_{2z}^A
Svislé setr. síly	-	-	-	-133,55	-133,55
Rozjezd most	+8,27	+8,27	-	±4,08	±4,08
Rozjezd kočka	-	-	+33,07	+3,25	±3,25
Otáčení	+4,53	±4,53	-	-	-
RMRK	-12,80	-3,74	-33,07	-132,72	-126,22
RMBK	-12,80	-3,74	+33,07	-126,22	-132,72
BMRK	+12,80	+3,74	-33,07	-140,88	-134,38
BMBK	+12,80	+3,74	+33,07	-134,38	-140,88

RMRK- rozjezd most, rozjezd kočka

RMBK- rozjezd most, brzdění kočka

BMRK- brzdění most, rozjezd kočka

BMBK- brzdění most, brzdění kočka

Tab. 18b: Přehled účinků kol kočky – kočka s břemenem (nosník B)

Nosník B

Zatížení	F_{1x}^B	F_{2x}^B	F_{2y}^B	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Svislé setr. síly	-	-	-	-133,55	-133,55
Rozjezd most	+8,27	+8,27	-	+4,08	+4,08
Rozjezd kočka	-	-	+33,07	+3,25	±3,25
Otáčení	+4,53	±4,53	-	-	-
RMRK	-12,80	-3,74	-33,07	-140,88	-134,38
RMBK	-12,80	-3,74	+33,07	-134,38	-140,88
BMRK	+12,80	+3,74	-33,07	-132,72	-126,22
BMBK	+12,80	+3,74	+33,07	-126,22	-132,72

4.2.5 Přehled účinků kol kočky – kočka bez břemene

V tabulkách 19a a 19b jsou jednak uvedeny jednotlivé účinky od jednotlivých zatížení, jednak výsledné účinky od kombinace jednotlivých zatížení. Hodnoty jsou uvedeny v kN. Účinky $F_{ix}^{A,B}$ jsou předpokládány pro rozjezd kočky a otáčení kočky shodně orientované u prvního kola kočky. Je nutné dbát na správnou orientaci sil u různých zatížení.

Tab. 19a: Přehled účinků kol kočky – kočka bez břemene (nosník A)

Nosník A

Zatížení	F_{1x}^A	F_{2x}^A	F_{2y}^A	F_{1z}^A	F_{2z}^A
Svislé setr. síly	-	-	-	-84,17	-84,17
Rozjezd most	+5,52	+5,52	-	+2,51	+2,51
Rozjezd kočka	-	-	+22,07	+2,03	+2,03
Otáčení	+2,31	+2,31	-	-	-
RMRK	-7,83	-3,21	-22,07	-93,24	-89,18
RMBK	-7,83	-3,21	+22,07	-89,18	-93,24
BMRK	+7,83	+3,21	-22,07	-95,60	-91,54
BMBK	+7,83	+3,21	+22,07	-91,54	-95,60

Tab. 19b: Přehled účinků kol kočky – kočka bez břemene (nosník B)

Nosník B

Zatížení	F_{1x}^B	F_{2x}^B	F_{2y}^B	F_{1z}^B	F_{2z}^B
Svislé setr. síly	-	-	-	-84,17	-84,17
Rozjezd most	+5,52	+5,52	-	+2,51	+2,51
Rozjezd kočka	-	-	+22,07	+2,03	+2,03
Otáčení	+2,31	+2,31	-	-	-
RMRK	-7,83	-3,21	-22,07	-95,60	-91,54
RMBK	-7,83	-3,21	+22,07	-91,54	-95,60
BMRK	+7,83	+3,21	-22,07	-93,24	-89,18
BMBK	+7,83	+3,21	+22,07	-89,18	-93,24

4.2.6 Kombinace zatížení při únavě

V tab. 20 jsou uvedena jednotlivá zatížení (L1-L12), která budou kombinována se zatížením stálým. Vzhledem k symetrii ocelové konstrukce mostu tak nastává celkem 12 kombinací (stálé zatížení + L1-L12).

