



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

**ANALÝZA CHOVÁNÍ ŽELEZNIČNÍ KOLEJE
NA ÚČINKY POJEZDU ŽELEZNIČNÍHO VOZIDLA**

ANALYSIS OF RAILWAY BEHAVIOR ON VEHICLES EFFECTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Gabriela Peňázová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VLASTISLAV SALAJKA, CSc.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Gabriela Peňázová
Název	Analýza chování železniční koleje na účinky pojezdu železničního vozidla
Vedoucí práce	doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] Lichtberger, B. Track Compendium Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics — 2. ed., completely revised (English), Published 2011, 624 Pages, ISBN: 978-3-7771-0421-8
- [2] Esveld, C. Modern Railway Track, 2nd ed., MRT Productions, Zaltbommel, ISBN: 90-800324-3-3, 2001.
- [3] Vymlátíl, P. Komplexní dynamická analýza působení kolejových vozidel na železniční konstrukce. Disertační práce, 2009, FAST, VUT v Brně, 116 stran
- [4] Zicha, J. Upgrading Track and Roadbed for High Speed Rail Operations, Specific Criteria Development, FRA Order No.: DTFR53-00-P-00377. January 30, 2001.
- [5] Wang, P. Design of High-Speed Railway Turnouts: Theory and Applications. Academic Press, 1 edition (May 11, 2015), ISBN-13: 978-0323396172, ISBN-10: 0323396178
- [6] ANSYS Release 12.1 – 19.2, SAS IP, Inc.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Studium možností modelování konstrukčních prvků koleje. Sestavení s využitím metody konečných prvků 3D modelu konstrukce koleje v přímé. Model tvoří kolejový roštu a podkladní vrstvy. Definování kolových sil a řešení statické a dynamické odezvy na účinky vozidla. Simulace pojezdu železničním vozidlem různou rychlostí. Při modelování bude využit programový systém ANSYS.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.
Vedoucí diplomové práce

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Gabriela Peňázová *Analýza chování železniční koleje na účinky pojezdu železničního vozidla*. Brno, 2022. 76 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem možností modelování železniční tratě. Jsou vytvořeny výpočtové modely koleje v programovém systému ANSYS Classic. Zjednodušený rovinný výpočtový model reprezentuje podélnou polovinu klasické jednokolejné konstrukce, prostorové výpočtové modely reprezentují klasickou jednokolejnou konstrukci a pevnou jízdní dráhu RHEDA 2000. Statická a dynamická odezva rovinného výpočtového modelu koleje je porovnána s analytickým výpočtem dle Timošenska a Frýby. Statická a dynamická odezva prostorových modelů je analyzována a následně porovnána.

KLÍČOVÁ SLOVA

Železniční trať, výpočtové modely, ANSYS Classic, APDL, Timošenkův model, Frýbův model, statická odezva, dynamická odezva, výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu, útlum, RHEDA 2000, pevná jízdní dráha, metoda konečných prvků

ABSTRACT

The master's thesis deals with the possibilities of railway track modeling. The computational models were created in ANSYS Classic. Simplified 2D model represents a longitudinal half of classic single track construction, 3D models represent classic single track construction and RHEDA 2000 slab track. Static and dynamic response of 2D model was compared with analytical solutions by Timoshenko and Fryba. Static and dynamic responses of 3D models were analyzed and compared.

KEYWORDS

Railway track, computational models, ANSYS Classic, APDL, Timoshenko model, Fryba model, static response, dynamic response, calculation of eigenvalues and eigenvectors, damping, RHEDA 2000, slab track, finite elements method

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Analýza chování železniční koleje na účinky pojezdu železničního vozidla* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Gabriela Peňázová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Analýza chování železniční koleje na účinky pojezdu železničního vozidla* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Gabriela Peňázová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu práce doc. Ing. Vlastislavu Salajkovi, CSc. za veškerý čas, spoustu cenných rad a připomínek, a především za jeho trpělivost. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Pavlu Kulichovi za poskytnutí analytických modelů.

Obsah

1 Úvod	3
2 Konstrukce železniční tratě	4
2.1 Železniční svršek	5
2.2 Železniční spodek	9
3 Interakce železničních vozidel s tratí	10
4 Základní postupy řešení	12
4.1 Diferenciální postupy	12
4.1.1 Timošenkův model	12
4.1.2 Frýbův model	13
4.2 Metoda konečných prvků	14
4.2.1 Statická odezva konstrukce	14
4.2.2 Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu	15
4.2.3 Obecná odezva konstrukce na dynamické zatížení	15
5 Rovinný výpočtový model koleje	17
5.1 Tvorba modelu	17
5.2 Vstupní parametry modelu	19
5.3 Popis použitých konečných prvků	20
5.3.1 BEAM188	20
5.3.2 COMBIN14	20
5.3.3 MASS21	21
5.4 Statická odezva konstrukce	22
5.5 Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu	23
5.6 Dynamická odezva konstrukce na pojezd vozidla	24
5.6.1 Model zatížení	24
5.6.2 Model útlumu konstrukce	25
5.6.3 Výpočet odezvy	26
5.6.4 Výsledky	26
5.7 Porovnání odezvy výpočtového modelu s analytickým řešením	29
5.7.1 Statická odezva	29
5.7.2 Dynamická odezva	30
6 Prostorové výpočtové modely	31
6.1 Výpočtový model klasické konstrukce v zářezu	33
6.1.1 Tvorba modelu	33
6.1.2 Vstupní parametry modelu	37
6.2 Popis použitých konečných prvků	38
6.2.1 SOLID185	38
6.2.2 SURF154	38
6.3 Statická odezva konstrukce	39
6.4 Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu	42
6.5 Dynamická odezva konstrukce na pojezd vozidla	44
6.5.1 Model zatížení	44
6.5.2 Model útlumu konstrukce	50
6.5.3 Výpočet odezvy	50
6.5.4 Výsledky	51
6.6 Výpočtový model pevné jízdní dráhy RHEDA 2000	56
6.6.1 Tvorba modelu	56

