

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

ZDENĚK SHÁNĚL

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Statická analýza rekonstruovaného mostu v km 79,943 trati Lovosice - Česká Lípa --
vliv tuhosti styčníků

Zdeněk Sháněl

Bakalářská práce

2020

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Zdeněk Sháněl**
Osobní číslo: **D15572**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Téma práce: **Statická analýza rekonstruovaného mostu v km 79,943 trati Lovosice – Česká Lípa – vliv tuhosti styčnicků**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Zásady pro vypracování

- Základní principy ocelových příhradových mostů a provádění zatěžovacích zkoušek na těchto mostech – Vypracování statického modelu mostu v km 79,943 Lovosice
- Česká Lípa – Srovnání výsledků modelů a statické zatěžovací zkoušky mostu – Studie vlivu tuhosti styčnicků na výsledky modelu – Vyhodnocení výsledků a závěry

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Rotter T., Studnička J. Ocelové konstrukce 30 ? ocelové mosty, ČVUT Praha 1999

ČSN EN 1993 - Navrhování ocelových konstrukcí

ČSN 73 6209 - Zatěžovací zkoušky mostů

Scia Engineering Manual 2015

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.**
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **23. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2020**

L.S.

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

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 17. 1. 2020

Zdeněk Sháněl

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat Ing. Ladislavovi Řoutilovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu a umožnění studia na vysoké škole.

SOUHRN

Bakalářská práce se zaměřuje na vliv tuhosti styčnicků na mechanickou odezvu příhradového ocelového železničního mostu v km 73,943 trati Lovosice – Česká Lípa. Statické přepočty jsou provedeny v programu SCIA Engineer 17.01 a výsledné průhyby z každého modelu jsou porovnány s průhybem získaným během statické zatěžovací zkoušky, kterou provedl Kloknerův ústav.

KLÍČOVÁ SLOVA

most, příhradová konstrukce, statický výpočet, tuhost styčnicků, průhyb, simulační metody Monte Carlo a LHS

TITLE

Static analysis of reconstructed bridge in km 79,943 track Lovosice - Česká Lípa-- influence of joints stiffness

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the influence of joints stiffness on mechanical response of truss steel railway bridge in km 79,943 track Lovosice – Česká Lípa. Statical calculation is executed in the program SCIA Engineer 17.01 and resultant deflections form each model are compared with deflection, which is obtained during static load test. This test was executed by Klokner's institute.

KEYWORDS

bridge, truss construction, ststic analysis, joints stiffness, deflection, simulation methods Monte Carlo and LHS

OBSAH

1. Úvod.....	9
2. Rozdělení mostů.....	10
3. Mostní svršek a mostovka.....	11
4. Příslušenství mostů	12
4.1 Ložiska	12
4.2 Přejížděvací konstrukce (dilatační závěry)	12
4.3 Římsy a chodníky mostů.....	13
4.4 Mostní zábradlí a svodidla	13
4.5 Odvodnění mostů	13
5. Kloubový příhradový nosník	13
5.1 Výpočet statické určitosti rovinného příhradového nosníku.....	13
5.2 Metody výpočtu vnitřních sil u příhradových konstrukcí.....	14
5.2.1 Obecná styčnicková metoda	14
5.2.2 Průsečná metoda.....	14
6. Zatěžování mostů – zatěžovací zkoušky	15
6.1 Statická zatěžovací zkouška.....	16
6.2 Dynamická zatěžovací zkouška	16
6.3 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky	17
7. Popis mostu a umístění mostu.....	17
8. Statická zatěžovací zkouška mostu v km 79,943 na trati Lovosice - Česká lípa ...	20
9. Výpočtový model.....	22
9.1 Výpočtový model se shodnou tuhostí všech styčníků	23
9.2 Výpočtový model s rozdílnou tuhostí styčníků v horní a dolní pásnici.....	27
9.2.1 Vliv velikosti tuhosti středových styčníků na výsledný průhyb konstrukce	31
9.3 Výpočtový model s náhodnými tuhostmi styčníků pomocí simulačních metod Monte Carlo a LHS	33

9.3.1 Simulační modely typu Monte Carlo	33
9.3.2 Použití simulačních metod modelu mostu	35
10. Vlivu tuhostí styčnicků na velikost vnitřních sil	47
11. Diskuze výsledků a závěr.....	55
12. Seznam použité literatury.....	57
13. Seznam tabulek	58
14. Seznam grafů.....	60
15. Seznam obrázkových příloh.....	61

1. ÚVOD

Příhradový nosník je častým stavebním prvkem. Pro výrobu příhradových nosníků se nejčastěji využívá dřevo a ocel. Dřevěné příhradové nosníky nachází své uplatnění nejvíce v pozemních stavbách, kde se jich využívá jako nosného systému střech. Ocelové příhradové nosníky se využívají v pozemním stavitelství jako nosné prvky střech a v dopravním stavitelství jako hlavní nosníky mostů.

Analýza příhradových nosníků vychází z předpokladu, že ve styčnicích je vždy dokonalý kloub (nepřenáší ohybové momenty). Ohybový moment přenášený styčnicí je natolik malý, že ho můžeme zanedbat. Toto zanedbání nemá vliv na posouzení mezního stavu únosnosti, ale může mít vliv na výsledný průhyb konstrukce.

Práce sleduje vliv tuhosti styčniců na průhyb příhradové konstrukce pro most na trati Lovosice – Česká Lípa v km 73,943 na modelu mostu vytvořeném v programu SCIA Engineer 17.01. Modelované průhyby jsou porovnány s naměřenými průhyby během statické zatěžovací zkoušky.

2. ROZDĚLENÍ MOSTŮ

Most je nedílnou součástí pozemních komunikací. Pomáhá s překonáním přírodní, nebo umělé překážky. Mosty můžeme dělit podle různých kritérií.

a) Podle druhu převáděné komunikace:

- mosty drážních komunikací (mosty železniční, tramvajové, aj.),
- mosty pozemních komunikací (mosty dálniční, silniční, aj.),
- mosty vodohospodářské (průplavní, vodovodní, akvadukty),
- mosty sdružené (převádí dvě a více dopravních cest sdruženého charakteru),
- mosty průmyslové,
- lávky pro pěší.

b) Podle přemísťované překážky:

- nadjezdy (mosty přes dopravní komunikace),
- mosty říční (mosty přes vodní toky),
- viadukty (mosty přes velká údolí),
- estakády (mosty přes zastavěná území).

c) Podle materiálu nosné konstrukce:

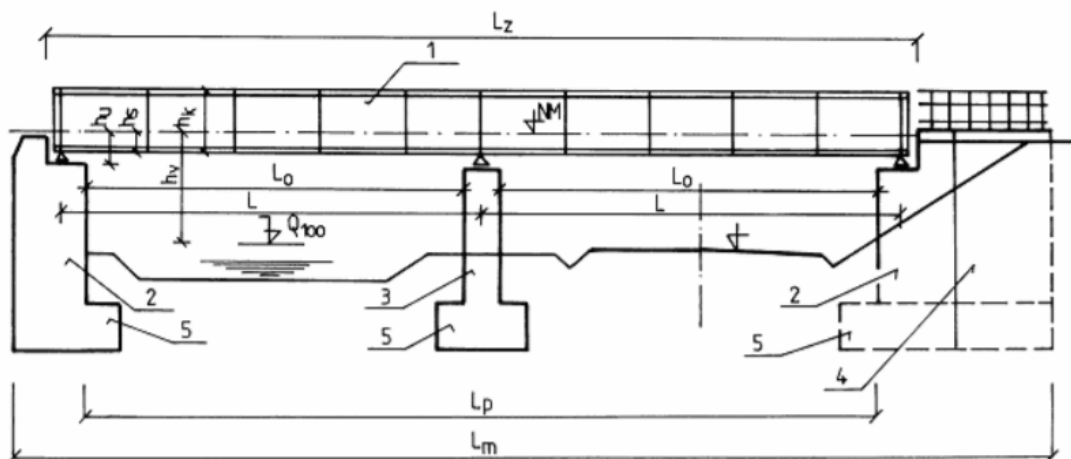
- mosty kovové (mosty z ocele, litiny),
- mosty masivní (mosty betonové, železobetonové, cihelné kamenné),
- mosty dřevěné.

d) Podle doby trvání:

- mosty trvalé,
- mosty zatímní,
- mosty rozebíratelné, (vojenské mosty).

e) Podle počtu polí (o jednom, dvou a více polích).

- f) Podle počtu mostovkových podlaží.
- g) Podle výškové polohy mostovky (s mostovkou horní, dolní, mezilehlou, zapuštěnou, zavěšenou, vzepřenou, s přesypávkou).



Legenda:

- | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| 1 - nosná konstrukce | L_0 - světlost mostního otvoru |
| 2 - krajní podpěra-opěra | L - rozpětí mostního pole |
| 3 - mezilehlá podpěra-pilíř | L_p - délka přemostění |
| 4 - křídlo | L_z - vzdálenost závěrných zdí |
| 5 - základy | L_m - délka mostu |
| NM - niveleta mostu | h_v - volná výška |
| Q_{100} - hladina stoletého průtoku | h_s - stavební výška |
| | h_u - úložná výška |
| | h_k - konstrukční výška |

Obrázek 1 - Návrhové charakteristiky mostního objektu (Vičan, Kabátník, & Reimont, 2002)

3. MOSTNÍ SVRŠEK A MOSTOVKA

Je přímo, nebo nepřímo uložený na nosné konstrukci. Základní geometrické a konstrukční charakteristiky mostního svršku odpovídají druhu dopravy, kterou most převádí.

Drážní mostní svršek tvoří kolejnice, upevňovadla, pražce nebo mostnice, šterkové lože, pojistné úhelníky, mostní podlaha apod. Jeho uložení na ocelovou konstrukci může být realizováno třemi způsoby:

1. kolejnice upevněné na mostnicích,

2. kolejnice upevněné na pražcích v kolejovém loži,
3. kolejnice uložené přímo na nosné konstrukci.

Silniční mostní svršek tvoří vozovka, chodníkové, krajnicové nebo cyklistické zpevnění, odvodňovací proužek, dělicí pás, vyrovnávací vrstvy, izolace apod. V dnešní době se na mostech pozemních komunikací uplatňují živičné vozovky uložené na betonovém nebo ocelovém nosném podkladu. Občas se setkáme s protismykovou úpravou povrchu obrusné vrstvy „modrým nátěrem“, který má řidiče upozornit na možné promrzání daného mostu, zvýšit adhezi daného úseku a snížit tím riziko smyku vozidla.

Mostovka je část nosné konstrukce, která přenáší zatížení z mostního svršku do hlavní nosné konstrukce. Mostovku lze dělit na mostovku prvkovou a mostovku deskovou. Prvková mostovka se u mostů pozemních komunikací již nepoužívá, protože je potřeba ji doplnit o nosný podklad mostního svršku v podobě těžké železobetonové desky, takže hmotnost mostu vzrůstá a stává se neúnosnou.

4. PŘÍSLUŠENSTVÍ MOSTŮ

Jednotlivé prvky mostní konstrukce do značné míry ovlivňují její životnost i náklady na údržbu. Z tohoto důvodu příslušenství mostů prodělalo v poslední době několik technických změn. Jde především o příslušenství mostů, která doplňují každou mostní konstrukci (Pechar, Bureš, & Schindler, 1990).

4.1 Ložiska

Má za úkol přenést všechna zatížení z hlavní nosné konstrukce do spodní stavby a zároveň musí umožnit pootočení případně posun nosné konstrukce. Podle funkce dělíme ložiska na pevná a pohyblivá. Velká část mostů postavených do roku 1990 má ložiska ocelová, v dnešní době se vyrábějí hlavně ložiska elastomerová a jejich různé adaptace. Je možnost mostní stavbu osadit ložiskem s pevnou vodící lištou, které přenášejí pouze horizontální síly.

4.2 Přejímové konstrukce (dilatační závěry)

Musejí splňovat celou řadu vlastností. Musí umožnit posun a pootočení vrchní stavby, musí být odolný proti korozi a otřesům, musí být vyřešeno účinné odvodnění, musí umožnit snadnou údržbu včetně jejich výměny.

4.3 Římsy a chodníky mostů

Římsy slouží k uchycení zábradlí nebo svodidla. Římsy mohou být provedeny jako monolitickým, prefabrikovaným či kombinovaným způsobem. Velice často se při stavbě využívá kombinovaného způsobu zhotovení římsy. Monoliticky vybetonovaná římsa (možno i s chodníkovou částí) osazená lícním prefabrikátem.

4.4 Mostní zábradlí a svodidla

Dominantním materiálem pro výrobu zábradlí je ocel. Vzhledem k pokročilému zpracování oceli mohou zábradlí plnit nejen funkci bezpečnostní, ale i estetickou. Zábradlí osazená na mostech musí splňovat určité rozměrové vlastnosti (minimální výška, rozteče tyčí v zábradlí). Na mostech musí být zábradlí osazeno i na servisních lávkách.

4.5 Odvodnění mostů

Systém odvodnění se skládá ze sběrných ploch, odvodňovačů a odpadního potrubí. Velikost sběrné plochy je dána velikostí odvodňovače. Odvodňovač se skládá ze dvou částí, vrchní část vtoková je zabudována v mostním svršku a spodní výtoková část je zabudována v konstrukci mostu. U malých monolitických deskových konstrukcí (do 15 m) se odvodňovače nenavrhují a voda se odvádí za opěry a odtud mimo most.

5. KLOUBOVÝ PŘÍHRADOVÝ NOSNÍK

Kloubový příhradový nosník můžeme vytvořit kloubovým spojením konců libovolného počtu přímých prutů. Pokud budou osy všech těchto prutů ležet v jedné rovině, můžeme příhradový nosník nazvat rovinným. Nejvýznamnějším rysem příhradových nosníků je, že v prutech přenášejí výhradně normálové zatížení (tah a tlak). (Kadlčák & Kytýr, 1998)

5.1 Výpočet statické určitosti rovinného příhradového nosníku

Rovinný příhradový nosník je staticky určitý, pokud platí rovnost:

$$p + v = 2s ,$$

kde p je počet prutů, v je počet vnějších vazeb a s je počet styčníků.

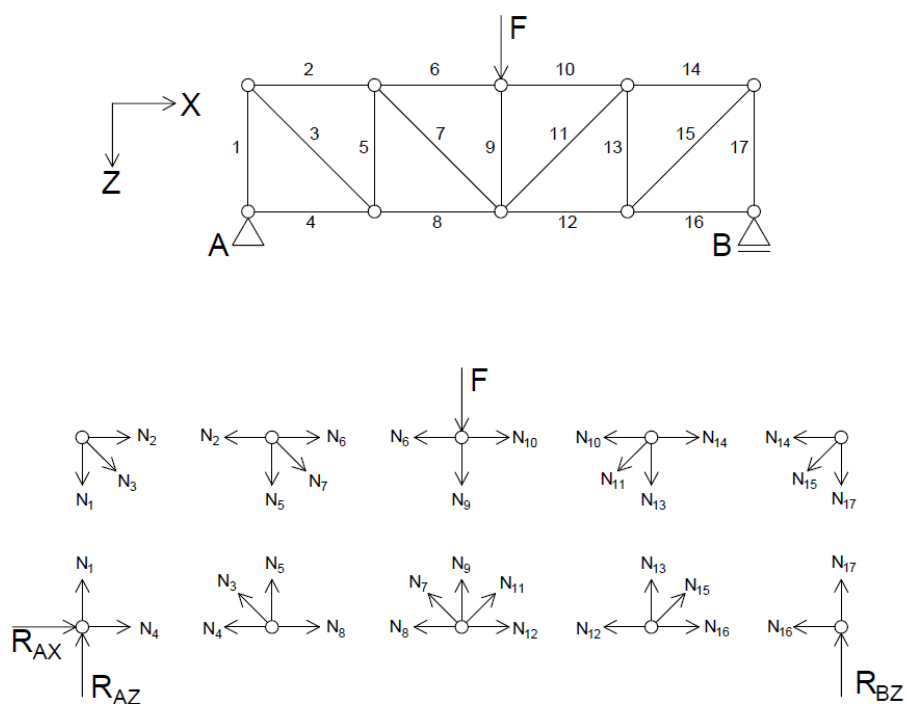
Pokud je rovnost zachována, jedná se o staticky určitý příhradový nosník. Pokud je pravá strana větší nežli levá, je konstrukce staticky neurčitá a pokud je levá strana větší nežli pravá, je konstrukce staticky přeuročitá (mechanismus).