Tab. 20: Přehled zatížení při únavě

Zatížení	Označení	Popis
L1	RMRKSQ	Rozjezd most, rozjezd kočka střed s břemenem
L2	RMBKSQ	Rozjezd most, brzdění kočka střed s břemenem
L3	BMRKSQ	Brzdění most, rozjezd kočka střed s břemenem
L4	BMBKSQ	Brzdění most, brzdění kočka střed s břemenem
L5	RMRKLQ	Rozjezd most, rozjezd kočka vlevo s břemenem
L6	RMBKLQ	Rozjezd most, brzdění kočka vlevo s břemenem
L7	BMRKLQ	Brzdění most, rozjezd kočka vlevo s břemenem
L8	BMBKLQ	Brzdění most, brzdění kočka vlevo s břemenem
L9	RMRKPO	Rozjezd most, rozjezd kočka vpravo bez břemene
L10	RMBKPO	Rozjezd most, brzdění kočka vpravo bez břemene
L11	BMRKPO	Brzdění most, rozjezd kočka vpravo bez břemene
L12	BMBKPO	Brzdění most, brzdění kočka vpravo bez břemene

5 Model ocelové konstrukce jeřábu

Jako výpočtový program byl zvolen Nexis 32.

5.1 Fyzikální model

V přehledu jsou zde uvedeny fyzikální vlastnosti zvoleného materiálu konstrukce:

Izotropní materiál

Ocel jakosti S 235 J2G3

$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N.mm}^{-2}$

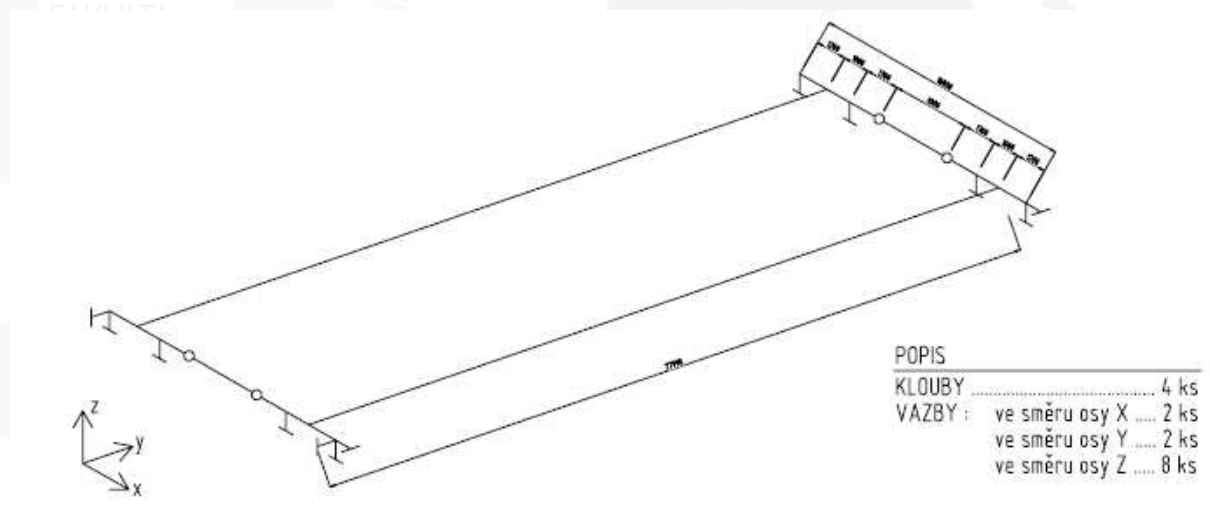
$G = 0,81 \cdot 10^5 \text{ N.mm}^{-2}$

$\mu_G = 0,3$

$$\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

5.2 Geometrický model

Pro výpočet vnitřních sil a napětí v konstrukci je nutné stanovit vhodný geometrický model. Na obr. 4 je znázorněn geometrický model ocelové konstrukce jeřábu tak, jak byl zadán do programu Nexis.