6.6.2	Vstupní parametry modelu	60
6.7	Statická odezva konstrukce	61
6.8	Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu	63
6.9	Dynamická odezva konstrukce na pojezd vozidla	65
6.9.1	Model zatížení	65
6.9.2	Model útlumu konstrukce	65
6.9.3	Výpočet odezvy	65
6.9.4	Výsledky	66
6.10	Porovnání výsledků	71
7	Závěr	72
8	Literatura	73
9	Seznam obrázků	74

1 Úvod

Pro zachování konkurenceschopnosti železniční dopravy je třeba další vývoj umožňující zvyšování rychlosti, bezpečnosti, ekologičnosti a komfortu přepravy. Vzhledem k těmto požadavkům rostou nároky jak na kvalitu vozidel, tak na konstrukci železniční tratě. Aby bylo možné optimalizovat konstrukci železniční tratě, je nutné analyzovat děje, ke kterým v konstrukci dochází při zatížení železničními vozidly.

Prostorové výpočtové modely kolejového roštu na pružném vrstevnatém poloprostoru popisují nejlépe chování skutečné železniční tratě. Tyto modely vystihují geometrické uspořádání konstrukčních prvků, jejich mechanické vlastnosti a korektní rozdělení kolových sil na konstrukci. Jsou sestaveny z objemových konečných prvků s pružnými a tlumícími vazbami. Výpočty jsou prováděny metodou konečných prvků po zadání zatížení a okrajových podmínek. Vzhledem ke složitosti řešení odezvy prostorových modelů se používají komerční programy pro řešení statických a dynamických úloh metodou konečných prvků. Tyto programy mají nástroje umožňující zadání geometrie modelu, vytvoření sítě konečných prvků, zadání zatížení a okrajových podmínek. Komplexnost modelů je tak limitována především výpočetní technikou [1].

Cílem této práce je studium možností modelování konstrukce železniční tratě a výpočet odezvy při statickém i dynamickém zatížení. V teoretické části práce bude popsáno konstrukční uspořádání koleje a parametry jednotlivých konstrukčních prvků. Následně budou rozebrány postupy řešení statické a dynamické odezvy konstrukce železniční tratě přímým řešením diferenciálních rovnic dle Timošenka a Frýby a metodou konečných prvků.

V praktické části bude nejdříve sestaven rovinný výpočtový model železniční tratě a vypočtena odezva při statickém a dynamickém zatěžování. Platnost modelu bude ověřena porovnáním odezvy vypočtené metodou konečných prvků s analytickým řešením příslušných diferenciálních rovnic. Poté budou sestaveny prostorové výpočtové modely koleje v přímé pro dvě varianty: klasickou jednokolejnou konstrukci koleje v zářezu a pevnou jízdní dráhu typu RHEDA 2000. Bude vypočtena statická odezva a vlastní tvary a frekvence kmitu. Následně bude model zatěžován pojezdem železničního vozidla při různých rychlostech a bude analyzována dynamická odezva modelu. Zvolený software pro modelování je programový systém ANSYS Classic.

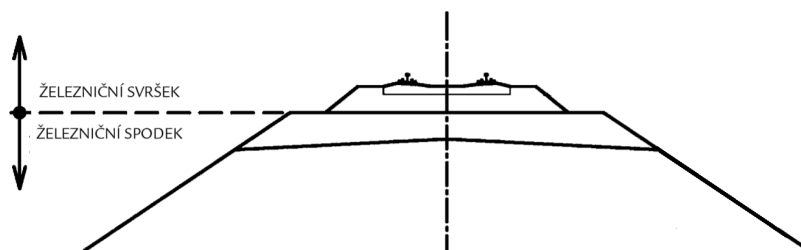
2 Konstrukce železniční tratě

V dnešní době se v České republice můžeme setkat s dvěma typy konstrukčního uspořádání železniční tratě, a to klasickou konstrukcí a pevnou jízdni dráhou. Klasická konstrukce je tvořena kolejovým roštem, který se skládá z kolejnicových pásů upevněných na příčných pražcích, a je uložen ve štěrkovém loži. V případě nedostatečné únosného podloží jsou pod štěrkovým ložem zřízeny konstrukční a podkladní vrstvy. V pevné jízdni dráze jsou příčné pražce součástí monolitické betonové desky. Betonová deska je uložena na stabilizované roznášecí vrstvě, pod kterou se běžně nachází ochranná vrstva proti mrazu. Typ pevné jízdni dráhy používaný v České republice je RHEDA 2000.