5.2 Metody výpočtu vnitřních sil u příhradových konstrukcí

Základními metodami výpočtu velikosti vnitřních sil u příhradových konstrukcí je obecná styčnicková a průsečná metoda.

5.2.1 Obecná styčnicková metoda

Podstatou této metody je nahrazení vnějších vazeb složkami reakcí a vnitřních vazeb (prutů) jejich interakcemi (normálovými silami v prutech). Tahovým osovým silám odpovídají kladné smysly interakcí. Po provedení výše popsaných úprav dostaneme hmotné body (styčníky), přičemž je každý z nich zatížen rovinným svazkem sil (viz *Obrázek 2*). Pro každý styčník je možno sestavit dvě silové podmínky rovnováhy (ve směru osy x a z). Řešením vzniklé soustavy algebraických rovnic získáme složky vnitřních sil a velikosti vnějších vazeb příhradové konstrukce.

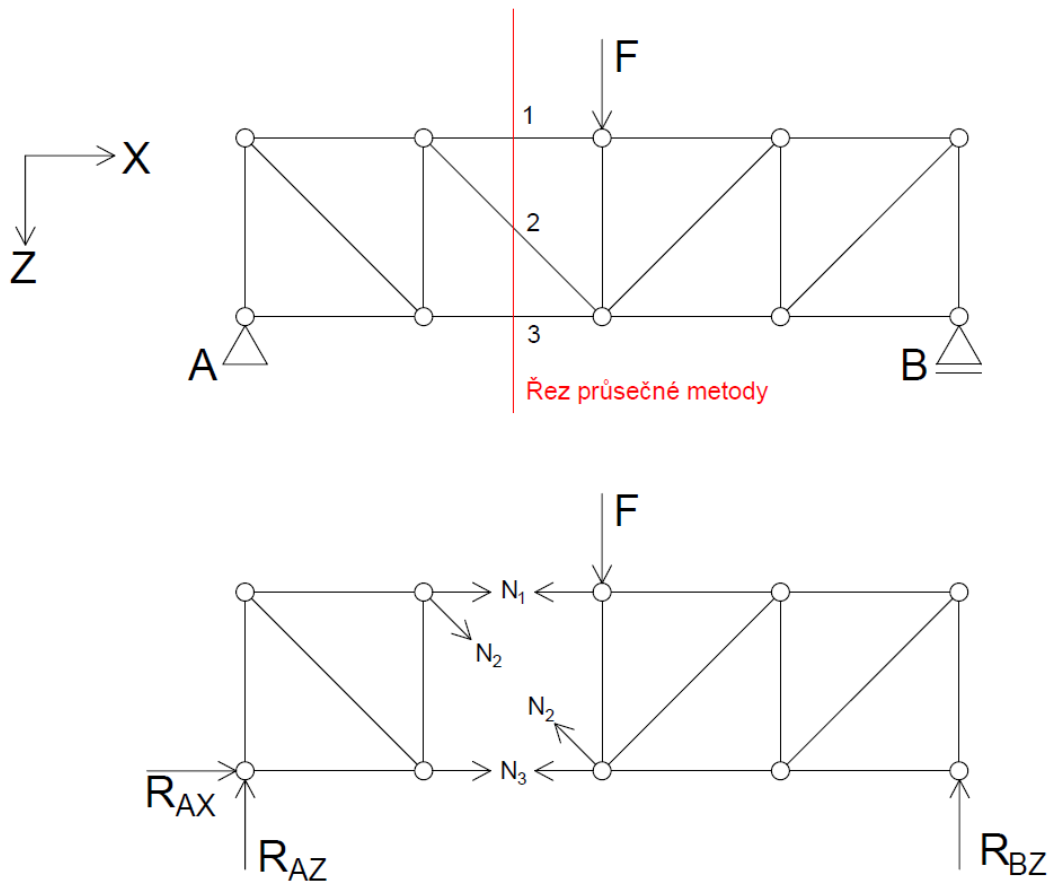


Obrázek 2 - Styčnicková metoda

5.2.2 Průsečná metoda

Průsečná metoda se hodí pro určování vnitřních sil jednoho nebo několika prutů příhradového nosníku. Nejprve vypočítáme velikost reakcí. Poté rozdělíme příhradovou konstrukci myšleným řezem na dvě části a přerušené pruty nahradíme

jejich interakcemi (viz *Obrázek 3*). Myšlený řez může přerušit maximálně tři vnitřní vazby (tři pruty) a zároveň musí konstrukci rozdělit na dvě části. Jako u styčnickové metody jsou tahové síly kladné. Následně pro každou část příhradové konstrukce napíšeme tři rovnice rovnováhy (silovou podle osy x , silovou podle osy z a momentovou) a vyřešíme vzniklou soustavu algebraických rovnic, tím získáme hledané velikosti normálových sil v přerušených nosnících.



Obrázek 3 - Průsečná metoda

6. ZATĚŽOVÁNÍ MOSTŮ – ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY

Dle normy ČSN 73 6209 rozlišujeme dvě zatěžovací zkoušky, a to statickou a dynamickou. Statická zatěžovací zkouška je na rozdíl od dynamické zatěžovací zkoušky méně náročná na vybavení (při statické zatěžovací zkoušce nepotřebujeme budič kmitů s měnitelnou frekvencí). Zatěžovací zkoušky se provádí tehdy, když jsou vyžádané orgánem státní správy, nebo navržené v projektové dokumentaci či

předepsány vedoucím hlavní prohlídky. Pomocí zkoušek jsme schopni posoudit spolehlivost konstrukce mostu a ověřit výpočtové modely.

Při zatěžovací zkoušce se měří přetvárné veličiny. Při statické zatěžovací zkoušce zaznamenáváme především svislý průhyb v místech s největším očekávaným průhybem mostu, pokles podpěr a zatlačení ložisek. Dále je doporučeno sledovat teplotu vzduchu a konstrukce, rychlost větru, sedání základů, vznik a rozvoj trhlin. Podle druhu konstrukce a její velikosti se doporučuje měřit svislé a vodorovné posuny ve více bodech.

Během dynamické zatěžovací zkoušky sledujeme hlavně časový průběh zátěžových charakteristik sil vnášených do konstrukce, rychlost a počet současně projížděných vozidel a dynamická odezva od zvoleného zatížení. Sleduje se také teplota vzduchu a konstrukce, poměrná přetvoření prvků mostní konstrukce, vodorovná odezva a vodorovné posuvy pohyblivých ložisek.

6.1 Statická zatěžovací zkouška

Zkušební zatížení se na konstrukci umísťuje tak, aby ve význačných měřených bodech vyvodilo co největší přetvárné charakteristiky.

Zkušební zatížení musíme na konstrukci umístit v co nejkratší době bez rázů a otřesů (vozidla najíždějí do předepsané polohy rychlostí max 5 km/h). Zkušební zatížení musíme nechat na konstrukci tak dlouho, dokud se měřené veličiny neustálí. Poté změříme zkoumané veličiny a následně konstrukci odlehčíme. Pro odečtení počátečních a koncových hodnot provádíme měření před najetím vozidel, a i po odlehčení (čtení měřených veličin po odlehčení musíme provádět po ustálení měřených veličin).

6.2 Dynamická zatěžovací zkouška

Pro provedení dynamické zatěžovací zkoušky mostů máme více možných zatížení, ze kterých můžeme volit.

- Dynamická zatěžovací zkouška mostů:
 - o buzení pomocí budiče kmitů s měnitelnou frekvencí,

- s použitím vozidel. Konstrukce se pojíždí rychlostmi 5, 10, 15, 20 km/h. Lze rychlost i zvětšovat pomocí násobků 10, vždy však maximálně po rychlost, které je možno na daném mostě dosáhnou.
- Dynamická zatěžovací zkouška lávek pro pěší nebo cyklisty:
 - náhodné přechody chodců po lávce,
 - chůze dvou osob jdoucí krokovou frekvencí,
 - přejezd lehkého nákladního auta (u lávek, které jsou na tento přejezd navrhnuty).

6.3 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

Vyhodnocení zatěžovací zkoušky se provede dle ČSN 73 6209. V této normě jsou uvedeny i mezní hodnoty součinitelů pro betonové i ocelové konstrukce.

Statická zatěžovací zkouška železničního mostu v km 73,943 trati Lovosice-Česká Lípa byla zpracována Kloknerovým ústavem 4. 9. 2013. (ING. IVAN ŠÍR, projektování dopravních staveb a.s., 2012) (ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, 2013) Jako zkušební zatížení byly použity dva kolejové jeřáby EDK 750.

7. POPIS MOSTU A UMÍSTĚNÍ MOSTU

Jedná se o dvoupólový jednokolejný ocelový příhradový most se zapuštěnou prvkovou mostovkou. Křížení je kolmé. V této práci posuzuji první pole tohoto mostu (pole blíže k Lovosicím).

Konstrukce je vně staticky určitá a každý hlavní nosník je desetkrát staticky neurčitý. Ke stavbě mostu byla použita ocel S355 J2+N. Povrch ocelové konstrukce mostu byl ošetřen protikorozní ochranou. Diagonály a stojky jsou ze svařovaného I profilu. Dolní pásnice je svařovaný komorový nosník a horní pásnice je svařovaný TTW profil. Podélníky a příčníky jsou svařované I profily. Na dolní podélné zavětrování byli použity dvojce válcovaného profilu L (2xL110x10 a 2xL100x8). Profil 2xL110x10 je použit v krajních příhradách v ostatních osmi je použit profil 2xL100x8. Horní podélné zavětrování se nachází mezi podélníky mostovky a je tvořeno dvojicí válcovaného profilu L (2xL100x10 a 2xL90x10). V krajních dvou příhradách je použit profil 2xL100x10, v ostatních šesti příhradách je použit profil 2xL90x10. Příčné

zavětrování je umístěno na krajích mostu a ve středu mostu. K příčnému zavětrování byla použita ocelová trubka TR 152x6,3. Podélné zavětrování je ke konstrukci připojeno pomocí šroubového spoje. Byly zde použity dva typy šroubů (M20 10,9 a M24 10,9). Ostatní prvky jsou k sobě spojeny pomocí svarů.

Všechny konstrukční prvky a jejich provedení je patrné z projektové dokumentace poskytnuté od SŽDC a zpracované firmou Ing. Ivan Šír, projektování dopravních staveb a.s.

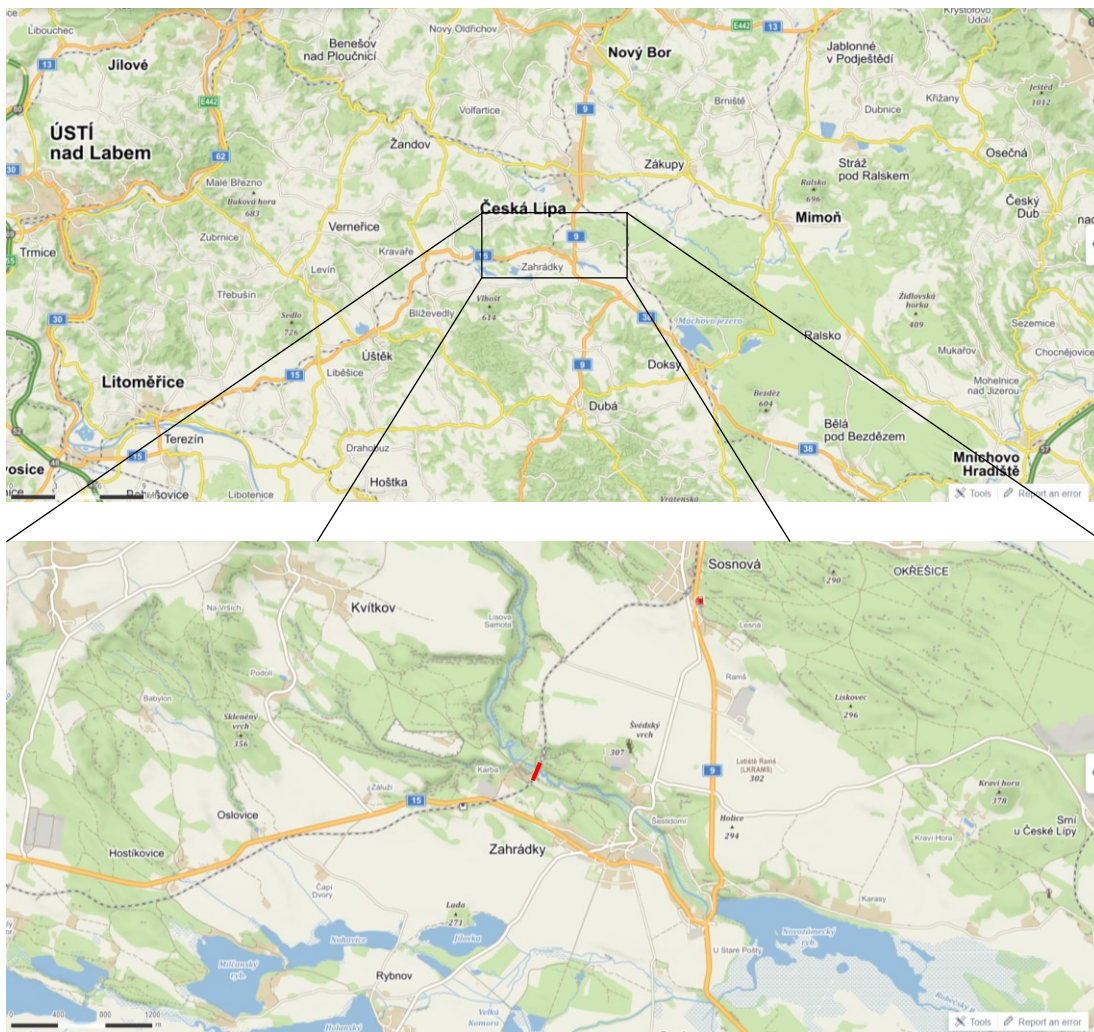


Obrázek 4 - Pohled na most od Lovosické opěry



Obrázek 5 - Pohled na most z polní cesty pod mostem

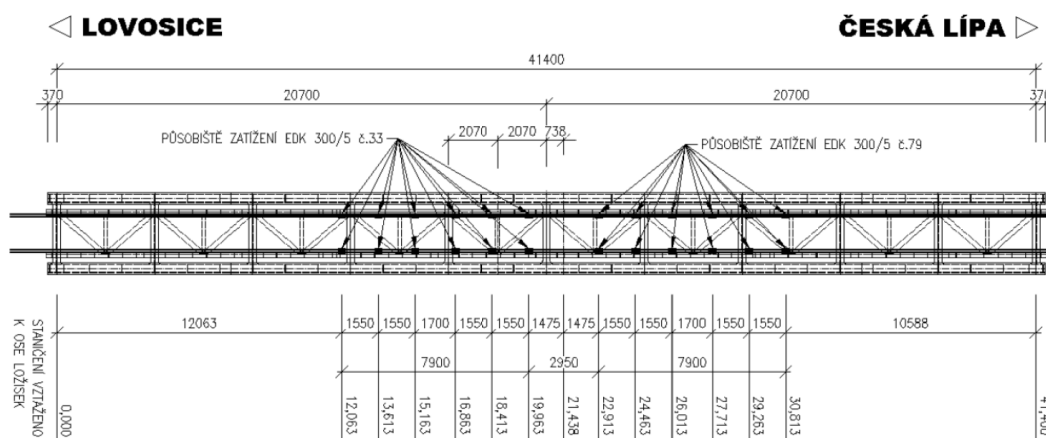
Most se nachází v Libereckém kraji v okrese Česká Lípa nedaleko obce Zahrádky poblíž České Lípy. Most se klene nad údolím vytvořeném Robečským potokem v pískovcovém masivu a propojuje železniční stanice Zahrádky a Česká Lípa hl. n. (GPS 50°38'22.8"N 14°30'53.3"E). Umístění mostu je patrné v *Obrázku 6* získaném z internetové stránky www.mapy.cz.