Obr. 4: Geometrický model konstrukce

6 Přehled výsledných vnitřních sil

6.1 Přehled vnitřních sil dle zatížení podle ČSN 27 0103 – výpočet v programu Nexis 32

Vnitřní síly jsou určeny v místě maximálního momentu na nosníku A:

$$M_y = 2\,892 \text{ kNm}, M_z = -114 \text{ kNm}, V_z = -154 \text{ kN}$$

Minimální napětí v tomto místě:

$$M_y = 1\,330 \text{ kNm}, M_z = 47 \text{ kNm}, V_z = 29 \text{ kN}$$

6.2 Přehled vnitřních sil dle zatížení podle ČSN EN 13001 – výpočet v programu Nexis 32

Vnitřní síly jsou určeny v místě maximálního momentu na nosníku A:

$$M_y = 2\,615 \text{ kNm}, M_z = -169 \text{ kNm}, V_z = -132 \text{ kN}$$

Minimální napětí v tomto místě:

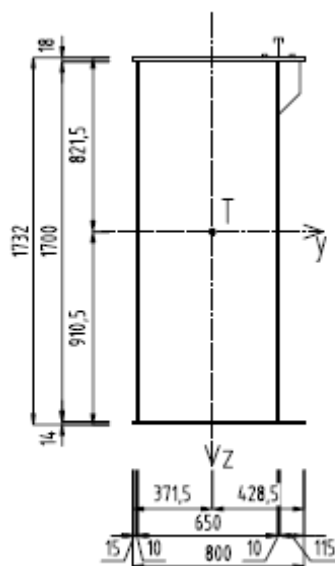
$$M_y = 1\,193 \text{ kNm}, M_z = 74 \text{ kNm}, V_z = 34 \text{ kN}$$

7 Posouzení ocelové konstrukce při únavě – hlavní nosník

Jako příklad výpočtu byl vybrán hlavní nosník jeřábu. Analogicky by se posuzovaly další části ocelové konstrukce jeřábu (příčník, táhlo).

7.1 Schéma průřezu a průřezové charakteristiky

Na obr. 5 je znázorněno schéma průřezu hlavního nosníku.



Obr. 5: Schéma průřezu nosníku

Průřezové charakteristiky:

$$A = 59,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$I_y = 26\,911,7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 5\,104,4 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$z^{\text{HP}} = -821,5 \text{ mm}$$

$$z^{\text{DP}} = 910,5 \text{ mm}$$

$$y^{\text{PL}} = -371,5 \text{ mm}$$

$$y^{\text{PP}} = 428,5 \text{ mm}$$

7.2 Posouzení dle ČSN 27 0103

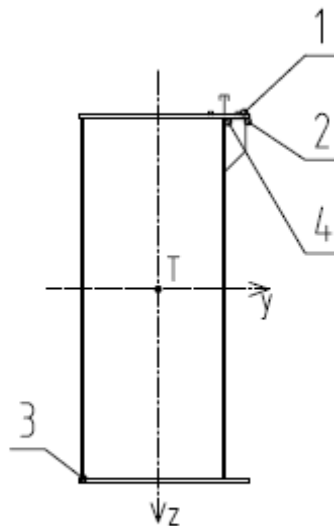
Na nosné konstrukci jeřábového mostu se vyskytují některé konstrukční detaily, které mají nepříznivé vrubové účinky a mohli by se po absolvování kritického počtu zatěžovacích cyklů

stát hlavní příčinou únavového poškození hlavních nosníků. Detaily jsou zařazeny do jednotlivých vrubových skupin.

Jedná se o následující detaily pro posouzení:

- a) detail č.1 – Svarový přípoj příchytky kolejnice k hornímu pasu nosníku (vrubová skupina K3)
- b) detail č.2 - Svarový přípoj příčného žebra k hornímu pasu nosníku (vrubová skupina K3)
- c) detail č.3 - Svarový přípoj příčného žebra k spodnímu pasu nosníku (vrubová skupina K3)
- d) detail č.4 – Krční svar stojiny pod kolejnicí k hornímu pasu nosníku (vrubová skupina K3)

Na obrázku č. 6 je patrné poloha detailů na průřezu.