Obrázek 1: Pevná jízdni dráha typu RHEDA 2000 v úseku Třebovice-Rudoltice 

Konstrukce železniční tratě se ze stavebního hlediska dělí na železniční svršek a železniční spodek. Požadavky na konstrukci železničního svršku se zabývá *Předpis SŽDC S3 - Železniční svršek*, požadavky na konstrukci železničního spodku definuje *Předpis SŽ S4 - Železniční spodek*.

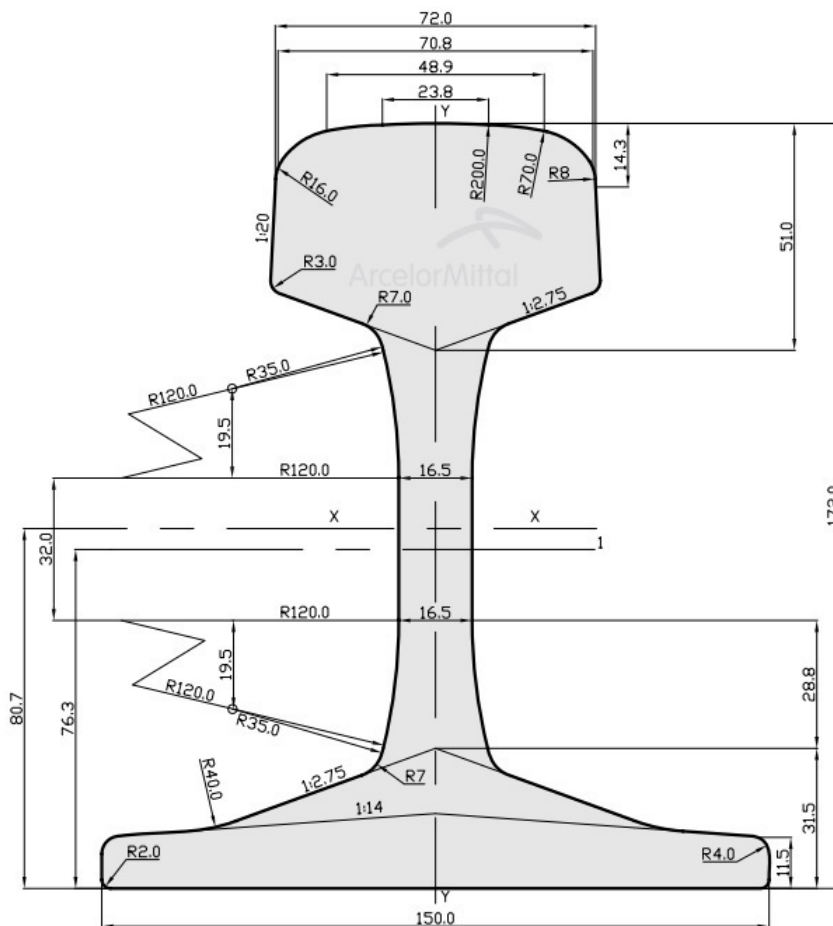


Obrázek 2: Rozdělení konstrukce koleje na železniční svršek a spodek

2.1 Železniční svršek

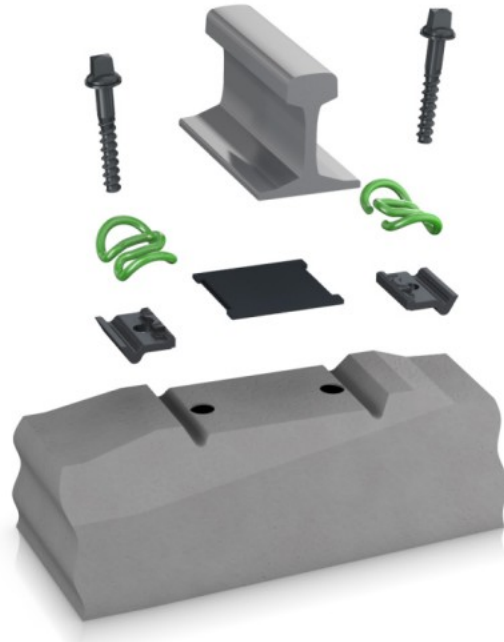
Železniční svršek, zajišťující nosnou a vodící funkci, je v případě klasické konstrukce tvořen kolejnicemi, upevňovacími, pražci a kolejovým ložem. V případě pevné jízdní dráhy tvoří železniční svršek kolejnice, upevňovací a pražce zalité do monolitické betonové desky.

Kolejnice používané v současné době v hlavních kolejích jsou téměř výhradně širokopátní kolejnice typu UIC60, vyrobené z oceli jakosti UIC 900A s minimální pevností v tahu 880 MPa, s profilem 60 E1 nebo 60 E2. Profil 60 E1 se od profilu 60 E2 liší pouze poloměrem zaoblení hlavy kolejnice a ve většině případů se přebíruje na tvar 60 E2.