Obrázek 6 - Umístění mostu v mapovém podkladu (www.mapy.cz)

8. STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA MOSTU V KM 79,943 NA TRATI LOVOSICE – ČESKÁ LÍPA

Zatížení během statické zatěžovací zkoušky bylo umístěno dle Podkladů pro zatěžovací zkoušku zpracovaných firmou Ing. Ivan Šír, projektování dopravních staveb a.s. (Obrázek 7). Přesná velikost zatížení a celý průběh zkoušky byly zapsány v Protokolu o zkoušce (číslo protokolu: 110/13/EXPO), který vypracoval Kloknerův ústav (Tabulka 1).



Obrázek 7 - Umístění zatížení pro zatěžovací zkoušku, (ING. IVAN ŠÍR,
projektování dopravních staveb a.s., 2012)

Tabulka 1 - Velikost zatížení na jednotlivá kola

Působíště	Velikost zatížení		Jeřáb
	Tun	kN	
1A	9,60	94,18	EKD 750 čv. 386
2A	9,76	95,75	
3A	9,85	96,63	
4A	9,70	95,16	
5A	9,60	94,18	
6A	9,40	92,21	
1B	9,90	97,12	
2B	9,50	93,20	
3B	9,70	95,16	
4B	9,86	96,73	
5B	9,40	92,21	
6B	9,60	94,18	

Působíště	Velikost zatížení		Jeřáb
	Tun	kN	
7A	9,53	93,49	EDK 750 čv. 296
8A	9,59	94,08	
9A	9,57	93,88	
10A	9,74	95,55	
11A	9,87	96,82	
12A	9,17	89,96	
7B	9,29	91,13	
8B	9,76	95,75	
9B	9,91	97,22	
10B	9,61	94,27	
11B	10,02	98,30	
12B	9,56	93,78	

Poznámka: působíště číselovaná zleva doprava (směr Lovosice => Česká Lípa) od 1 do 12 a doplněna o písmeno „A“ (viz *Obrázek 7* horní kolej) a písmeno „B“ (viz *Obrázek 7* dolní kolej).

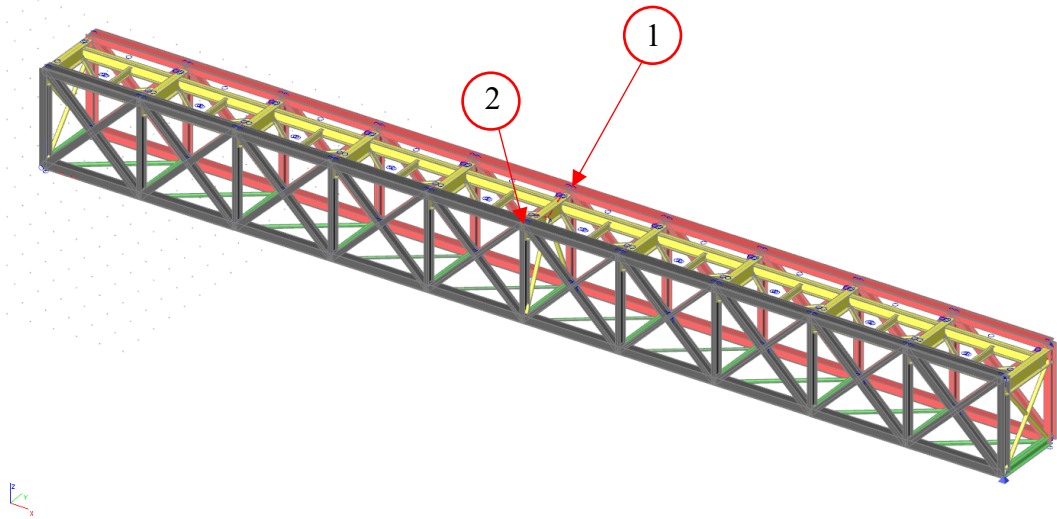
Z protokolu o zatěžovací zkoušce lze vyčíst skutečný průhyb konstrukce vyvolaný výše zmíněným zatížením (viz *Tabulka 2*). Naměřený průhyb v bodech „1“ a „2“ po korekci účinkem stlačení ložisek byl pro bod „1“ 43,64 mm a pro bod „2“ 43,09 mm.

Tabulka 2 - Průhyb naměřený během statické zatěžovací zkoušky Kloknerovým ústavem

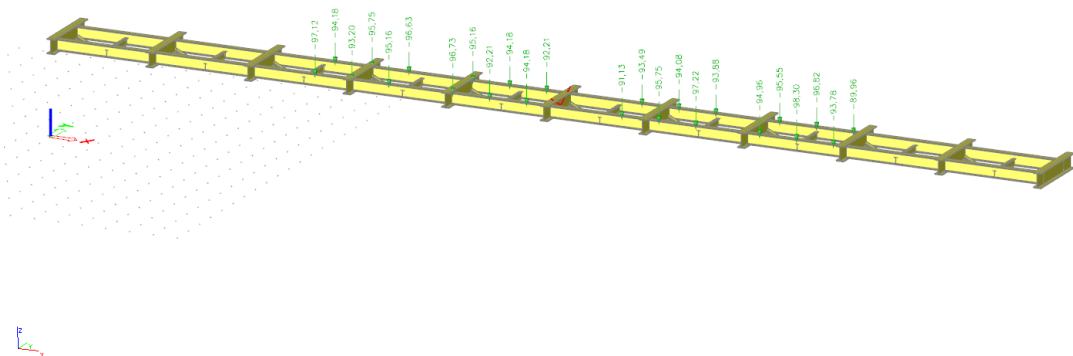
Skutečný průhyb v bodě 1 (mm)	Skutečný průhyb v bodě 2 (mm)
43,64	43,09

9. VÝPOČTOVÝ MODEL

Výpočtový model byl vytvořen za pomoci programu SCIA Engineer 17.01 v obecném prostoru XYZ dle výkresové dokumentace zpracované firmou Ing. Ivan Šír, projektování dopravních staveb a.s. Podpory byly převzaty ze zpracovaného modelu použitého v Podkladech pro zatěžovací zkoušku.



Obrázek 8 - Výpočtový model z programu SCIA Engineer 17.01



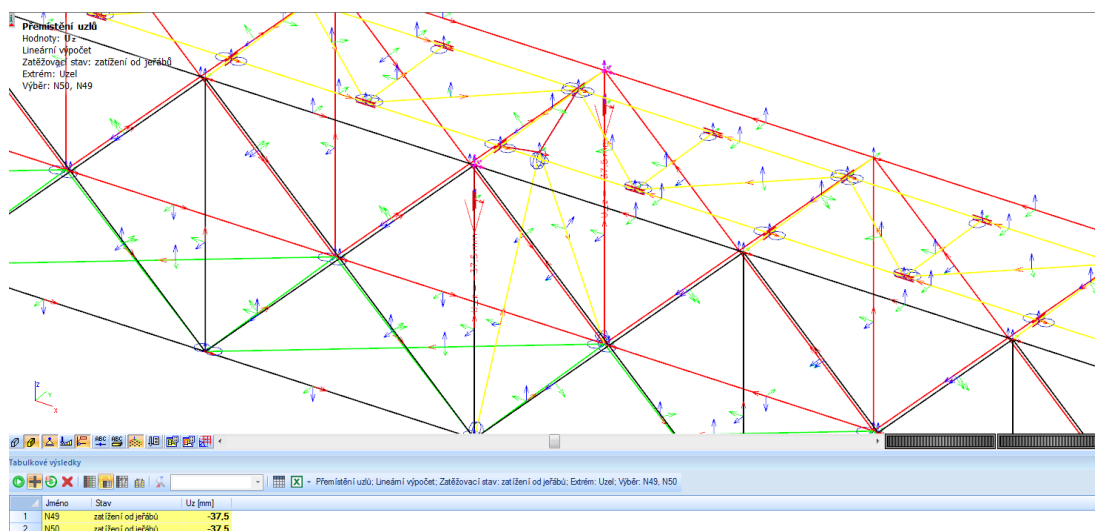
Obrázek 9 - Umístění zatížení na podélníky

9.1 Výpočtový model se shodnou tuhostí všech styčniců

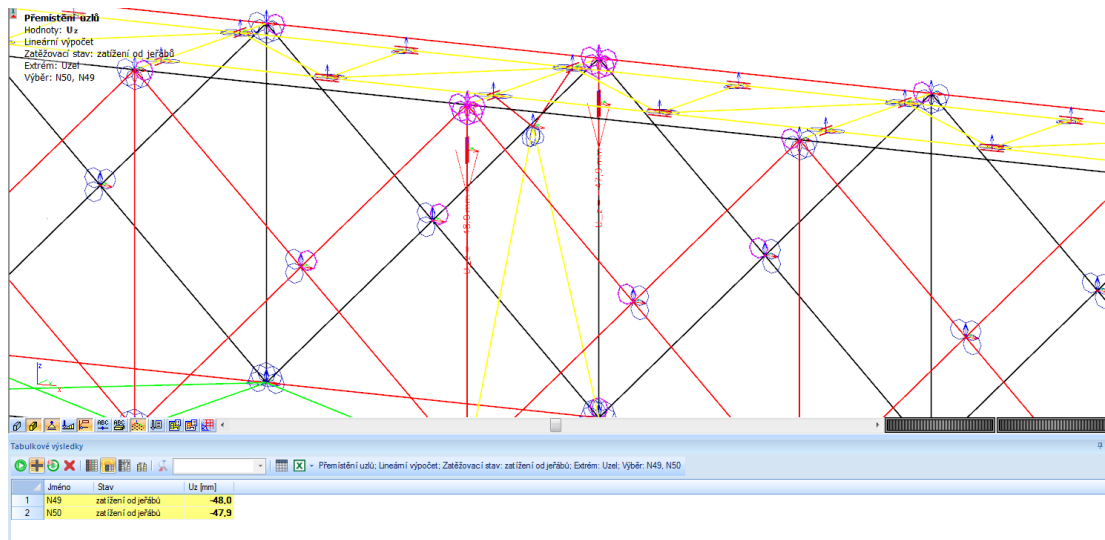
Nejdříve jsem určil limitní hodnoty možných průhybů. Pro získání těchto hodnot byly vytvořeny dva výpočtové modely. První výpočtový model (Model 1) byl vytvořen s dokonale tuhým spojením ve styčnicích. Druhý výpočtový model (Model 2) byl na rozdíl od Modelu 1 doplněn o ideální klouby na styčnicích hlavního nosníku. Průhyby obou nosníků byly změřeny ve styčnicích, ve kterých se měřily průhyby i při zatěžovací zkoušce, kterou provedl Kloknerův ústav. Výsledné průhyby viz *Tabulka 3*.

Tabulka 3 - Průhyby limitních případů

Zatěžovací Model	Výsledný sledovaný průhyb v styčnicu (x) v mm	
	1	2
Kloknerův ústav	43,64	43,09
Model 1 (tuhé styčnice)	37,5	37,5
Model 2 (ideální klouby)	48,0	47,9

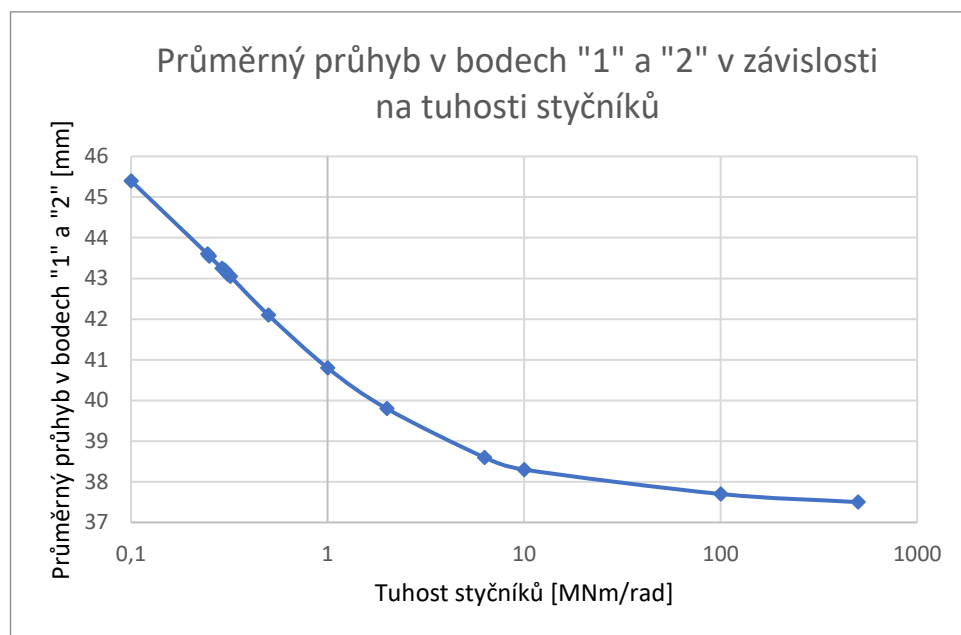


Obrázek 10 - Průhyby v programu SCIA Engineer 17.01 Model1

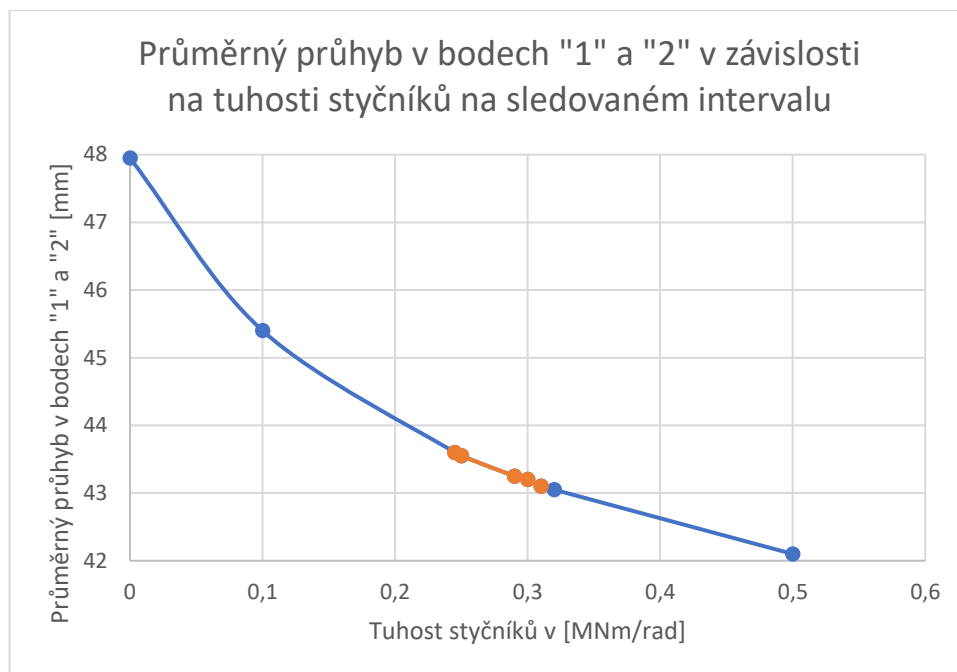


Obrázek 11 - Průhyby v programu SCIA Engineer 17.01 Model 2

Následně jsem vytvářel výpočtové modely s tuhostí styčníků pohybující se mezi 0 – 500 MNm/rad, přičemž danou tuhost měly všechny styčníky stejnou. Výsledné průhyby v bodech „1“ a „2“ jsem porovnával s průhybem naměřeným během zatěžovací zkoušky, kterou provedl Kloknerův ústav (43,64 mm a 43,09 mm). Zobrazení průhybů vypadalo stejně jako na Obrázku 10 a Obrázku 11 jen s rozdílnými hodnotami pro vypočtený průhyb. Výsledné průhyby viz Graf 1 a Graf 2 a Tabulka 4.



Graf 1 - Závislost průhybů na tuhosti styčníků (všechny styčníky mají stejnou tuhost)



Graf 2 - Závislost průhybu na tuhosti styčnicků na sledovaném intervalu s vyznačenými hledanými hodnotami (všechny styčnický mají stejnou tuhost)

Na *Grafu 2* je zvýrazněn interval, který se pohybuje mezi hodnotami naměřenými během statické zatěžovací zkoušky.