Obr. 6: Schéma průřezu nosníku – detaily pro posouzení

Všechny tyto konstrukční vruby se nacházejí podél celého rozpětí nosníku a jsou tedy v oblastech maximálních napětí. Vzhledem k tomu, že nelze stanovit přesné spektrum napětí (přesná poloha odebírání a odkládání břemene ani četnost manipulace s konkrétní velikostí břemene v průběhu budoucích cca 25 let provozování jeřábu není známá), není možné provést výpočet kumulace poškození, ale pouze zjednodušený výpočet podle provozního zařazení jeřábu. ČSN 27 0103 stanovuje na základě pevnostní třídy materiálu, vrubové skupiny posuzovaného detailu a provozní skupiny jeřábu základní výpočtovou pevnost v únavě $R_{fat(-1)}$. Pro pevnostní třídu oceli 52, vrubovou skupinu K3 a provozní skupinu J6 je stanovena základní výpočtová pevnost v únavě **$R_{fat(-1)} = 45 \text{ MPa}$** .

Na základě této hodnoty a s podílu minimálního a maximálního napětí v daném místě

$$\kappa = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (7.1)$$

norma stanoví výpočtovou pevnost při únavě. Je třeba určit konstantu κ jak pro napětí ve směru osy y, tak ve směru osy z. Na základě zkušeností byl pro ukázkové posouzení vybrán detail č.3 (nejkritičtější).

Výpočet ve směru osy y:

$$\sigma_{y,\min} = \frac{M_y \cdot z}{I_y}, \quad (7.2)$$

kde I_y je moment setrvačnosti a z je z-ová vzdálenost posuzovaného místa od těžiště průřezu (pro detail č. 3 se $z = 896,5 \text{ mm}$). Po dosazení:

$$\sigma_{y,\min} = \frac{1330 \cdot 10^3 \cdot 896,5 \cdot 10^{-3}}{26911,7 \cdot 10^{-6}}$$

$$\sigma_{y,\min} = 44,3 \text{ MPa}$$

Analogicky se určí $\sigma_{y,\max}$:

$$\sigma_{y,\max} = \frac{2892 \cdot 10^3 \cdot 896,5 \cdot 10^{-3}}{26911,7 \cdot 10^{-6}}$$

$$\sigma_{y,\max} = 96,34 \text{ MPa}$$

Poměr napětí κ je tedy:

$$\kappa = \frac{44,3}{96,34}$$

$$\kappa = 0,388$$

Tedy platí $0 < \kappa < 1$, v tomto případě je vztah pro výpočtovou pevnost $R_{fat,t(\kappa)}$ při únavě následující:

$$R_{fat,t(\kappa)} = \frac{R_{fat,t(0)}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fat,t(0)}}{0,75R_m}\right) \cdot \kappa}, \quad (7.3)$$

kde R_m je mez pevnosti materiálu v tahu. R_m je určeno v závislosti na řadě oceli hodnotou $R_m = 520 \text{ MPa}$. $R_{fat,t(0)}$ je stanoveno vztahem

$$R_{fat,t(0)} = \frac{5}{3} R_{fat,t(-1)}, \quad (7.4)$$

takže po dosazení:

$$R_{fat,t(0)} = \frac{5}{3} \cdot 45$$

$$R_{fat,t(0)} = 75 \text{ MPa}$$

Takže konečně po dosazení do vzorce pro výpočtovou pevnost:

$$R_{fat, t(\kappa)} = \frac{75}{1 - \left(1 - \frac{75}{0,75 \cdot 520}\right) \cdot 0,388}$$

$$R_{fat, t(\kappa)} = 109,2 \text{ MPa}$$

Výpočet ve směru osy z:

$$\sigma_{z, \max} = \frac{M_z \cdot y}{I_z}, \quad (7.5)$$

kde I_z je moment setrvačnosti a y je y-ová vzdálenost posuzovaného místa od těžiště průřezu (pro detail č. 3 se $y = -346,5 \text{ mm}$). Po dosazení:

$$\sigma_{z, \max} = \frac{-114 \cdot 10^3 \cdot (-346,5 \cdot 10^{-3})}{5104,4 \cdot 10^{-6}}$$

$$\sigma_{z, \max} = 7,7 \text{ MPa}$$

Analogicky se určí $\sigma_{y, \min}$:

$$\sigma_{z, \min} = \frac{47 \cdot 10^3 \cdot (-346,5 \cdot 10^{-3})}{5104,4 \cdot 10^{-6}}$$

$$\sigma_{z, \min} = -3,2 \text{ MPa}$$

Poměr napětí κ je tedy:

$$\kappa = \frac{-3,2}{7,7}$$

$$\kappa = -0,416$$

Tedy platí $-1 < \kappa < 0$, v tomto případě je vztah pro výpočtovou pevnost $R_{fat, t(\kappa)}$ při únavě následující:

$$R_{fat, t(\kappa)} = \frac{5 \cdot R_{fat(-1)}}{3 - 2\kappa}, \quad (7.6)$$

takže po dosazení:

$$R_{fat, t(\kappa)} = \frac{5 \cdot 45}{3 - 2 \cdot (-0,416)}$$

$$R_{fat, t(\kappa)} = 58,9 \text{ MPa}$$

Výpočet smykového napětí:

$$\tau = \frac{V_z}{A}, \quad (7.7)$$

kde V_z představuje vertikální sílu a A je plocha průřezu. Po dosazení:

$$\tau = \frac{-154 \cdot 10^3}{59,6 \cdot 10^3}$$

$$\tau = 2,58 \text{ MPa}$$

Norma dále uvádí vztah pro výpočtovou pevnost ve smyku při únavě:

$$\tau_{\text{fat}(\kappa)} = \frac{R_{\text{fat}(\kappa)}}{\sqrt{2}} \quad (7.8)$$

$$\tau_{\text{fat}(\kappa)} = \frac{109,2}{\sqrt{2}}$$

$$\tau_{\text{fat}(\kappa)} = 77,2 \text{ MPa}$$

Dle normy musí být splněna podmínka :

$$\left(\frac{\sigma_x}{R_{\text{xfat}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{R_{\text{yfat}}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{|R_{\text{xfat}}| \cdot |R_{\text{yfat}}|} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{fat}}} \right)^2 \leq 1,1, \quad (7.9)$$

kde σ_x , σ_y jsou vypočtená normálová napětí ve směru os x a y, R_{xfat} a R_{yfat} jsou vypočteným napětím σ_x , σ_y odpovídající výpočtové pevnosti. Po dosazení (samozřejmě je dosazeno ve správném smyslu tohoto vztahu podle souřadného systému) :

$$\left(\frac{96,34}{109,2} \right)^2 + \left(\frac{7,7}{58,9} \right)^2 - \left(\frac{96,34 \cdot 7,7}{109,2 \cdot 58,9} \right) + \left(\frac{2,58}{77,2} \right)^2 \leq 1,1$$

$0,68 \leq 1,1$, podmínka splněna, **detail vyhovuje na únavu**

7.3 Posouzení dle EN 13001

Podle této normy jsou posuzované detaily zařazeny do následujících kategorií rozkmitu napětí $\Delta\sigma_c$:

- a) detail č.1 – kategorie $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N.mm}^{-2}$
- b) detail č.2 - kategorie $\Delta\sigma_c = 112 \text{ N.mm}^{-2}$
- c) detail č.3 - kategorie $\Delta\sigma_c = 112 \text{ N.mm}^{-2}$
- d) detail č.4 – kategorie $\Delta\sigma_c = 125 \text{ N.mm}^{-2}$

Dále norma určuje dovolený rozkmit napětí $\Delta\sigma_{\text{Rd}}$ dvěma způsoby, zde je uveden výpočet použitím třídy S, pak je $\Delta\sigma_{\text{Rd}}$ stanoveno vztahem:

$$\Delta\sigma_{\text{Rd}} = \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{\text{Mf}} \cdot \sqrt[3]{S(m=3)}}, \quad (7.10)$$

kde γ_{Mf} je dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti, který je stanoven normou v závislosti na přístupnosti detailu a nebezpečnosti při porušení, v tomto případě je uvažováno s hodnotou