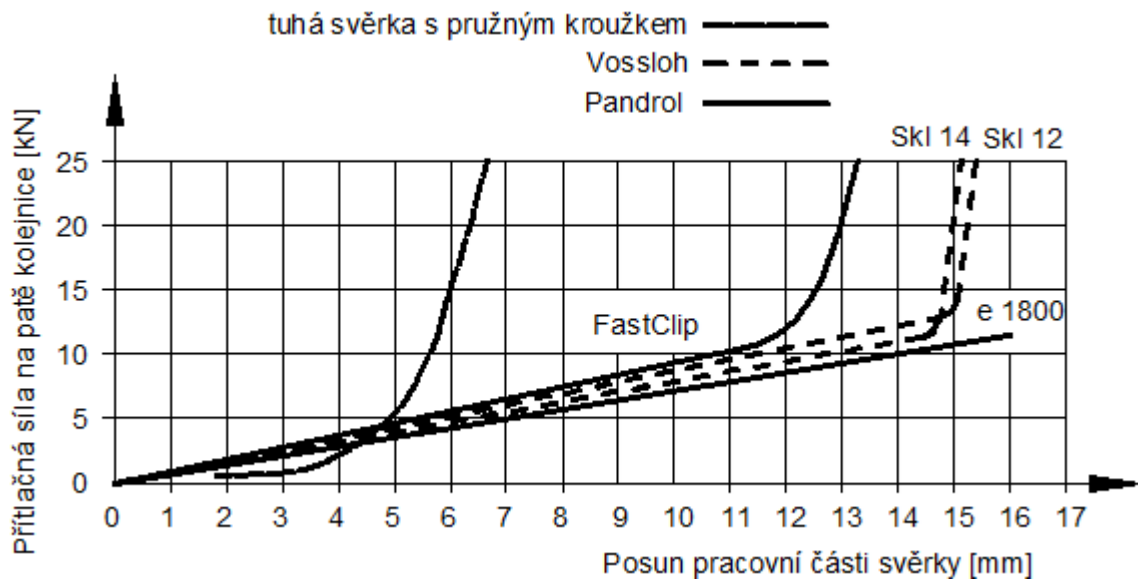
Obrázek 3: Profil kolejnice 60 E2 [10]

Systém uzlu upevnění zajišťuje tuhé a zároveň pružné upevnění kolejnic na příčných pražcích za dodržení předepsané hodnoty rozchodu koleje a úklonu kolejnic, běžně v dostředném sklonu 1:40. V České republice je v současnosti v širší trati klasické konstrukce používáno především bezpodkladnicové upevnění typu W14 vyráběné firmou Vossloh. Uzel upevnění se skládá z úhlových vodících vložek, pružné pryžové podložky pod patu kolejnice, upínacích svěrek a šroubů. Úhlová vodící vložka pomáhá v zajištění korektní polohy kolejnice. Pryžová podložka pod patu kolejnice tl. 6 mm zpružňuje uzel upevnění a při zatížení dochází k jejímu stlačení.



Obrázek 4: Systém upevnění Vossloh W14 [11]

Upínací svěrka Skl14 s bilineární tuhostí je předepnuta silou 10 kN. Bilineární tuhost umožňuje ztužení uzlu upevnění při podbýjení.



Obrázek 5: Bilineární tuhost různých typů svěrek [11]

V konstrukci pevné jízdní dráhy se používá upevnění typu Vossloh system 300. Hlavní rozdíl oproti upevnění W14 je systém zpružnění pod patou kolejnice: pod pružnou pryžovou podložkou tl. 6 mm je umístěna ocelová roznášecí deska tl. 16 mm a nakonec další vysoce elastická pryžová podložka tl. 12 mm. Celková tloušťka prvků pod patou kolejnice je tak 34 mm, s tuhostí 32-38 kN/mm. Svěrka Skl15 je předepnuta silou 10 kN.



Obrázek 6: Systém upevnění Vossloh system 300 [12]

V klasické konstrukci jsou používané příčné železobetonové pražce s předpjatou podélnou ocelovou výztuží, v současnosti se jedná především o pražce typu B91 S. V případě pevné jízdní dráhy typu RHEDA 2000 jsou příčné pražce tvořeny dvěma betonovými bloky pod kolejnicemi, spojenými podélnou ocelovou výztuží.



Obrázek 7: Pražce B 91S [13]



Obrázek 8: Dvoublokové pražce používané v systému RHEDA 2000 [14]

Příčné pražce jsou v klasické konstrukci umístěny na kolejovém loži, které zajišťuje přenos zatížení dál na pláš tělesa železničního spodku. Kolejové lože je standardně tvořeno štěrkem frakce 32/64 v předepsaném tvaru. Kolejové lože dále slouží ke zřízení převýšení koleje ve směrových obloucích a zpružnění konstrukce kolejového svršku, čímž jsou tlumeny dynamické účinky způsobené pojezdem vozidla.

Dvoublokové pražce jsou v pevné jízdni dráze RHEDA 2000 zabetonovány do monolitické betonové desky, která umožňuje zřízení požadovaných geometrických parametrů koleje a další přenos zatížení od vozidel do stabilizované konstrukční vrstvy.