Tabulka 4 - Závislost průhybů na zvolené tuhosti styčnicků

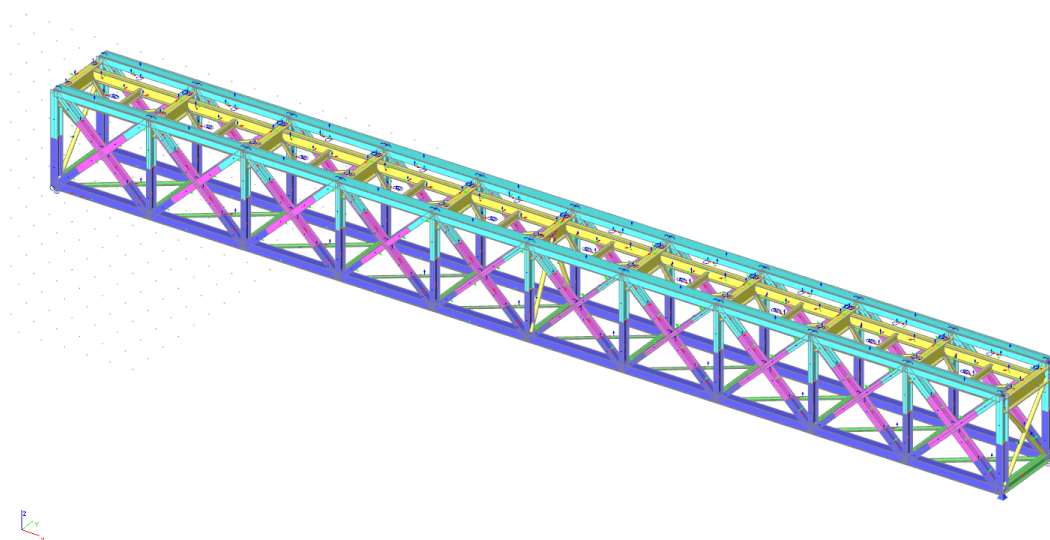
Tuhost styčnicků	Průhyb hlavní nosné konstrukce v bodech	
	1	2
[MNm/rad]	[mm]	[mm]
0 (volný kloub)	48,0	47,9
0,1	45,4	45,4
0,245	43,6	43,6
0,25	43,6	43,5
0,29	43,3	43,2
0,3	43,2	43,2
0,31	43,1	43,1
0,32	43,1	43,0
0,5	42,1	42,1
1	40,8	40,8
2	39,8	39,8
$2 \cdot \pi$	38,6	38,6
10	38,3	38,3
100	37,7	37,7
500	37,5	37,5

V *Tabulce 4* jsou hodnoty tuhosti styčnicků seřazené podle velikosti, avšak během hledání tuhosti, která by odpovídala naměřeným hodnotám, se postupovalo odlišně. Všechny hodnoty tuhostí styčnicků z *Tabulky 4* byly získané pomocí iterační metody, přičemž cílem bylo nalézt takovou tuhost, která by odpovídala naměřeným průhybům ze zatěžovací zkoušky.

Z *Tabulky 4* vyplývá, že tuhost styčnickového spoje o velikost 500 MNm/rad odpovídá vetknutému spoji – viz *Tabulka 3*. Hledaná tuhost styčnicků se pohybuje mezi 0,25 MNm/rad a 0,31 MNm/rad (pokud uvažujeme tuhost ve všech styčnicích stejnou). Také z této tabulky plyne, že čím je tuhost styčnicků větší, tím je menší průhyb, resp. čím je menší tuhost, tím je větší průhyb. Průhyb s ideálním kloubem vyšel o 10,5 mm (resp. 10,4 mm) větší nežli průhyb s vetknutými styčnicíky.

9.2 Výpočtový model s rozdílnou tuhostí styčnicků v horní a dolní pásnici

Podle velikosti styčnickových plechů u každého styčnickového spoje jsem odhadl, že tuhosti styčnicků v horní pásnici budou větší nežli tuhosti v dolní pásnici. Tuhosti styčnicků na stycích diagonál byly brány jako aritmetický průměr tuhostí styčnicků horní a dolní pásnice. Pro tento případ jsem upravil původní výpočtový model v programu SCIA Engineer 17.01 (viz *Obrázek 12*) a poté hledal možné kombinace tuhostí, pro které by byl výsledný průhyb stejný jako průhyb naměřený během zatěžovací zkoušky provedené Kloknerovým ústavem. Zatížení zůstalo stejné jako v předchozím zatěžovacím modelu.



Obrázek 12 - Zatěžovací model pro výpočty s rozdílnou tuhostí styčnicků

Veškeré výsledky a zvolené kombinace jsou patrné z *Tabulky 5*. Hodnoty tuhostí, odpovídající limitujícím průhybům konstrukce známé ze zatěžovací zkoušky, jsou znázorněné v *Grafu 3*.

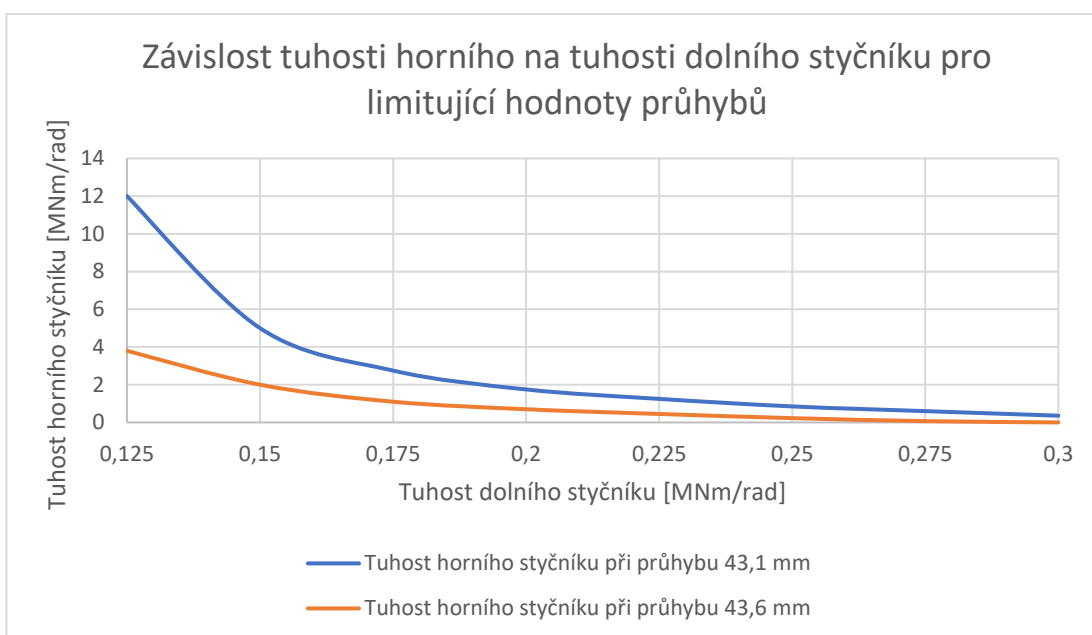
Tabulka 5 - Závislost průhybu na různé tuhosti styčnicků v horní a dolní pásnici

Tuhost styčnicku dle umístění			Průhyby v bodech	
Dolní	Horní	Středový	1	2
[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[mm]	[mm]
0	1	0,5	47,2	47,1
0	5	2,5	45,3	46,3
0	500	250	45,6	45,6
0,05	1	0,525	45,7	45,7
0,05	2	1,025	45,3	45,3
0,05	10	5,025	44,6	44,6
0,05	50	25,025	44,2	44,2
0,05	500	250,025	44,1	44,1
0,075	50	25,0375	43,7	43,7
0,075	100	50,0375	43,6	43,6
0,075	500	250,0375	43,5	43,5
0,1	10	5,05	43,6	43,6
0,1	20	10,05	43,4	43,4
0,1	50	25,05	43,2	43,2
0,1	100	50,05	43,1	43,1
0,1	500	250,05	43,1	43,1
0,125	3,8	1,9625	43,6	43,6
0,125	4	2,0625	43,6	43,5
0,125	10	5,0625	43,2	43,2
0,125	12	6,0625	43,1	43,1
0,15	1	0,575	44,0	44,0
0,15	2	1,075	43,6	43,6
0,15	3	1,575	43,4	43,4
0,15	5	2,575	43,1	43,1
0,15	10	5,075	42,8	42,8
0,15	50	25,075	42,5	42,5
0,15	100	50,075	42,4	42,4
0,175	0,9	0,5375	43,8	43,7
0,175	1	0,5875	43,7	43,7
0,175	1,1	0,6375	43,6	43,6
0,175	2,5	1,3375	43,2	43,2
0,175	2,75	1,4625	43,1	43,1

Tuhost styčníku dle umístění			Průhyby v bodech	
Dolní	Horní	Středový	1	2
[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[mm]	[mm]
0,2	0,5	0,35	43,8	43,7
0,2	0,6	0,4	43,7	43,7
0,2	0,7	0,45	43,6	43,6
0,2	1	0,6	43,4	43,4
0,2	1,5	0,85	43,2	43,2
0,2	1,6	0,9	43,2	43,2
0,2	1,7	0,95	43,1	43,2
0,2	1,75	0,975	43,1	43,1
0,2	2,5	1,35	42,9	42,9
0,2	5	2,6	42,6	42,6
0,225	0,45	0,3375	43,6	43,6
0,225	0,5	0,3625	43,6	43,5
0,225	0,55	0,3875	43,5	43,5
0,225	0,6	0,4125	43,5	43,4
0,225	1,25	0,7375	43,1	43,1
0,225	1,3	0,7625	43,0	43,1
0,25	0,23	0,24	43,6	43,6
0,25	0,25	0,25	43,6	43,5
0,25	0,85	0,55	43,1	43,1
0,25	0,9	0,575	43,1	43,0
0,25	0,95	0,6	43,1	43,0
0,25	1	0,625	43,0	43,0
0,275	0,05	0,1625	43,7	43,6
0,275	0,07	0,1725	43,6	43,6
0,275	0,3	0,2875	43,4	43,3
0,275	0,5	0,3875	43,2	43,1
0,275	0,6	0,4375	43,1	43,1
0,3	0	0,15	43,6	43,5
0,3	0,05	0,175	43,5	43,4
0,3	0,15	0,225	43,4	43,3
0,3	0,25	0,275	43,3	43,2
0,3	0,32	0,31	43,2	43,1
0,3	0,34	0,32	43,2	43,1
0,3	0,36	0,33	43,1	43,1
Limitní hodnoty průhybů				
Průhyby pohybující se v intervalu				
Průhyby mimo hledaný interval				

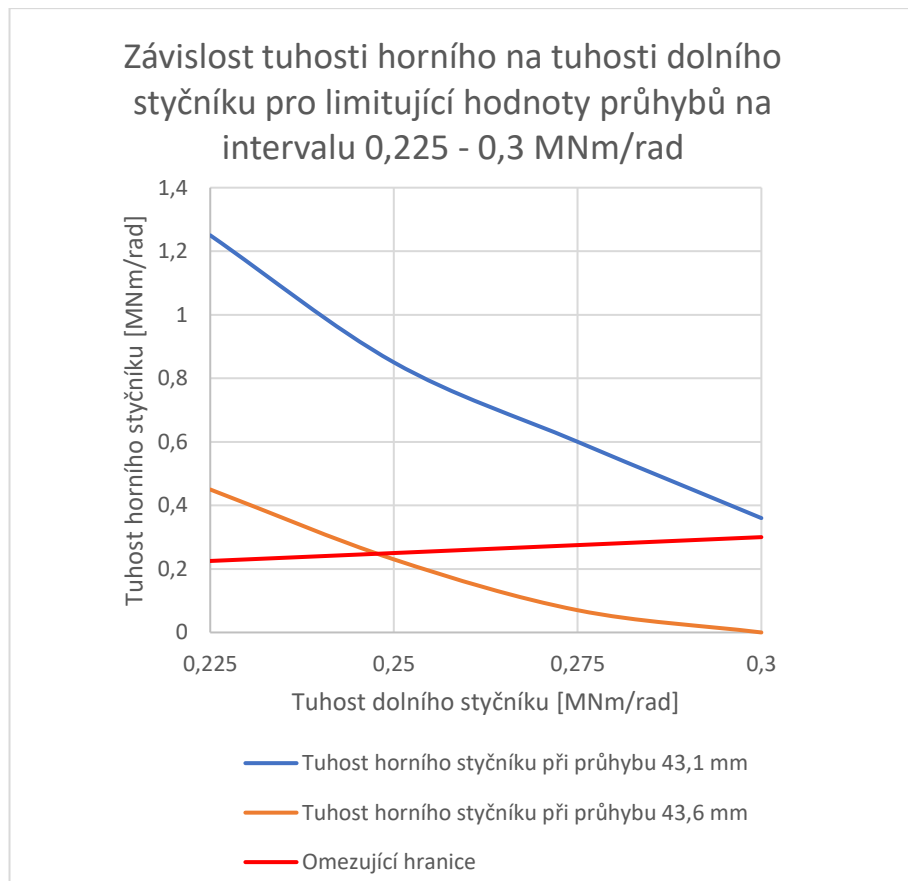
V *Tabulce 5* jsou barevně odlišeny různé možnosti výsledných průhybů. Červeně jsou označeny průhyby pohybující se mimo limitní naměřené hodnoty průhybů (tj. 43,1 a 43,6 mm), oranžově jsou označeny hodnoty průhybů, které se pohybují v mezích hodnot limitních průhybů a zeleně jsou označeny průhyby, které odpovídají limitním hodnotám průhybů.

Při hledání různých kombinací tuhostí styčnicků v horní a dolní pásnici, pro které by platilo, že výsledný průhyb bude mezi 43,1 a 43,6 mm, jsem použil iterační metodu.



Graf 3 - Závislost tuhosti horního a dolního styčnicku pro limitující hodnoty průhybů

V *Grafu 3* jsou znázorněné jen hodnoty tuhostí styčnicků v horní pásnici, které byly max. dvacetinásobkem hodnoty tuhosti v dolní pásnici. Proto graf zanedbává všechny hodnoty pro tuhost dolní pásnice menší nežli 0,125 MNm/rad. Hodnoty tuhostí styčnicků na diagonálách byly brány jako aritmetický průměr tuhostí styčnicků na horní a dolní pásnici.



Graf 4 - Závislost tuhosti horního na tuhosti dolního styčnicku pro limitující hodnoty průhybů na intervalu 0,225-0,3 MNm/rad

Ke konci průběhů závislosti tuhostí pro dané mezní průhyby v *Grafu 3* se dostáváme do oblasti, ve které začíná být tuhost horních styčnicků menší nežli tuhost dolních styčnicků i přesto, že je splněna podmínka mezních průhybů. Tato skutečnost je patrná z *Grafu 4*, ve kterém vidíme červeně zvýrazněnou hranici, pod kterou se nachází body nevyhovující podmínce, že tuhost horních styčnicků je větší než tuhost dolních styčnicků.

9.2.1 Vliv velikosti tuhosti středových styčnicků na výsledný průhyb konstrukce

Pro zkoumání vlivu tuhosti středových styčnicků jsem použil stejný výpočtový model jako v případě rozdílné tuhosti v horních styčnicích a dolních styčnicích, a tuhosti ve středových styčnicích vypočítané pomocí aritmetického průměru. Předchozí předpoklad o nižší tuhosti dolních styčnicků doplníme o předpoklad, že středové styčnický budou mít kvůli své velikosti nejnižší tuhost. Pro hledání výsledných tuhostí středových styčnicků jsem zvolil různé kombinace tuhostí horních a dolních styčnicků. Tyto zvolené tuhosti odpovídají mezním průhybům získaných v předchozí kapitole.