$\gamma_{Mf} = 1,35$ a $s_{(m)}$ je parametr průběhu napětí dle zatřídění, v případě třídy S8 je stanovena hodnota $s_{(m=3)} = 2,0$ (platí v případě sklonu křivky $m=3$). Po dosazení do vzorce je tedy dovolený rozkmit napětí (pro detail č. 3):

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{112}{1,35 \cdot \sqrt[3]{2}}$$

$$\Delta\sigma_{Rd} = 65,84 \text{ N.mm}^{-2}$$

Dále je třeba určit největší návrhovou hodnotu rozkmitu napětí $\Delta\sigma_{Sd}$. Určení krajních hodnot návrhového napětí (pro osu y):

$$\max \sigma = \frac{M_{\max} \cdot z}{I_y} \quad (7.11)$$

$$\max \sigma = \frac{2615 \cdot 10^3 \cdot 896,5 \cdot 10^{-3}}{26911,7 \cdot 10^{-6}}$$

$$\max \sigma = 87,11 \text{ N.mm}^{-2}$$

$$\min \sigma = \frac{M_{\min} \cdot z}{I_y} \quad (7.12)$$

$$\min \sigma = \frac{1193 \cdot 10^3 \cdot 896,5 \cdot 10^{-3}}{26911,7 \cdot 10^{-6}}$$

$$\min \sigma = 39,74 \text{ N.mm}^{-2}$$

Potom rozkmit napětí je:

$$\Delta\sigma_{Sd} = \max \sigma - \min \sigma \quad (7.13)$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 87,11 - 39,74$$

$$\Delta\sigma_{Sd} = 47,37 \text{ N.mm}^{-2}$$

Dle normy musí být splněna podmínka:

$$\Delta\sigma_{Sd} \leq \Delta\sigma_{Rd} , \quad (7.14)$$

po dosazení tedy

$$47,37 \leq 65,84, \text{ podmínka splněna.}$$

Analogicky musí být provedeno posouzení pro další složky napětí (σ_z , τ), pro posouzení napětí σ_z , tedy platí:

$$\max \sigma = \frac{M_{\max} \cdot y}{I_z} \quad (7.15)$$

$$\max \sigma = \frac{-169 \cdot 10^3 \cdot (-346,5 \cdot 10^{-3})}{5104,4 \cdot 10^{-6}}$$

$$\max \sigma = 11,46 \text{ N.mm}^{-2}$$

$$\min \sigma = \frac{M_{\min} \cdot y}{I_z} \quad (7.16)$$

$$\min \sigma = \frac{74 \cdot 10^3 \cdot (-346,5 \cdot 10^{-3})}{5104,4 \cdot 10^{-6}}$$

$$\min \sigma = -5,02 \text{ N.mm}^{-2}$$

Potom rozkmit napětí je:

$$\Delta \sigma_{Sd} = \max \sigma - \min \sigma \quad (7.17)$$

$$\Delta \sigma_{Sd} = 11,46 + 5,02$$

$$\Delta \sigma_{Sd} = 16,48 \text{ N.mm}^{-2}$$

Podmínka:

$$\Delta \sigma_{Sd} \leq \Delta \sigma_{Rd}, \quad (7.18)$$

po dosažení tedy

$$16,48 \leq 65,84, \text{ podmínka splněna.}$$

Posouzení smykového napětí τ :

$$\max \tau = \frac{V_{\max}}{A} \quad (7.19)$$

$$\max \tau = \frac{-132 \cdot 10^3}{59,6 \cdot 10^{-3}}$$

$$\max \tau = -2,21 \text{ N.mm}^{-2}$$

$$\min \tau = \frac{V_{\min}}{A} \quad (7.20)$$

$$\min \tau = \frac{34 \cdot 10^3}{59,6 \cdot 10^{-3}}$$

$$\min \tau = 0,57 \text{ N.mm}^{-2}$$

Potom rozkmit napětí je:

$$\Delta \tau_{Sd} = \max \tau - \min \tau \quad (7.21)$$

$$\Delta \tau_{Sd} = 2,21 + 0,57$$

$$\Delta \tau_{Sd} = 2,78 \text{ N.mm}^{-2}$$

Podmínka:

$$\Delta\tau_{sd} \leq \Delta\tau_{Rd},$$

po dosažení tedy

$$2,78 \leq 65,84, \text{ podmínka splněna, detail vyhovuje na únavu.}$$

(7.22)

8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo pevnostní posouzení jeřábu na únavu podle ČSN EN 13001 a ČSN 27 0103 a pokusit se v hlavních bodech shrnout oba postupy. Co se týká výpočtu zatížení, norma ČSN 27 0103 zavádí do výpočtu (při posouzení únosnosti při únavě) pouze dva součinitele, a to δ_i , který zohledňuje dynamické účinky na konstrukci vyvolané pojezdem a δ_h , který zohledňuje dynamické účinky na konstrukci zdviháním břemene. Naproti tomu ČSN EN 13001 zavádí součinitelů více v závislosti na nastalém zatížení. Do výpočtu se tak zavádí Φ_1 , který zohledňuje dynamické účinky na konstrukci jeřábu při zdvihání, Φ_2 , který zohledňuje dynamické účinky od břemene při zdvihání, Φ_3 , který zohledňuje dynamické účinky od břemene při náhlém uvolnění, Φ_4 , který zohledňuje dynamické účinky způsobené pojezdem po nerovném povrchu a Φ_5 , který zohledňuje dynamické účinky způsobené zrychlením pohonů (analogie s δ_i dle ČSN 27 0103). Co se týká posouzení podle ČSN 27 0103, pro každý posuzovaný detail v závislosti na jeho vlastnostech, druhu provozu a podílu maximálního a minimálního napětí, které vyvoluje kombinace zatížení, je stanovena výpočtová pevnost při únavě. Při posouzení pak musí být splněna podmínka pro redukované napětí při únavě, kterou vyjadřuje vztah 7.9. Naproti tomu ČSN EN 13001 posuzuje vybrané detaily tak, že v závislosti na vlastnostech detailu, druhu provozu a nebezpečnosti porušení stanovuje pro daný detail dovolený rozkmit napětí. Ten pak při posouzení nesmí být menší, než rozdíl maximálního a minimálního napětí vyvozeného kombinacemi zatížení na konstrukci.

9 Literatura

- [1] Jeřáby 1. díl; autoři Prof. Ing.: Remta, Kupka, Dražan; Nakladatelství technické literatury SNTL, Praha 1974. Vydání druhé.
- [2] Teorie dopravních a manipulačních zařízení; autoři Doc. Ing. Jaroslav Gajdůšek, CSc., Ing. Miroslav Škopán, CSc.; Ediční středisko VUT Brno, 1988
- [3] Strojnické tabulky pro SPŠ strojnické; autor: Ing. Pavel Vávra a kolektiv; Státní nakladatelství technické literatury SNTL Praha, 1983

[4] Jeřáby 2.díl; autoři Prof. Ing.: Remta, Kupka; Státní nakladatelství technické literatury SNTL Praha 1958.

[5] Jeřáby 3.díl; autoři Prof. Ing.: Remta, Kupka; Státní nakladatelství technické literatury SNTL Praha 1961.

[6] ČSN 73 1401/84 Navrhování ocelových konstrukcí

[7] ČSN 27 0103/89 Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů

[8] ČSN EN 13001-2/05 Jeřáby – návrh všeobecně – část 2: Účinky zatížení

[9] ČSN P CEN 13001-2/05 Jeřáby – návrh všeobecně – část 3-1: Mezní stavy a prokázání způsobilosti ocelových konstrukcí

10 Přílohy

Výkres sestavy jeřábu