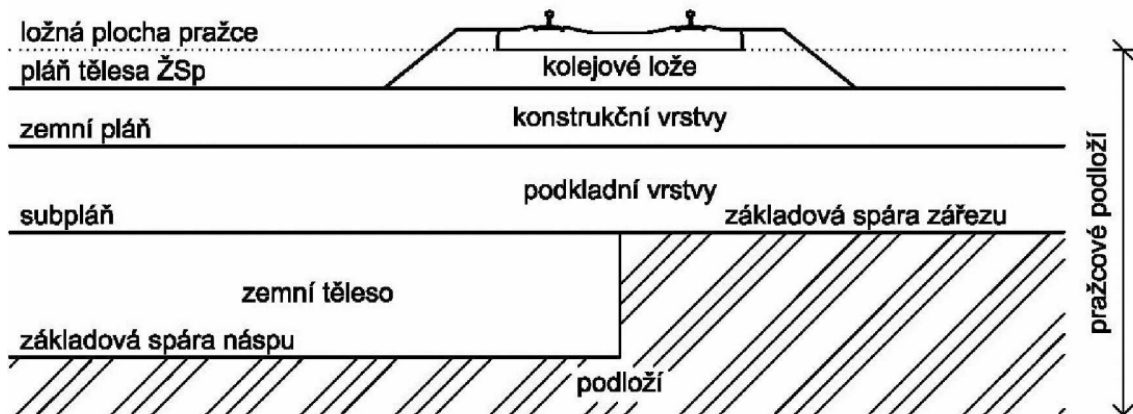
2.2 Železniční spodek

Železniční spodek je souhrnné označení pro těleso železničního spodku, stavby železničního spodku (jako jsou propustky, mosty, tunely a zdi), dopravní plochy a komunikace a zařízení železničního spodku. Těleso železničního spodku je tvořeno zemním tělesem a konstrukčními vrstvami, které slouží k uložení konstrukce železničního svršku v předepsané geometrické poloze a přenášení účinků dynamického zatížení vozidly bez trvalé deformace pláň tělesa železničního spodku.

Hranice mezi železničním svrškem a železničním spodkem se nazývá pláň tělesa železničního spodku, hranice mezi konstrukčními vrstvami a zemním tělesem je zemní pláň. Požadované hodnoty únosnosti na zemní pláni a pláni tělesa železničního spodku jsou vyjádřeny statickým modulem přetvárnosti, jehož hodnota je určena statickou zatěžovací zkouškou. Minimální hodnoty modulu přetvárnosti a metodiku zkoušení definuje *Předpis SŽ S4 - Železniční svršek*. Pro zajištění požadované únosnosti na pláni tělesa železničního spodku, řádného odvodnění a ochrany zemní pláň před mrazem se zřizují konstrukční vrstvy. V případě, že požadavky na únosnost nejsou splněny na zemní pláni, zřizují se podkladní vrstvy.

Konstrukční vrstvy jsou vrstvy materiálů mezi zemní plání a plání tělesa železničního spodku, které se až na výjimky zřizují vždy. Konstrukční vrstvy musí zajistit, aby deformace vyvolané statickým a dynamickým zatížením železničními vozidly působily v pružné oblasti, s vyloučením vzniku trvalých deformací. Konstrukční vrstvy mohou být nestmelené, stmelené a tvořené konstrukčními prvky. Nestmelené konstrukční vrstvy jsou zřizovány z přírodního kameniva (například písek nebo štěrkodrt), umělého kameniva (vysokopeční struska) nebo recyklovaných materiálů (výzisk z kolejového lože). Stmelené vrstvy zahrnují stabilizované zeminy. Konstrukční prvky představují geosyntetika, betonové desky, antivibrační rohože a tepelně izolační prvky.

Podkladní vrstvy jsou zřizovány především ze štěrkodrtě, dceňého kameniva nebo zemin zlepšených pojivem. Při zřízení podkladních vrstev vznikne subpláň oddělující podkladní vrstvy od zemního tělesa, pokud je trať v náspu, nebo základové spáry zářezu. Mezi subplání a zemní plání může být několik vrstev, přičemž ve spodních podkladních vrstvách se volí materiály s nižším modulem přetvárnosti, než je tomu u vrchních podkladních vrstev.



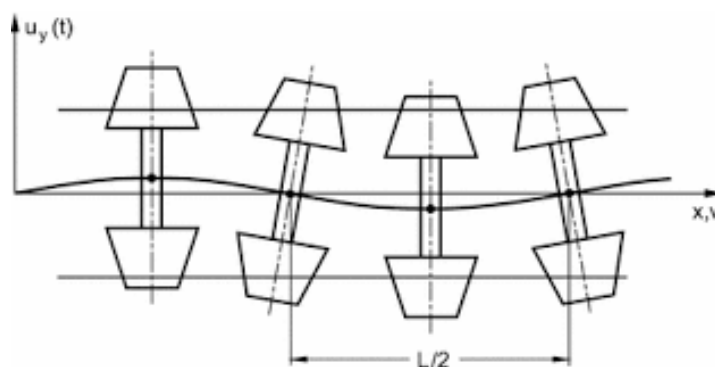
Obrázek 9: Uspořádání tělesa železničního spodku