Tabulka 6 - Závislost hodnoty tuhosti středových styčnicků na zvolené hodnotě tuhosti horních a dolních styčnicků

Tuhost styčnicku dle umístění			Průhyby v bodech	
Dolní	Horní	Středový	1	2
[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[mm]	[mm]
0,125	3,8	1,9625	43,6	43,6
0,125	3,8	0,125	43,6	43,6
0,125	3,8	0	43,6	43,6
0,125	12	6,0625	43,1	43,1
0,125	12	0	43,1	43,1
0,15	2	1,075	43,6	43,6
0,15	2	0	43,6	43,6
0,15	5	2,575	43,1	43,1
0,15	5	0	43,1	43,1
0,175	1,1	0,6375	43,6	43,6
0,175	1,1	0	43,7	43,6
0,175	1,1	0,175	43,7	43,6
0,175	2,75	1,4625	43,1	43,1
0,175	2,75	0	43,1	43,1
0,2	0,7	0,45	43,6	43,6
0,2	0,7	0	43,6	43,6
0,2	1,75	0,975	43,1	43,1
0,2	1,75	0	43,1	43,1
0,225	0,45	0,3375	43,6	43,6
0,225	0,45	0	43,6	43,6
0,225	1,25	0,7375	43,1	43,1
0,225	1,25	0	43,1	43,1
0,25	0,23	0,24	43,6	43,6
0,25	0,23	0	43,6	43,6
0,25	0,85	0,55	43,1	43,1
0,25	0,85	0	43,1	43,1
0,275	0,07	0,1725	43,6	43,6
0,275	0,07	0	43,6	43,6
0,275	0,6	0,4375	43,1	43,1
0,275	0,6	0	43,1	43,1
0,3	0	0,15	43,6	43,5
0,3	0	0	43,6	43,5
0,3	0,36	0,33	43,1	43,1
0,3	0,36	0	43,1	43,1

V Tabulce 6 jsou hodnoty zaznamenány podle toho, jak byly získávané (začal jsem od modelu s nejnižší tuhostí dolních styčnicků a postupoval jsem k modelům s větší tuhostí

dolních styčniců). Vždy je u každé získané hodnoty průhybu zapsána hodnota průhybu a kombinace tuhostí, ze které se vycházelo. Z *Tabulky 6* vyplývá, že tuhost středových styčniců významně neovlivňuje výsledný průhyb konstrukce.

9.3 Výpočtový model s náhodnými tuhostmi styčniců pomocí simulačních metod Monte Carlo a LHS

Dalším krokem k realitě je použití simulačních metod. Během zatěžovací zkoušky byl v bodech 1 a 2 naměřen rozdílný průhyb, i když se oba body nacházely ve středu mostu, každý byl na jiném hlavním nosníku. Ideální modely z předchozích kapitol nemohou docílit průhybu získanému během zatěžovací zkoušky.

Pro další výpočtové modely jsem nejprve musel přepracovat model v programu SCIA Engineer 17.01, ve kterém bylo nezbytné rozdělit každý prvek horní a dolní pásnice na dvě poloviny (*Obrázek 13*). Poté jsem v programu Microsoft Excel generoval tuhosti pomocí statistických metod Monte Carlo a LHS.

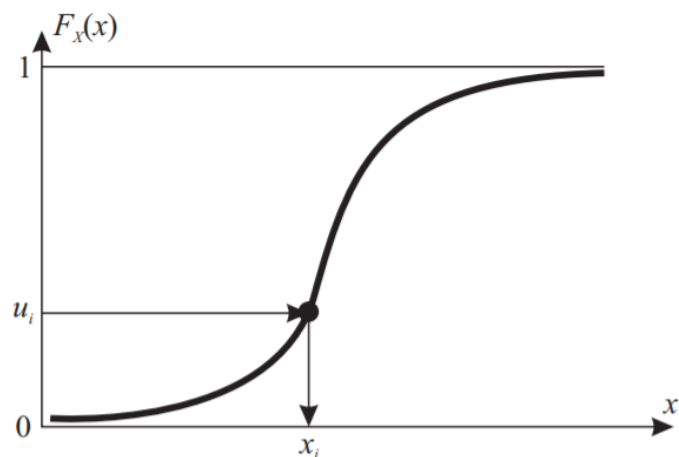
9.3.1 Simulační modely typu Monte Carlo

Všechny simulační modely typu Monte Carlo mají společný rys, a to opakované numerické simulace řešeného problému. Náhodné veličiny jsou získávány inverzní transformací distribuční funkce na základě generovaných náhodných čísel z intervalu od 0 do 1. (Sadílek, Doležel, & Vořechovský, 2010)

- Monte Carlo

Pro přesný odhad statických parametrů odezvy konstrukce pomocí této metody je zapotřebí velký počet simulací. Počet simulací N se volí v závislosti na pravděpodobnosti poruchy a odhadu variačního koeficientu pravděpodobnosti poruchy.

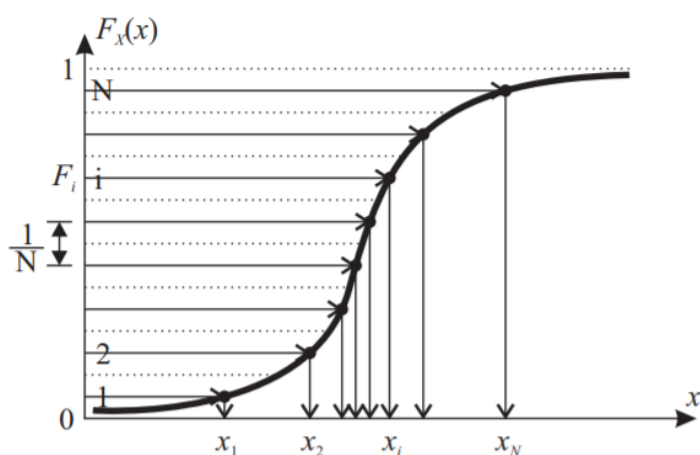
$$N = \frac{1}{p_f CoV^2}$$



Obrázek 13 - Generování náhodné veličiny inverzní transformací distribuční funkce (Sadílek, Doležel, & Vořechovský, 2010)

- LHS (Latin Hypercube Sampling)

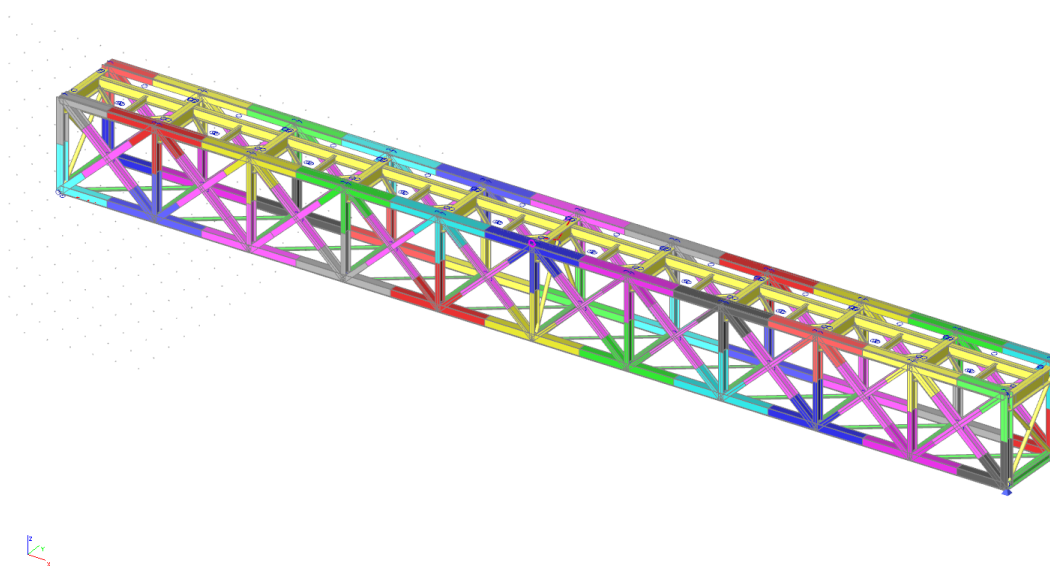
LHS je modifikovaná metoda Monte Carlo. Spadá do souboru metod, které redukuje rozptyl. Výhodou metody LHS oproti metodě Monte Carlo je, že obvykle je zapotřebí menší počet simulací při zachování významnosti odhadů statických parametrů odezvy konstrukce. Definiční obor distribuční funkce náhodné veličiny je rozdělen na N intervalů o stejné pravděpodobnosti $1/N$. Díky tomu získáme hodnoty rovnoměrně rozložené po celém průběhu distribuční funkce.



Obrázek 14 - Rozdělení definičního oboru distribuční funkce - metoda LHS (Sadílek, Doležel, & Vořechovský, 2010)

9.3.2 Použití simulačních metod modelu mostu

V programu Microsoft Excel jsem pomocí metody Monte Carlo vygeneroval 3x44 náhodných hodnot tuhostí se střední hodnotou 0,2775 MNm/rad, což je průměr mezních tuhostí z výpočtového modelu se shodnou tuhostí všech styčníků (0,245 MNm/rad a 0,31 MNm/rad), a korelačním koeficientem 5 % viz *Tabulka 7*. Tuhosti středových styčníků se uvažují nulové (ideální kloub), protože z předchozí kapitoly vyplývá, že výrazně neovlivňují výsledek.

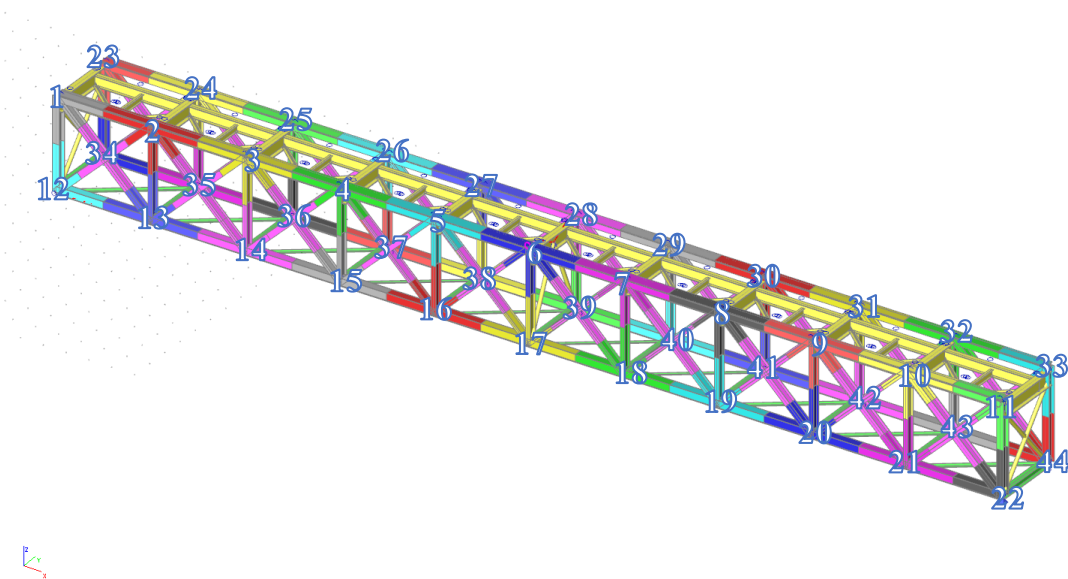


Obrázek 15 - Model konstrukce v Programu SCIA Engineer 17.01 pro výpočtový model s volenou tuhostí styčníků pomocí simulačních metod

Tabulka 7 - Hodnoty tuhostí jednotlivých styčníků získané pomocí metody Monte Carlo s korelačním koeficientem 5 %

Číslo styčniku	Model		
	1	2	3
	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]
1	0,27668	0,293965	0,272908
2	0,274935	0,279571	0,275983
3	0,284736	0,280262	0,298057
4	0,258459	0,256315	0,284507
5	0,277434	0,279289	0,281678
6	0,279294	0,256243	0,286868
7	0,262163	0,309283	0,274122
8	0,279989	0,29009	0,280392
9	0,283155	0,277536	0,231051
10	0,284415	0,251726	0,295556
11	0,277294	0,285066	0,294923
12	0,27979	0,28329	0,290756
13	0,256663	0,272131	0,261968
14	0,263428	0,292268	0,292347
15	0,270821	0,275678	0,271041
16	0,289346	0,299997	0,267621
17	0,258534	0,289988	0,268353
18	0,265963	0,294768	0,246408
19	0,2901	0,274088	0,282071
20	0,272135	0,29073	0,287398
21	0,2873	0,278865	0,28388
22	0,26587	0,263065	0,241903
23	0,26845	0,280425	0,275702
24	0,255351	0,277591	0,25909
25	0,256502	0,28782	0,262176
26	0,283174	0,266274	0,263895
27	0,289616	0,275365	0,243845
28	0,28484	0,291484	0,301809
29	0,266804	0,277568	0,269381
30	0,288224	0,307771	0,287085
31	0,271388	0,290044	0,274503
32	0,266761	0,274295	0,276258
33	0,258687	0,26686	0,288576
34	0,264215	0,267716	0,265296
35	0,273607	0,28793	0,281803
36	0,272118	0,264223	0,289638
37	0,27376	0,302342	0,274896
38	0,296784	0,263891	0,289225
39	0,264777	0,255093	0,266375
40	0,293468	0,260846	0,274875
41	0,273726	0,294266	0,311004
42	0,291852	0,274546	0,274569
43	0,288424	0,272052	0,27316
44	0,280407	0,278935	0,267008

V *Tabulce 7* jsou uvedeny tuhosti styčnicků, které byly pomocí čísla přiřazeny jednotlivým styčnickům. Čísla styčnicků jsou zakreslena v *Obrázku 16*.



Obrázek 16 - Očíslování jednotlivých styčnicků na horním a dolním pásu

Pro každou kombinaci 44 tuhostí styčnicků jsem získal výsledný průhyb ve sledovaných bodech „1“ a „2“ (viz *Tabulka 8*).

Tabulka 8 - Výsledné průhyby při korelačním koeficientu 5 %

Číslo modelu	Průhyb v bodě	
	1 [mm]	2[mm]
1	43,4	43,3
2	43,3	43,3
3	43,4	43,3

Z *Tabulky 8* vidíme, že při stejném korelačním koeficientu se průhyb konstrukce pohybuje kolem konstantních hodnot (pro bod „1“ 43,366 mm a pro bod „2“ 43,3 mm). Z tohoto důvodu se v hledání průhybů konstrukce s různou tuhostí styčnicků omezíme na jeden model pro jeden určitý korelační koeficient.

Pomocí metody Monte Carlo jsem vygeneroval 44 různých tuhostí s korelačním koeficientem 10, 15 a 20 % (viz *Tabulka 14*). Pro každý soubor 44 tuhostí při daném korelačním koeficientu byl vytvořen výpočtový model a získány průhyby v bodě „1“ a „2“.

Tabulka 9 - Průhyb ve význačných bodech s korelačními koeficienty 10 %, 15 % a 20 % (tuhosti styčnicků získané pomocí metody Monte Carlo)

Korelační koeficient	Průhyb v bodě	
	1	2
[%]	[mm]	[mm]
10	43,4	43,4
15	43,4	43,4
20	43,4	43,5

Při porovnání průhybů v závislosti na korelačním koeficientu zjistíme, že při větším korelačním koeficientu se průhyb změnil jen minimálně. Hodnoty, které jsem pomocí metody Monte Carlo vygeneroval v programu Microsoft Excel, se pohybují okolo střední hodnoty tuhosti (0,2775 MNm/rad). Z předchozích výpočtových modelů vyplývá, že změna průhybu je výraznější při snížení tuhosti nežli při zvýšení tuhosti.

Pro tento model byly pro porovnání vygenerovány hodnoty tuhostí i pomocí metody LHS s korelačním koeficientem 10 % a 20 %. Hodnoty tuhostí pro jednotlivé styčnický viz *Tabulka 15*.

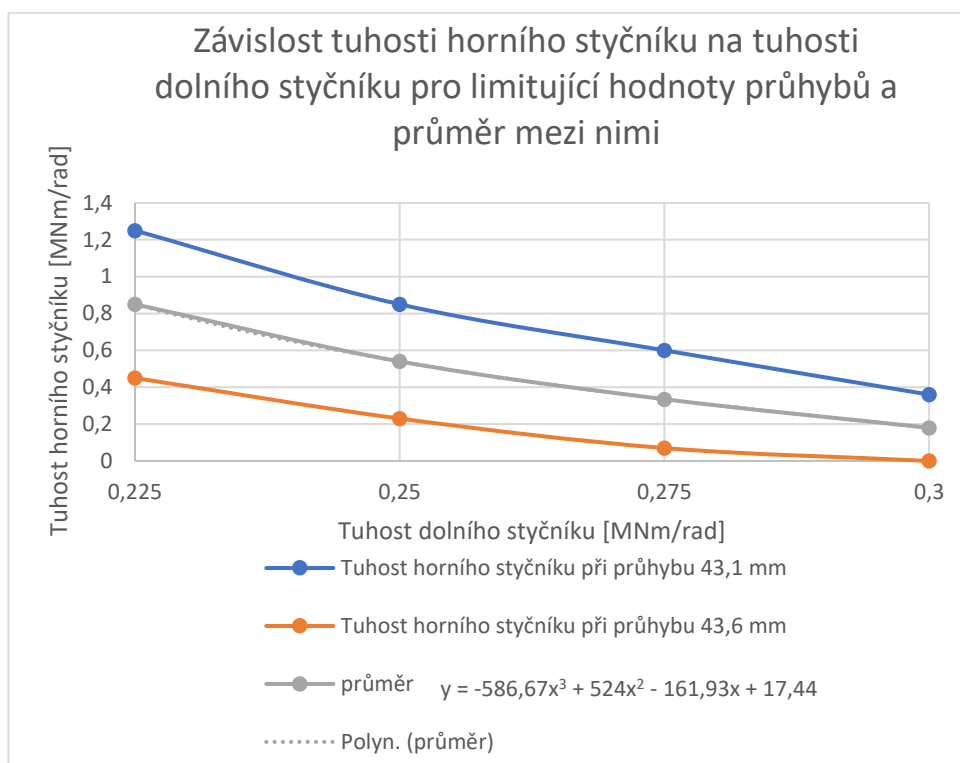
Tabulka 10 - Průhyb ve význačných bodech s korelačními koeficienty 10 % a 20 % (tuhosti styčnicků získané pomocí metody LHS)

Korelační koeficient	Průhyb v bodě	
	1	2
[%]	[mm]	[mm]
10	43,3	43,3
20	43,3	43,3

Průhyby získané pomocí metody LHS a metody Monte Carlo se od sebe liší jen minimálně. Všechny naměřené hodnoty se pohybují okolo průměrného průhybu konstrukce (43,35 mm).