3 Interakce železničních vozidel s tratí

Během pojezdu vozidel po železniční trati vznikají mezi koly a kolejnicemi významné dynamické interakční síly, způsobené pohybem odpružené hmoty vozidla po poddajné konstrukci železniční tratě. Dynamické interakční síly rostou se zvyšující se rychlostí pojezdu, nerovnoměrnou tuhostí tratě a imperfekcemi kol i kolejnic a vznikají na kontaktu kola a kolejnice. Dominantní je svislé zatížení, skládající se z tíhových a setrvačných účinků. Setrvačné účinky jsou způsobeny svislými vibracemi vozidel, které jsou vyvolány nerovnostmi kolejnic, nekruhovitostmi kol, poruchami tratě a její nerovnoměrnou tuhostí.

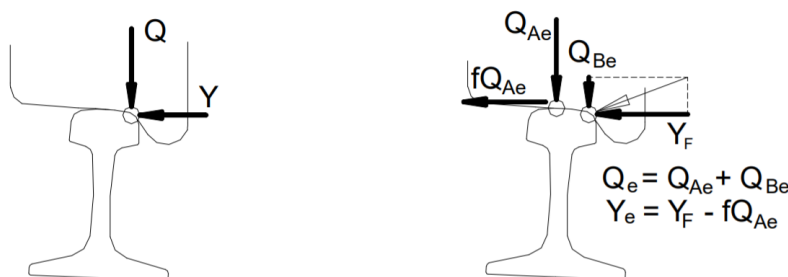
Nerovnosti kolejnic mohou být jak lokální závady, vznikající např. v místě nekvalitně provedeného svaru v bezстыkové koleji, tak i vady způsobené ojetím, jako jsou vlnkovitost, skluzové vlny a dlouhé vlny. Změny tuhosti konstrukce se vyskytují v místě poruch železničního spodku nebo při změně v konstrukci, kterou může být propust, přechod z širé tratě na mostní konstrukci nebo přechod z klasické konstrukce koleje na pevnou jízdní dráhu.

Ve vodorovném směru působí vodící, brzdné a rozjezdové síly nebo boční rázy. Vodorovné síly vznikají jako třecí síly na styku kola s kolejnicí nebo jako vodící síly působící kolmo ke kolejnici. Při jízdě železničního vozidla v přímé vykonává kuželovité dvojkolí nápravu sinusoidový pohyb způsobený rozdílnými poloměry valení kol. Tento jev, nazývaný se Klingelův pohyb, je zdrojem bočních sil.



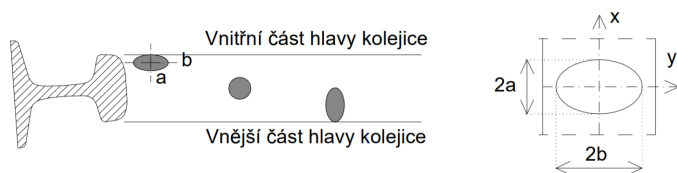
Obrázek 10: Sinusoidový pohyb dvojkolí [15]

Kontakt mezi kolem a kolejnicí může být jednobodový nebo dvoubodový, vznikající při vjezdu do oblouku na převýšené kolejnici. V případě jednobodového kontaktu působí svislá i vodorovná síla v jednom bodě, u dvoubodového kontaktu se působíště sil neshoduje.



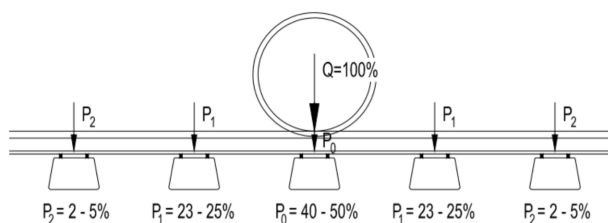
Obrázek 11: Jednobodový a dvoubodový kontakt [1]

Namáhání na styku kola a kolejnice popisuje Hertzova teorie. Ocel kola a kolejnice se na kontaktu pružně deformuje a vznikne tak eliptická kontaktní plocha. Velikost elipsy závisí na velikosti svisle působící síly na kontaktní plochu, poměr délek os elipsy je pak určen poloměry křivostí profilů kola a kolejnice. Průběh napětí na kontaktní ploše má tvar poloviny elipsoidu s maximální hodnotou napětí uprostřed.



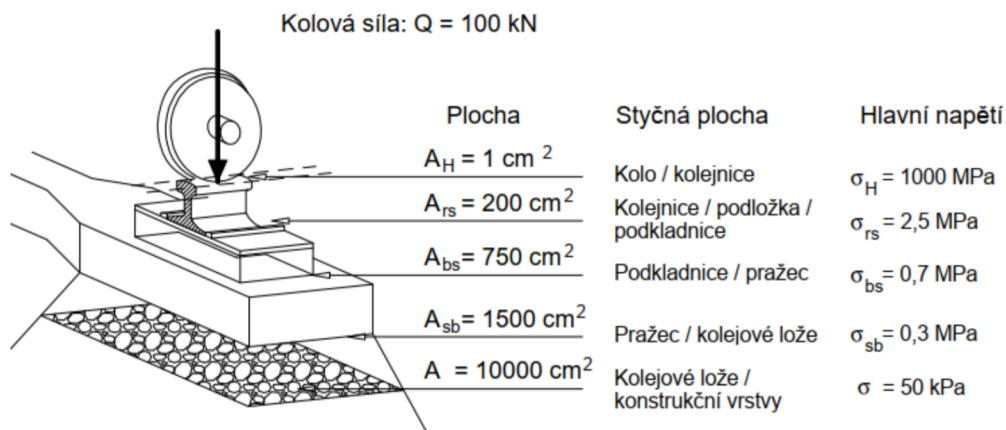
Obrázek 12: Kontaktní elipsa [1]

Přenos zatížení od vozidel z kolejnic do podloží je založen na principu redukce napětí. Nejvyšší hodnota napětí kolem 1000 MPa je na kontaktní elipse s plochou přibližně 100 mm². Asi 40-50 % kolové síly je přes kolejnici následně redistribuováno do podložky pod patou kolejnice na pražci pod kolem a poté na pražec. Nejbližší pražce jsou pak zatíženy asi 25 % kolové síly, na následující pár pražců případně hodnota kolové síly do 5 %.



Obrázek 13: Roznos svislé kolové síly na pražce [5]

Zatímco se napětí na kontaktu kola s kolejnicí pohybuje kolem zmiňované hodnoty 1000 MPa, nejvyšší hodnota napětí připadající na podložku je už jen asi 2,5 MPa a v konstrukční vrstvách se napětí pohybuje v řádu desítek kPa.



Obrázek 14: Hodnoty napětí na částech konstrukce po zatížení kolovou silou [5]

4 Základní postupy řešení

Řešení statických a dynamických úloh mechaniky železničních tratí je založeno na principech mechaniky, které jsou dle matematického tvaru řešení a mechanického významu formulovány jako přímé řešení diferenciálních nebo integrálních rovnic, nebo přibližné řešení využívající variační principy, v současnosti především metoda konečných prvků [1].

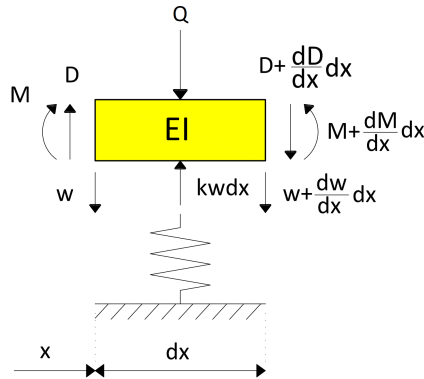
V následujícím textu jsou popsány vybrané postupy řešení odezvy železniční konstrukce následně použité při výpočtech v rámci této diplomové práce. V případě diferenciálních postupů se jedná o řešení dle Timošenska pro nekonečně dlouhý nosník na pružném podkladě a Frýbovo řešení, které rozšiřuje Timošenkův model o setrvačné účinky a tlumení. Pro řešení odezvy metodou konečných prvků byl zvolen programový systém ANSYS Classic. Následně jsou proto popsány základní postupy řešení odezvy v ANSYSu, které jsou uvedeny v *ANSYS Theory Reference* [4].

Řešení konkrétní úlohy oběma postupy, tedy vyřešením diferenciálních rovnic dle Timošenska a Frýby a výpočtem v ANSYSu, umožňuje následně porovnání výsledných hodnot, a tak i ověření korektní odezvy výpočtového modelu. Řešení diferenciálních rovnic bylo převzato z diplomové práce Pavla Kulicha [6].

4.1 Diferenciální postupy

4.1.1 Timošenkův model

V Timošenkově modelu je kolejnice modelována jako nekonečně dlouhý nosník definovaný ohybovou tuhostí. Nosník je na Winklerově pružném podloží se zadanou tuhostí, zatížen v místě x kolovou silou Q . Diferenciální rovnice vyháží z podmínky rovnováhy sil ve svilém směru na nekonečně malém elementu nosníku na pružném podkladu.



Obrázek 15: Schéma elementu Timošenkova modelu [6]

Diferenciální rovnice pro ohybovou křivku nosníku na pružném podkladu je

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = Q(x).$$

Po zavedení okrajových podmínek do obecného řešení diferenciální rovnice získáme

$$w(x) = \frac{QL^3}{8EI} e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right],$$

kde

$w(x)$ = svislý průhyb v místě x ,

Q = kolová síla,

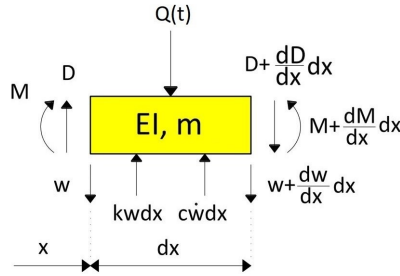
L = charakteristická délka kolejevého roštu, zohledňující nespojitost podepření. Platí:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}}.$$

EI = ohybová tuhost kolejnice.

4.1.2 Frýbův model

Timošenkův model nekonečně dlouhého nosníku na Winklerově pružném podloží byl následně rozšířen Frýbou o setrvačné účinky a účinky tlumení.