Pro další výpočtový model použijeme poznatky získané z kapitol „Výpočtový model s rozdílnou tuhostí styčnicků v horní a dolní pásnici“ a „Vliv velikosti tuhosti středových styčnicků na výsledný průhyb konstrukce“. V tomto modelu budeme horním styčnickům přiřazovat náhodné hodnoty tuhostí, které se pohybují kolem nějaké střední hodnoty. Tuhost středových styčnicků ponecháme nulovou. Tuhosti dolních styčnicků se budou pohybovat kolem konkrétní střední hodnoty.

Střední hodnoty horních a dolních styčníků získáme z upraveného *Grafu 3* závislosti tuhosti horních styčnicku na tuhosti dolních styčnicků, do kterého jsem přidal křivku vyznačující průměr mezi průběhem křivek znázorňující tuhost horního styčnicku při průhybu 43,1 mm a 43,6 mm (*Graf 5*). Pro křivku průměru jsem získal polynomickou spojnicí trendu (*Rovnice 1*). Pokud dosadíme do *Rovnice 1* zvolenou tuhost dolního styčnicku, získáme tuhost horního styčnicku (*Tabulka 11*).



Graf 5 - Závislost tuhosti horního styčnicku na tuhosti dolního styčnicku pro limitující hodnoty průhybů a průměr mezi nimi

Rovnice 1 - Závislost tuhosti horního styčnicku na tuhosti dolního styčnicku

$$y = -586,67x^3 + 524x^2 - 161,93x + 17,44$$

Tabulka 11 - Střední hodnoty horních a dolních styčnicků

Střední hodnota tuhostí dolních styčnicků [MNm/rad]	Střední hodnota tuhostí horních styčnicků [MNm/rad]
0,23	0,78
0,25	0,54
0,27	0,37

Pomocí metody Monte Carlo jsem vygeneroval 22 tuhostí dolních styčnicků a 22 tuhostí horních styčnicků. V *Tabulce 16* a *Tabulce 17* jsou hodnoty jednotlivých tuhostí přiřazeny ke styčnickům dle jejich čísel.

Následně jsem použil metodu LHS a vygeneroval hodnoty tuhostí horních a dolních styčnicků s korelačním koeficientem 10 % a 20 % viz *Tabulka 18* a *Tabulka 19*.

Pro každou kombinaci tuhostí styčnicků z *Tabulek 16-19* byl v programu SCIA Engineer 17.01 vytvořen výpočtový model a získán průhyb ve význačných bodech. Výsledné průhyby viz *Tabulka 12* a *Tabulka 13*.

Tabulka 12 - Výsledný průhyb konstrukce v závislosti na zvolené simulační metodě (korelační koeficient 10 %)

Střední hodnota tuhostí dolního styčnicku [MNm/rad]	Zvolená simulační metoda			
	Monte Carlo		LHS	
	Průhyb ve význačných bodech		Průhyb ve význačných bodech	
	1	1	1	2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,23	43,3	43,3	43,3	43,3
0,25	43,2	43,2	43,3	43,3
0,27	43,4	43,3	43,3	43,3

Tabulka 13 - Výsledný průhyb konstrukce v závislosti na zvolené simulační metodě (korelační koeficient 20 %)

Střední hodnota tuhostí dolního styčnicku [MNm/rad]	Zvolená simulační metoda			
	Monte Carlo		LHS	
	Průhyb ve význačných bodech		Průhyb ve význačných bodech	
	1	1	1	2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,23	43,2	43,3	43,5	43,2
0,25	43,3	43,2	43,3	43,4
0,27	43,6	43,4	43,0	43,1

Z *Tabulky 12* a *Tabulky 13* je patrné, že při nižším korelačním koeficientu se výsledné průhyby nemění a pohybují se okolo hodnoty 43,35 mm (průměr z 43,1 a 43,6 mm). Avšak při korelačním koeficientu 20 % se začíná rozptyl hodnot zvětšovat.

U modelu zpracovaného pomocí simulační metody LHS s korelačním koeficientem 20 % a střední hodnotě tuhostí dolního styčnicku rovné 0,23 MNm/rad se výsledné průhyby ve význačných bodech nápadně přiblížili průhybům naměřeným během statické zatěžovací zkoušky, která byla na mostě provedena.

Tabulka 14 - tuhosti styčnicků získané pomocí metody Monte Carlo s korelačními koeficienty 10 %, 15 % a 20 %

Číslo styčnicku	Korelační koeficient		
	10 %	15 %	20 %
	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]
1	0,3217	0,253401	0,301448
2	0,301184	0,254659	0,281427
3	0,270052	0,282019	0,195121
4	0,251514	0,223684	0,201851
5	0,277216	0,312816	0,352702
6	0,281716	0,290952	0,342531
7	0,252671	0,272218	0,242689
8	0,289885	0,298281	0,299278
9	0,305515	0,312682	0,200679
10	0,270512	0,304058	0,263058
11	0,264143	0,29678	0,390351
12	0,25711	0,301386	0,284663
13	0,255196	0,223494	0,227105
14	0,254719	0,288824	0,267963
15	0,288941	0,316081	0,376753
16	0,266956	0,289697	0,184489
17	0,287818	0,261028	0,339833
18	0,284618	0,267608	0,248567
19	0,279222	0,253181	0,302456
20	0,284097	0,238984	0,352407
21	0,258784	0,196671	0,37397
22	0,273024	0,274788	0,264651
23	0,283719	0,269897	0,22182
24	0,269984	0,32803	0,269187
25	0,278775	0,236167	0,210548
26	0,28311	0,243779	0,331986
27	0,252197	0,261939	0,246769
28	0,266425	0,263457	0,322848
29	0,250255	0,267022	0,273936
30	0,27006	0,281178	0,264067
31	0,283463	0,234887	0,235899
32	0,284439	0,245113	0,337212
33	0,260685	0,253379	0,302481
34	0,268537	0,22437	0,340341
35	0,267658	0,270817	0,288804
36	0,269962	0,261221	0,388064
37	0,287877	0,313827	0,214299
38	0,285082	0,337632	0,224132
39	0,283158	0,241912	0,308084
40	0,300288	0,226224	0,248818
41	0,260906	0,31334	0,14448
42	0,270162	0,301424	0,202767
43	0,27596	0,273689	0,206668
44	0,271263	0,342935	0,262267

Tabulka 15 - tuhosti styčnicků získané pomocí metody LHS s korelačními koeficienty 10 % a 20 %

Číslo styčnicku	Korelační koeficient	
	10 %	20 %
	[MNm/rad]	[MNm/rad]
1	0,255686	0,282248
2	0,276709	0,279081
3	0,286342	0,213656
4	0,321402	0,199348
5	0,293338	0,263113
6	0,226889	0,266359
7	0,238424	0,330357
8	0,295236	0,269569
9	0,309422	0,176279
10	0,233598	0,285431
11	0,259764	0,245824
12	0,266977	0,341344
13	0,284694	0,249479
14	0,215286	0,335566
15	0,242293	0,259816
16	0,261662	0,151072
17	0,270306	0,224643
18	0,27193	0,275919
19	0,28307	0,288641
20	0,312707	0,253015
21	0,279874	0,355652
22	0,251072	0,295184
23	0,248467	0,298545
24	0,301538	0,238056
25	0,257778	0,291887
26	0,306533	0,256455
27	0,275126	0,233872
28	0,273534	0,301985
29	0,303928	0,316944
30	0,265258	0,365304
31	0,291511	0,378721
32	0,263489	0,309176
33	0,289742	0,325576
34	0,278291	0,18696
35	0,299314	0,403928
36	0,268658	0,207087
37	0,316576	0,272752
38	0,253462	0,229424
39	0,245578	0,347913
40	0,288023	0,242027
41	0,328111	0,305521
42	0,340714	0,321128
43	0,281466	0,219434
44	0,297222	0,312973

Tabulka 16 - Tuhosti styčnicků s rozdílnými středními hodnotami tuhostí horních a dolních styčnicků s korelačním koeficientem 10 % (hodnoty získané pomocí metody Monte Carlo)

Číslo styčnicku	Střední hodnota tuhosti dolních styčnicků		
	0,23	0,25	0,27
	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]
1	0,968596	0,542412	0,375919
2	0,943087	0,461365	0,371555
3	0,862582	0,537244	0,350817
4	0,830978	0,567956	0,365384
5	0,739299	0,570385	0,381045
6	0,972674	0,540126	0,344975
7	0,795080	0,548568	0,388404
8	0,678447	0,523253	0,393361
9	0,784991	0,514685	0,459080
10	0,789642	0,521623	0,285223
11	0,738555	0,508401	0,361955
12	0,216346	0,257207	0,281497
13	0,273762	0,312577	0,260847
14	0,213845	0,219537	0,242890
15	0,232206	0,260666	0,239070
16	0,153987	0,273118	0,265853
17	0,214034	0,281505	0,320911
18	0,256666	0,235529	0,242483
19	0,202683	0,302939	0,246581
20	0,200518	0,259227	0,259833
21	0,237550	0,280610	0,259676
22	0,271606	0,214063	0,277148
23	0,841443	0,589451	0,378681
24	0,845025	0,528493	0,395394
25	0,806821	0,442789	0,375072
26	0,775915	0,461704	0,365609
27	0,676344	0,602241	0,312609
28	0,798887	0,549171	0,345203
29	0,776693	0,527129	0,416852
30	0,710871	0,637983	0,315023
31	0,816333	0,488965	0,362838
32	0,755947	0,489785	0,413867
33	0,878714	0,571810	0,408255
34	0,268771	0,221921	0,208327
35	0,233823	0,252803	0,307020
36	0,232157	0,277699	0,256850
37	0,223627	0,291360	0,273223
38	0,232941	0,276731	0,291433
39	0,226117	0,264074	0,276446
40	0,211959	0,207207	0,240184
41	0,218151	0,276399	0,271892
42	0,201766	0,238663	0,291093
43	0,251807	0,275269	0,257273
44	0,241753	0,240600	0,232389

Tabulka 17 - Tuhosti styčníků s rozdílnými středními hodnotami tuhostí horních a dolních styčníků s korelačním koeficientem 20 % (hodnoty získané pomocí metody Monte Carlo)

Číslo styčniku	Střední hodnota tuhosti dolních styčníků		
	0,23	0,25	0,27
	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]
1	0,721463	0,396281	0,379995
2	0,983546	0,547675	0,389016
3	1,123976	0,444209	0,417425
4	0,671939	0,544158	0,454703
5	0,819947	0,583255	0,342394
6	0,683592	0,611704	0,377899
7	0,893025	0,476349	0,334738
8	0,815065	0,588820	0,361495
9	0,886340	0,590098	0,313225
10	0,818732	0,291520	0,230380
11	0,582953	0,504023	0,381308
12	0,184694	0,340442	0,196100
13	0,232244	0,285113	0,192165
14	0,237868	0,168061	0,245842
15	0,264397	0,311171	0,282062
16	0,189204	0,236233	0,205925
17	0,199201	0,296471	0,326117
18	0,228421	0,213898	0,261811
19	0,206190	0,246379	0,350668
20	0,236790	0,291377	0,199888
21	0,247615	0,257296	0,212933
22	0,198676	0,289641	0,204023
23	0,577824	0,540745	0,375068
24	0,759545	0,627497	0,350794
25	0,870733	0,341302	0,400655
26	0,989832	0,517668	0,473670
27	0,827165	0,665897	0,336868
28	0,918098	0,512859	0,362706
29	0,739545	0,486861	0,370577
30	0,481769	0,884519	0,465119
31	0,601893	0,247837	0,362721
32	0,722201	0,470826	0,426171
33	0,843402	0,486812	0,472877
34	0,246490	0,331093	0,253820
35	0,253011	0,266853	0,242529
36	0,215915	0,200263	0,181073
37	0,235250	0,235001	0,204454
38	0,154740	0,247362	0,315580
39	0,300807	0,193135	0,266295
40	0,186154	0,282693	0,313507
41	0,233730	0,285748	0,247720
42	0,302720	0,295704	0,299644
43	0,335267	0,273103	0,272141
44	0,213173	0,251206	0,179647

Tabulka 18 - Tuhosti styčníků s rozdílnými středními hodnotami tuhostí horních a dolních styčníků s korelačním koeficientem 10 % (hodnoty získané pomocí metody LHS)

Číslo styčniku	Střední hodnota tuhosti dolních styčníků		
	0,23	0,25	0,27
	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]
1	0,713489	0,594762	0,401706
2	0,773253	0,606076	0,340442
3	0,841884	0,504306	0,334034
4	0,871585	0,496140	0,364701
5	0,800146	0,577256	0,391020
6	0,745802	0,475487	0,377447
7	0,725232	0,531493	0,415878
8	0,735884	0,525163	0,326270
9	0,809570	0,537699	0,396103
10	0,661852	0,518610	0,381791
11	0,893520	0,648960	0,346046
12	0,236643	0,254294	0,324011
13	0,242363	0,245706	0,268461
14	0,223357	0,287237	0,262202
15	0,264258	0,233138	0,258930
16	0,276010	0,300011	0,215989
17	0,228689	0,263438	0,255487
18	0,220570	0,239750	0,251789
19	0,257771	0,225045	0,281070
20	0,214487	0,266862	0,229784
21	0,195742	0,236562	0,288211
22	0,245513	0,251425	0,243049
23	0,755226	0,621329	0,296844
24	0,819488	0,556400	0,355861
25	0,33256	0,585422	0,315804
26	0,855315	0,54364	0,445305
27	0,700057	0,569849	0,360357
28	0,764330	0,550069	0,386288
29	0,622116	0,486800	0,368959
30	0,782119	0,562952	0,351128
31	0,830150	0,511713	0,408115
32	0,791043	0,432602	0,373190
33	0,683787	0,460234	0,426345
34	0,202229	0,229363	0,302600
35	0,207041	0,280185	0,284513
36	0,226050	0,260250	0,292288
37	0,217637	0,248575	0,265363
38	0,233950	0,219815	0,247712
39	0,231311	0,242780	0,237400
40	0,248986	0,212763	0,277798
41	0,183990	0,257220	0,296951
42	0,211014	0,199989	0,271539
43	0,239430	0,274955	0,310216
44	0,252959	0,270637	0,274637

Tabulka 19 - Tuhosti styčnicků s rozdílnými středními hodnotami tuhostí horních a dolních styčnicků s korelačním koeficientem 20 % (hodnoty získané pomocí metody LHS)

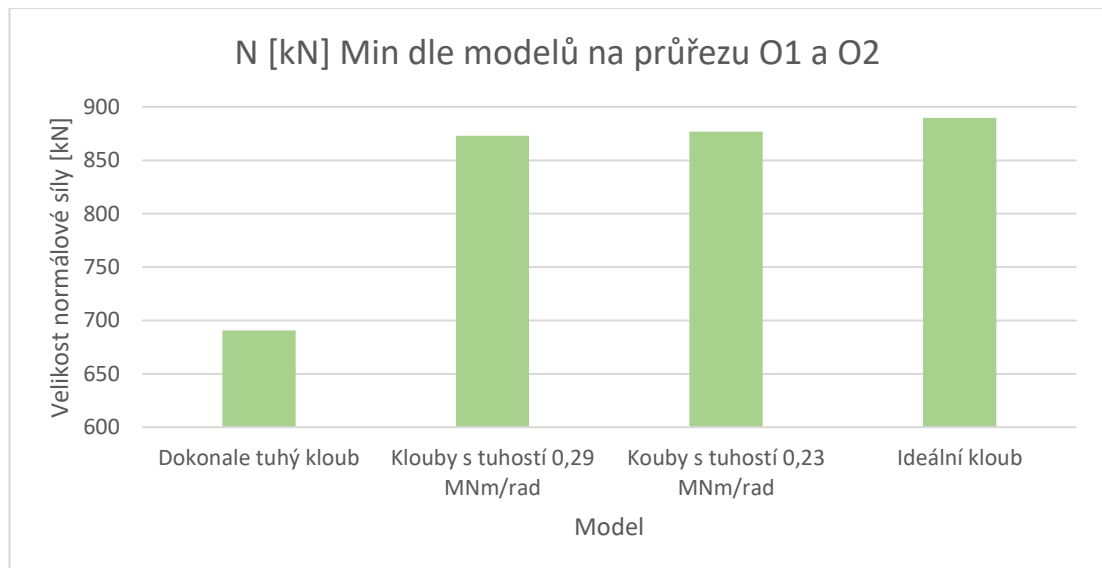
Číslo styčnicku	Střední hodnota tuhosti dolních styčnicků		
	0,23	0,25	0,27
	[MNm/rad]	[MNm/rad]	[MNm/rad]
1	0,861290	0,432820	0,331182
2	0,694082	0,572018	0,375305
3	0,466546	0,546946	0,401501
4	0,822607	0,559357	0,5195360
5	0,932944	0,410192	0,281466
6	0,906081	0,598917	0,432338
7	0,649291	0,509545	0,349640
8	0,589888	0,379686	0,260534
9	0,882594	0,534616	0,383821
10	0,546018	0,671371	0,340648
11	0,768821	0,630064	0,445156
12	0,285541	0,264440	0,350431
13	0,275917	0,258587	0,285596
14	0,298516	0,310371	0,335200
15	0,174459	0,189629	0,225423
16	0,322019	0,208725	0,216097
17	0,237900	0,324474	0,260726
18	0,205274	0,229501	0,233578
19	0,23285	0,283724	0,323903
20	0,137981	0,276876	0,299026
21	0,216715	0,235560	0,306422
22	0,254726	0,270499	0,292139
23	0,713918	0,522206	0,481615
24	0,750973	0,648743	0,222613
25	0,732766	0,467831	0,296993
26	0,672778	0,585124	0,421132
27	0,965484	0,496439	0,358328
28	0,6224229	0,757140	0,410966
29	0,786552	0,451499	0,392508
30	0,804399	0,701877	0,366844
31	1,009354	0,324423	0,321017
32	0,841454	0,613732	0,460682
33	1,088826	0,482645	0,309810
34	0,192027	0,299910	0,266922
35	0,161484	0,175526	0,273078
36	0,227378	0,350021	0,254404
37	0,232622	0,291275	0,314577
38	0,198973	0,247150	0,189569
39	0,248859	0,252850	0,161977
40	0,184083	0,200090	0,240974
41	0,222100	0,216276	0,378023
42	0,261027	0,149979	0,204800
43	0,211141	0,241413	0,247861
44	0,267973	0,223124	0,279274

10. VLIVU TUHOSTÍ STYČNÍKŮ NA VELIKOST VNITŘNÍCH SIL

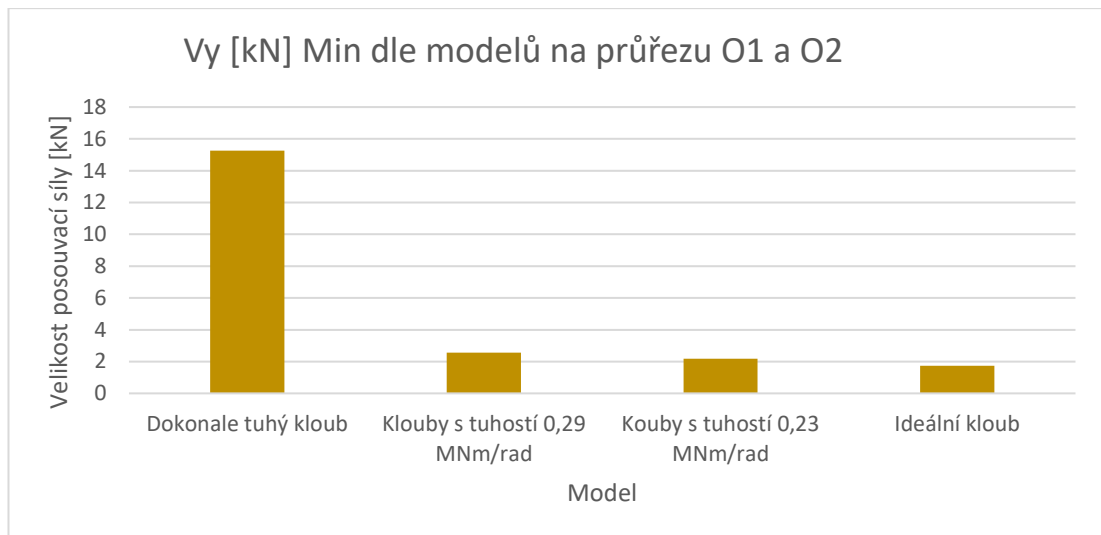
Při porovnání velikostí vnitřních sil jednotlivých modelů pozorujeme, že s větší tuhostí se zvětšuje velikost posouvací síly a momentu a s nižší tuhostí se zvětšuje normálová síla.

Z tabulek maximálních hodnot vnitřních sil vyplývá, že u některých průřezů maximální ohybový moment pro daný model několikanásobně (70x) přesahuje ohybový moment u jiného modelu.

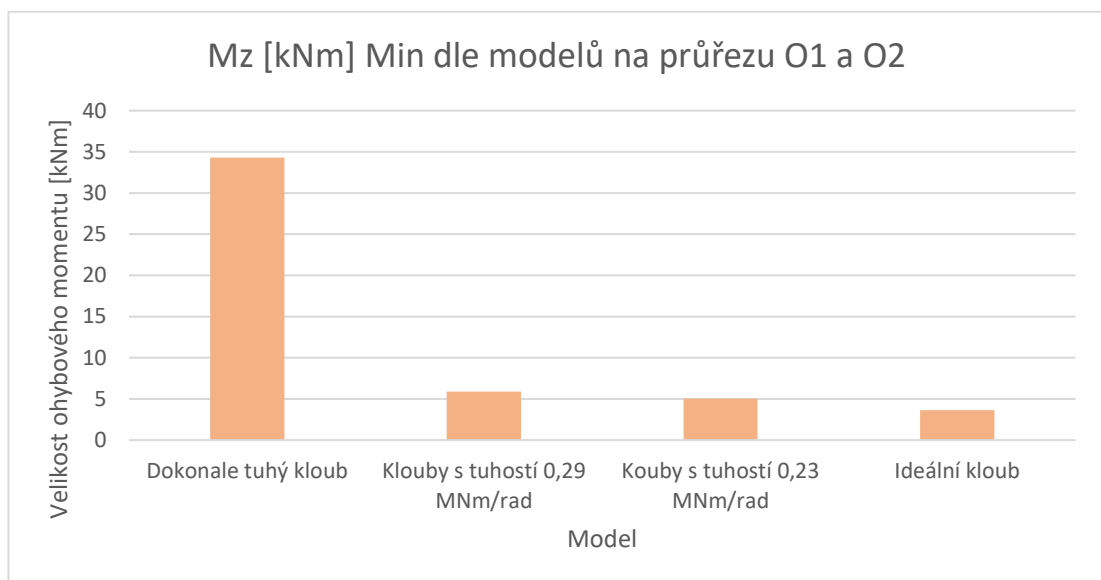
Po prozkoumání výsledků zjistíme, že umístění maximálních vnitřních sil se nemění a maximální hodnoty vnitřních sil nalezneme pro všechny modely na stejných prutech (pro daný průřez).



Graf 6 - velikost normálové síly dle modelu na průřezu O1 a O2



Graf 7 - velikost tangenciální síly dle modelu na průřezu O1 a O2



Graf 8 - velikost ohybového momentu dle modelu na průřezu O1 a O2

Maximální normálová síla je u modelu s ideálním kloubem, a se zvětšující se tuhostí se normálová síla zmenšuje. Maximální hodnoty tangenciálních sil a momentů jsou u modelu s dokonale tuhými styčníky a se snižující se tuhostí klesají i jejich hodnoty. Avšak ne všechny hodnoty splňují tyto předpoklady. Například u průřezu U1, U2 jsou maximální ohybové momenty u modelu s ideálními klouby.

Z projektové dokumentace zpracované firmou Ing. Ivan Šír, projektování dopravních staveb a.s., kterou mi poskytla SŽDC. (výkres E.1.4.19 OK – PŘÍHRADA, DOLNÍ PÁSY A ZTUŽENÍ) je jasné pojmenování, tvar i umístění jednotlivých průřezů.

Tabulka 20 - maximální hodnoty vnitřních sil pro model s ideálními klouby ve styčnicích

	Průřez	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
Max	O1,O2 - TTW	0	1,42	0	0,01	0	3,57
Min	O1,O2 - TTW	-889,65	-1,74	0	-0,01	0	-3,62
Max	O3 - TTW	0	2,68	0	0,03	0	6,03
Min	O3 - TTW	-1474,37	-1,41	0	-0,03	0	-5,05
Max	O4, O5 - TTW	0	3,12	0	0,05	0	6,89
Min	O4, O5 - TTW	-2089,97	-2,2	0	-0,05	0	-6,37
Max	U1,U2 - Stěna komory	964,68	2,63	0	2,46	0	8,49
Min	U1,U2 - Stěna komory	0	-2,71	0	-2,36	0	-8,38
Max	U3-U5 - Stěna komory	1786,34	0,24	0	2,17	0	0,85
Min	U3-U5 - Stěna komory	0	-0,34	0	-2,14	0	-0,62
Max	D1 - lw	0	0	0,27	0,01	1,18	0
Min	D1 - lw	-593,45	0	-0,25	-0,01	-0,99	0
Max	D2 - lw	0	0	1,06	0	4,71	0
Min	D2 - lw	-513,21	0	-1,09	0	-4,69	0
Max	D3 - lw	0	0	1,29	0,01	6,96	0
Min	D3 - lw	-427,73	0	-1,75	-0,01	-7,69	0
Max	D4 - lw	0	0	0,66	0,01	4,72	0
Min	D4 - lw	-200,92	0	-1,09	-0,01	-4,48	0
Max	D5 - lw	27,68	0	1,94	0	4,84	0
Min	D5 - lw	0	0	-1,65	0	-4,76	0
Max	T1 - lw	280,46	0	0,11	0	0,48	0
Min	T1 - lw	0	0	-0,14	0	-0,56	0
Max	T2,T3 - lw	365,38	0	0,92	0	3,12	0
Min	T2,T3 - lw	0	0	-1,23	0	-3,47	0
Max	T4,T5 - lw	218,82	0	1,07	0	4,44	0
Min	T4,T5 - lw	0	0	-0,93	0	-4,3	0
Max	S0 - lw	0	3,88	11,07	3,33	6,98	2,94
Min	S0 - lw	-192,82	-3,59	-11,47	-3,33	-7,01	-3,18
Max	S - lw	164,07	0	5,37	0	16,9	0
Min	S - lw	-156,63	0	-5,15	0	-17,27	0
Max	Příčnick - lw	11,74	9,33	219,29	6,11	118,54	4,24
Min	Příčnick - lw	-4,22	-9,42	-221,87	-6,19	-15,42	-4,2
Max	Podélník - lw	9,08	0,87	172,78	0,03	106,83	1,8
Min	Podélník - lw	-889,65	-1,74	0	-0,01	0	-3,62

Tabulka 21 - Porovnání maximálních hodnot vnitřních sil pro jednotlivé průřezy

Průřez	Model	N [kN]		Vy [kN]		Vz [kN]		Mx [kNm]		My [kNm]		Mz [kNm]	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
O1,O2 - TTW	Ideální kloub	0	-889,65	1,42	-1,74	0	0	0,01	-0,01	0	0	3,57	-3,62
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-876,98	2,15	-2,18	0	-0,72	0,01	-0,01	1,52	-1,45	5,09	-5,04
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-872,86	2,54	-2,57	0	-0,88	0,01	-0,01	1,87	-1,78	5,96	-5,88
	Dokonale tuhý kloub	0	-690,63	15,22	-15,27	0	-13,79	0,01	-0,01	28,15	-28,94	34,44	-34,31
O3 - TTW	Ideální kloub	0	-1474,4	2,68	-1,41	0	0	0,03	-0,03	0	0	6,03	-5,05
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-1440,5	1,54	-0,27	0	-0,46	0,03	-0,03	1,2	-0,71	3,85	-2,52
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-1432,8	1,3	-0,03	0	-0,57	0,03	-0,03	1,48	-0,88	3,39	-1,98
	Dokonale tuhý kloub	0	-1169,8	6,61	-5,79	0	-7,48	0,03	-0,03	25,69	-5,51	13,39	-14,18
O4, O5 - TTW	Ideální kloub	0	-2090	3,12	-2,2	0	0	0,05	-0,05	0	0	6,89	-6,37
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-2020,8	3,32	-2,45	0	-0,3	0,05	-0,05	0,91	-0,32	7,11	-6,7
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-2008,9	3,36	-2,5	0	-0,36	0,05	-0,05	1,12	-0,39	7,16	-6,77
	Dokonale tuhý kloub	0	-1649,5	4,16	-6,25	0	-5,49	0,02	-0,02	24,49	0	14,21	-11,68
U1,U2 - Stěna komory	Ideální kloub	964,68	0	2,63	-2,71	0	0	2,46	-2,36	0	0	8,49	-8,38
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	934,77	0	1,5	-1,57	1,71	0	1,9	-1,81	3,59	-3,49	5,12	-5,01
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	932,92	0	1,35	-1,42	1,92	0	1,82	-1,75	4,01	-3,95	4,68	-4,57
	Dokonale tuhý kloub	939,36	0	0,11	-0,09	5,43	0	1,21	-1,21	10,71	-18,37	0,37	-0,26

Průřez	Model	N [kN]		Vy [kN]		Vz [kN]		Mx [kNm]		My [kNm]		Mz [kNm]	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
U3-U5 - Stěna komory	Ideální kloub	1786,3	0	0,24	-0,34	0	0	2,17	-2,14	0	0	0,85	-0,62
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	1883,4	0	0,27	-0,31	1,63	0	1,26	-1,48	3,05	-3,72	0,67	-0,61
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	1892,8	0	0,27	-0,3	1,82	0	1,22	-1,43	3,36	-4,18	0,65	-0,61
	Dokonale tuhý kloub	1974	0	0,21	-0,18	5,92	0	0,95	-1,08	0,35	-25,85	0,52	-0,51
D1 - lw	Ideální kloub	0	-593,45	0	0	0,27	-0,25	0,01	-0,01	1,18	-0,99	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-569,77	0,98	-0,89	0,38	-0,38	0,01	-0,01	1,07	-0,86	2,6	-2,85
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-567,28	1,12	-1,02	0,44	-0,44	0,01	-0,01	1,26	-1,06	2,97	-3,26
	Dokonale tuhý kloub	0	-560,1	5,91	-5,41	3,32	-3,29	0,01	-0,01	8,53	-8,42	12,61	-11,58
D2 - lw	Ideální kloub	0	-513,21	0	0	1,06	-1,09	0	0	4,71	-4,69	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-499,73	1,17	-1,08	1,15	-1,18	0	0	5,15	-5,16	3,16	-3,42
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-498,66	1,31	-1,21	1,2	-1,22	0	0	5,27	-5,28	3,55	-3,85
	Dokonale tuhý kloub	0	-488,97	2,25	-2,49	2,56	-2,57	0	0	8,48	-8,54	4,53	-5,01
D3 - lw	Ideální kloub	0	-427,73	0	0	1,29	-1,75	0,01	-0,01	6,96	-7,69	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-423,73	1,22	-1,22	1,31	-1,78	0,01	-0,01	7,21	-7,94	3,59	-3,59
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-423,85	1,36	-1,36	1,34	-1,81	0,01	-0,01	7,29	-8,02	4,01	-4,01
	Dokonale tuhý kloub	0	-424,28	2,09	-2,05	2,31	-2,74	0	-0,01	9,69	-10,38	3,47	-3,55

Průřez	Model	N [kN]		Vy [kN]		Vz [kN]		Mx [kNm]		My [kNm]		Mz [kNm]	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
D4 - lw	Ideální kloub	0	-200,92	0	0	0,66	-1,09	0,01	-0,01	4,72	-4,48	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-221,69	0,91	-1,01	0,31	-0,8	0,01	-0,01	4,29	-4,16	3,01	-2,73
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-224,1	1	-1,11	0,28	-0,76	0,01	-0,01	4,24	-4,11	3,3	-2,99
	Dokonale tuhý kloub	0	-238,11	0,93	-0,88	0,76	-0,74	0,01	-0,01	5,42	-5,29	1,93	-2,05
D5 - lw	Ideální kloub	27,68	0	0	0	1,94	-1,65	0	0	4,84	-4,76	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-29,54	0,41	-0,51	1,59	-1,32	0	0	3,83	-3,75	1,56	-1,27
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-32,66	0,44	-0,55	1,56	-1,28	0	0	3,72	-3,64	1,66	-1,36
	Dokonale tuhý kloub	0	-41,67	0,68	-0,69	0,48	-0,29	0	0	2,75	-2,65	1,5	-1,47
T1 - lw	Ideální kloub	280,46	0	0	0	0,11	-0,14	0	0	0,48	-0,56	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	303,26	0	1,18	-1,09	0,49	-0,48	0	0	1,08	-1,15	3,36	-3,1
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	305,82	0	1,32	-1,22	0,58	-0,58	0	0	1,29	-1,36	3,77	-3,47
	Dokonale tuhý kloub	334,78	0	1,29	-1,21	3,45	-3,44	0	0	7,78	-7,82	3,04	-3,25
T2,T3 - lw	Ideální kloub	365,38	0	0	0	0,92	-1,23	0	0	3,12	-3,47	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	381,01	0	1,23	-1,22	1,12	-1,43	0	0	2,97	-3,08	3,41	-3,41
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	382,47	0	1,36	-1,35	1,15	-1,46	0	0	2,94	-3,03	3,77	-3,76
	Dokonale tuhý kloub	404,7	0	0,87	-0,89	2,54	-2,55	0	0	5,2	-5,18	1,34	-1,38

Průřez	Model	N [kN]		Vy [kN]		Vz [kN]		Mx [kNm]		My [kNm]		Mz [kNm]	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
T4,T5 - lw	Ideální kloub	218,82	0	0	0	1,07	-0,93	0	0	4,44	-4,3	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	201,41	0	0,46	-0,56	0,61	-0,59	0	0	3,09	-2,97	1,19	-1,45
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	199,34	0	0,49	-0,59	0,62	-0,55	0	0	2,96	-2,95	1,24	-1,52
	Dokonale tuhý kloub	195,27	0	0,41	-0,41	0,54	-0,53	0	0	2,2	-2,32	0,7	-0,73
S0 - lw	Ideální kloub	0	-192,82	3,88	-3,59	11,07	-11,47	3,33	-3,33	6,98	-7,01	2,94	-3,18
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-208,09	3,45	-3,18	11,96	-12,34	2,01	-2	6,44	-6,67	2,64	-2,89
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-209,66	3,45	-3,18	12,01	-12,4	1,83	-1,83	6,39	-6,62	3,03	-3,32
	Dlokonale tuhý kloub	0	-210,9	7,8	-210,9	11,02	-210,9	0,21	-210,9	5,23	-210,9	16,54	-210,9
S - lw	Ideální kloub	164,07	-156,63	0	0	5,37	-5,15	0	0	16,9	-17,27	0	0
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	137,73	-118,05	1,23	-1,19	3,86	-3,63	0	0	12,3	-12,69	3,53	-3,53
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	135,07	-114,37	1,42	-1,36	3,72	-3,48	0	0	11,86	-12,26	3,92	-3,92
	Dokonale tuhý kloub	106,74	-103,85	2,32	-2,12	15,97	-15,26	0	0	9,36	-9,22	4,89	-4,48
Příčnick - lw	Ideální kloub	11,74	-4,22	9,33	-9,42	219,29	-221,87	6,11	-6,19	118,54	-15,42	4,24	-4,2
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	14,96	-4,2	18,31	-18,23	218,89	-221,59	5,58	-5,64	118,5	-15,16	7,73	-7,82
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	15,51	-4,25	20,4	-20,24	218,88	-221,59	5,45	-5,51	118,51	-15,13	8,55	-8,67
	Dokonale tuhý kloub	34,46	-6,88	145,6	-143,42	218,45	-220,88	0,4	-0,41	118,19	-14,98	56,63	-55,4

Průřez	Model	N [kN]		Vy [kN]		Vz [kN]		Mx [kNm]		My [kNm]		Mz [kNm]	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Podélník - Iw	Ideální kloub	9,08	-889,65	0,87	-1,74	172,78	0	0,03	-0,01	106,83	0	1,8	-3,62
	Klouby s tuhostí 0,23 MNm/rad	0	-52,22	0,77	-0,77	172,6	-157,98	0,03	-0,03	106,35	-65,7	1,59	-1,36
	Klouby s tuhostí 0,29 MNm/rad	0	-63,58	0,74	-0,74	172,59	-158,05	0,03	-0,03	106,21	-65,97	1,54	-1,28
	Dokonale tuhý kloub	0	-458,71	5,99	-6,38	174,09	-159,13	0,02	-0,03	103,28	-69,81	9,62	-9,11

	Nejnepříznivější stav
	Nejpříznivější stav
Ostatní hodnoty prochází barevnou škálou z červené přes žlutou do zelené	

11. DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR

Porovnáním všech namodelovaných průhybů s průhyby naměřenými během statické zatěžovací zkoušky na mostě v km 79,943 trati Lovosice – Česká Lípa bylo zjištěno, že nalezená kombinace tuhostí vygenerovaná pomocí simulační metody LHS se střední hodnotou tuhostí dolních styčnicků 0,23 MNm/rad, se střední hodnotou tuhostí horních styčnicků 0,78 MNm/rad a korelačním koeficientem 20 % (MODEL LHS023_020), se nejvíce přiblížila naměřeným průhybům.

Tabulka 22 - Porovnání skutečného průhybu s MODELEM LHS023_020

	Průhyb v Bodě 1 [mm]	Průhyb v Bodě 2 [mm]
Skutečný stav	43,64	43,09
MODEL LHS023_020	43,5	43,2

Při zpracování tohoto tématu bylo vytvořeno 121 modelů stejného mostu. Každý model je jedinečný svou tuhostí styčnicků, resp. jejich kombinacemi. Všechny modely se porovnávaly s výsledky ze statické zatěžovací zkoušky, při které byl výsledný průhyb ve středu mostu roven 43,1 a 43,6 mm (každý snímač byl umístěn na jiném hlavním příhradovém nosníku).

První dva výpočtové modely byly vytvořeny s ideálními klouby ve styčnicích a s dokonale tuhými spoji ve styčnicích. Tím jsme získali maximální a minimální možný průhyb, kterého by mohla konstrukce s tímto zatížením dosáhnout (viz *Tabulka 3*).

Na dalších patnácti modelech byla hledána tuhost styčnicků, která by odpovídala průhybu naměřenému při statické zatěžovací zkoušce (výsledná tuhost byla 0,31 a 0,245 MNm/rad). Z výsledků získaných z výše zmíněných modelů je patrné, že čím je větší tuhost styčnicků, tím je menší průhyb a naopak.

V další kapitole pomocí šedesáti šesti modelů určuji závislost mezi tuhostí horních styčnicků a dolních styčnicků, přičemž stále hledáme výsledky takové, aby odpovídaly průhybům naměřených během statické zatěžovací zkoušky. Základním předpokladem bylo, že tuhost horních styčnicků je větší než tuhost dolních styčnicků. Z výkresové dokumentace je vidět, že styčnickové plechy v horní pásnici jsou větší nežli styčnickové plechy v dolní pásnici. Tuhosti dolních styčnicků byly mnou voleny a tuhosti horních styčnicků byly získány pomocí iterační metody.

Dále zkoumáme, zda tuhost středových styčnicků výrazně ovlivňuje výsledný průhyb konstrukce. Z osmnácti modelů vytvořených pro tuto kapitolu se pouze u jednoho zvětšil průhyb. Z tohoto důvodu pro příští modely zanedbáváme tuhosti středových styčnicků a nadále jejich tuhost uvažujeme jako nulovou.

Do posledních dvaceti modelů byly vygenerovány hodnoty tuhostí pomocí simulačních metod Monte Carlo a LHS. Střední hodnoty tuhostí styčnicků byly získány z předchozích modelů a ze získaných závislostí na jejich tuhosti styčnicků a výsledném průhybu konstrukce. Pomocí simulační metody LHS byla vygenerována kombinace tuhostí, která se nejvíce přiblížila výslednému průhybu konstrukce naměřeném během statické zatěžovací zkoušky (střední hodnota tuhostí dolních styčnicků 0,23 MNm/rad, střední hodnota tuhostí horních styčnicků 0,78 MNm/rad a korelačním koeficientem 20). Výsledný průhyb se v tomto modelu lišil o desetinu milimetru.

V kapitole „Vliv tuhosti styčnicků na velikost vnitřních sil“ vidíme na vybraných čtyřech modelech, jak tuhost styčnicků ovlivňuje velikosti vnitřních sil. Ze znázorněných grafů a tabulek je jasné, že rozdílná tuhost styčnicků, napříč modely, ovlivňuje velikost vnitřních sil.

12. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ČSN 73 6209 - *Zatěžovací zkoušky mostů*. (nedatováno).

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav. (4. 9 2013). Protokol o zkoušce 110/13/EXPO.

ING. IVAN ŠÍR, projektování dopravních staveb a.s. (3 2012). Výkresová dokumentace - Rekonstrukce mostu v km 79,943 trati Lovosice - Česká Lípa.

Kadlčák, J., & Kytýr, J. (1998). *Statika stavebních konstrukcí I.: základy stavební mechaniky*. Brno: VUTIUM.

Pechar, J., Bureš, J., & Schindler, A. (1990). *kovové mosty*. Praha: SNTL.

Rotter T., S. J. (1999). *Ocelové konstrukce 30 - ocelové mosty*. Praha: ČVUT.

Sadílek, V., Doležel, J., & Vořechovský, M. (2010). *Řešené úlohy z oblasti spolehlivosti stavebních konstrukcí*. Brno.

Vičan, J., Kabátník, J., & Reimont, T. (2002). *Dopravní cesty: Mosty*. Pardubice: Univerzita Pardubice.

13. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Velikost zatížení na jednotlivá kola.....	20
Tabulka 2 - Průhyb naměřený během statické zatěžovací zkoušky Kloknerovým ústavem	21
Tabulka 3 - Průhyby limitních případů	23
Tabulka 4 - Závislost průhybů na zvolené tuhosti styčnicků.....	26
Tabulka 5 - Závislost průhybu na různé tuhosti styčnicků v horní a dolní pásnici	28
Tabulka 6 - Závislost hodnoty tuhosti středových styčnicků na zvolené hodnotě tuhostí horních a dolních styčnicků	32
Tabulka 7 - Hodnoty tuhostí jednotlivých styčnicků získané pomocí metody Monte Carlo s korelačním koeficientem 5 %	36
Tabulka 8 - Výsledné průhyby při korelačním koeficientu 5 %	37
Tabulka 9 - Průhyb ve význačných bodech s korelačními koeficienty 10 %, 15 % a 20 % (tuhosti styčnicků získané pomocí metody Monte Carlo).....	38
Tabulka 10 - Průhyb ve význačných bodech s korelačními koeficienty 10 % a 20 % (tuhosti styčnicků získané pomocí metody LHS)	38
Tabulka 11 - Střední hodnoty horních a dolních styčnicků	39
Tabulka 12 - Výsledný průhyb konstrukce v závislosti na zvolené simulační metodě (korelační koeficient 10 %).....	40
Tabulka 13 - Výsledný průhyb konstrukce v závislosti na zvolené simulační metodě (korelační koeficient 20 %).....	40
Tabulka 14 - tuhosti styčnicků získané pomocí metody Monte Carlo s korelačními koeficienty 10 %, 15 % a 20 %.....	41
Tabulka 15 - tuhosti styčnicků získané pomocí metody LHS s korelačními koeficienty 10 % a 20 %	42
Tabulka 16 - Tuhosti styčnicků s rozdílnými středními hodnotami tuhostí horních a dolních styčnicků s korelačním koeficientem 10 % (hodnoty získané pomocí metody Monte Carlo).....	43
Tabulka 17 - Tuhosti styčnicků s rozdílnými středními hodnotami tuhostí horních a dolních styčnicků s korelačním koeficientem 20 % (hodnoty získané pomocí metody Monte Carlo).....	44

Tabulka 18 - Tuhosti styčnicků s rozdílnými středními hodnotami tuhostí horních a dolních styčnicků s korelačním koeficientem 10 % (hodnoty získané pomocí metody LHS).....	45
Tabulka 19 - Tuhosti styčnicků s rozdílnými středními hodnotami tuhostí horních a dolních styčnicků s korelačním koeficientem 20 % (hodnoty získané pomocí metody LHS).....	46
Tabulka 20 - maximální hodnoty vnitřních sil pro model s ideálními klouby ve styčnicích.....	49
Tabulka 21 - Porovnání maximálních hodnot vnitřních sil pro jednotlivé průřezy ...	50
Tabulka 22 - Porovnání skutečného průhybu s MODELEM LHS023_020	55

14. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Závislost průhybů na tuhosti styčnicků (všechny styčnický mají stejnou tuhost)	24
Graf 2 - Závislost průhybu na tuhosti styčnicků na sledovaném intervalu s vyznačenými hledanými hodnotami (všechny styčnický mají stejnou tuhost).....	25
Graf 3 - Závislost tuhosti horního a dolního styčnicku pro limitující hodnoty průhybů	30
Graf 4 - Závislost tuhosti horního na tuhosti dolního styčnicku pro limitující hodnoty průhybů na intervalu 0,225-0,3 MNm/rad	31
Graf 5 - Závislost tuhosti horního styčnicku na tuhosti dolního styčnicku pro limitující hodnoty průhybů a průměr mezi nimi	39
Graf 6 - velikost normálové síly dle modelu na průřezu O1 a O2	47
Graf 7 - velikost tangenciální síly dle modelu na průřezu O1 a O2.....	48
Graf 8 - velikost ohybového momentu dle modelu na průřezu O1 a O2	48

15. SEZNAM OBRÁZKOVÝCH PŘÍLOH

Obrázek 1 - Návrhové charakteristiky mostního objektu	11
Obrázek 2 - Styčnicková metoda	14
Obrázek 3 - Průsečná metoda.....	15
Obrázek 4 - Pohled na most od Lovosické opěry	18
Obrázek 5 - Pohled na most z polní cesty pod mostem	18
Obrázek 6 - Umístění mostu v mapovém podkladu.....	19
Obrázek 7 - Umístění zatížení pro zatěžovací zkoušku	20
Obrázek 8 - Výpočtový model z programu SCIA Engineer 17.01	22
Obrázek 9 - Umístění zatížení na podélníky	22
Obrázek 10 - Průhyby v programu SCIA Engineer 17.01 Model1	23
Obrázek 11 - Průhyby v programu SCIA Engineer 17.01 Model 2.....	24
Obrázek 12 - Zatěžovací model pro výpočty s rozdílnou tuhostí styčnicků.....	27
Obrázek 13 - Generování náhodné veličiny inverzní transformací distribuční funkce	34
Obrázek 14 - Rozdělení definičního oboru distribuční funkce - metoda LHS	34
Obrázek 15 - Model konstrukce v Programu SCIA Engineer 17.01 pro výpočtový model s volenou tuhostí styčnicků pomocí simulačních metod.....	35
Obrázek 16 - Očíslování jednotlivých styčnicků na horním a dolním pásu	37