Obrázek 16: Schéma elementu Frýbova modelu [6]

Základní diferenciální rovnice je

$$EI \frac{d^4 w(x, t)}{dx^4} + m \frac{d^2 w(x, t)}{dt^2} + c \frac{dw(x, t)}{dt} + kw(x, t) = Q(x, t),$$

kde pohybující se sílu vyjádříme pomocí Diracovy delta funkce

$$Q(x, t) = P \delta(x - vt).$$

Bezrozměrná forma Diracovy delta funkce δ je

$$\delta(s) = \frac{1}{\lambda} \delta(x),$$

pro kterou platí

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(s) ds = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \delta(x) \lambda dx = 1,$$

$$\lambda = \left(\frac{k}{4EI}\right)^{\frac{1}{4}}.$$

Pro zjednodušení zavedeme relativní souřadnici s :

$$s = \lambda(x - vt) .$$

Po substituci získáme

$$\frac{dw}{dx} = \lambda \frac{dw}{ds} , \quad \frac{dw}{dt} = -\lambda v \frac{dw}{ds}.$$

Diferenciální rovnici poté zapíšeme jako

$$EI\lambda^4 \frac{d^4 w(s)}{ds^4} + m\lambda^2 v^2 \frac{d^2 w(s)}{s^2} + c\lambda v \frac{dw(s)}{ds} + kw(s) = Q(x, t).$$

Následuje úprava rovnice:

$$\frac{d^4 w(s)}{ds^4} + \frac{m\lambda^2 v^2}{EI\lambda^4} \frac{d^2 w(s)}{s^2} - \frac{c\lambda v}{EI\lambda^4} \frac{dw(s)}{ds} + 4 \frac{kw(s)}{4EI\lambda^4} = \frac{Q}{EI}(x, t).$$

Obecný tvar diferenciální rovnice lze zapsat jako

$$w(s) = A_1 e^{\gamma_1 s} + A_2 e^{\gamma_2 s} + A_3 e^{\gamma_3 s} + A_4 e^{\gamma_4 s}.$$

Řešení úlohy je nesymetrické a řeší se tak na dvou samostatných intervalech

$$s \leq 0 : w = A_1 e^{\gamma_1 s} + A_2 e^{\gamma_2 s},$$

$$s < 0 : w = A_3 e^{\gamma_3 s} + A_4 e^{\gamma_4 s}.$$

Okrajové podmínky vycházející ze spojitosti průhybové křivky lze zapsat následovně:

$$w_l = w_r \rightarrow A_3 + A_4 = A_1 + A_2,$$

$$\frac{dw_l}{ds} = \frac{dw_r}{ds} \rightarrow A_3 \gamma_3 + A_4 \gamma_4 = A_1 \gamma_1 + A_2 \gamma_2,$$

$$M_l = M_r \rightarrow A_3 \gamma_3^2 + A_4 \gamma_4^2 = A_1 \gamma_1^2 + A_2 \gamma_2^2,$$

$$D_l = D_r + Q \rightarrow A_3 \gamma_3^3 + A_4 \gamma_4^3 = A_1 \gamma_1^3 + A_2 \gamma_2^3 \frac{Q}{EI\lambda^3}.$$

Vzniklé rovnice je vhodné řešit v některém z výpočetních programů, například MATLAB.

4.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků vychází z diskretizace původní spojité konstrukce soustavou prvků a jejím výsledkem je přibližné řešení. Přesnost přibližného řešení závisí na konstrukci sítě konečných prvků (obecně bázových funkcí). Tvorba konečně prvkového modelu zahrnuje snahu vybalancovat především časovou náročnost výpočtu a dostatečně kvalitní výsledky. Čím přesnější model zahrnující více detailů máme, tím větší je přirozeně náročnost výpočtu.

4.2.1 Statická odezva konstrukce

Obecné rovnice rovnováhy řešené během lineární statické analýzy metodou konečných prvků jsou

$$[K]\{u\} = \{F\},$$

které lze zapsat jako

$$[K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\},$$

kde

$[K]$ = celková matice tuhosti, získaná sumarizací tuhostí jednotlivých prvků,

$\{u\}$ = vektor uzlových posunutí a rotací,

$\{F^a\}$ = vektor celkového aplikovaného zatížení,

$\{F^r\}$ = vektor reakcí od zatížení.

Po zadání okrajových podmínek jsou po vyřešení rovnic získány uzlová posunutí a rotace a také reakce od zatížení.

4.2.2 Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu

Pohybová rovnice netlumené soustavy je

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}.$$

Pro lineární netlumený systém je řešení pohybové rovnice ve tvaru

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cos \omega_i t.$$

Druhou derivací rovnice získáme zrychlení

$$\{\ddot{u}\} = -\omega_i^2 \{\phi\}_i \cos \omega_i t,$$

kde

$\{\phi\}_i$ = vlastní vektor, reprezentující vlastní tvar kmitu i -té vlastní frekvence,

ω_i = i -tá vlastní úhlová frekvence,

t = čas.

Následně dosadíme řešení i jeho druhou derivaci do původní rovnice a získáme

$$(-\omega_i^2[M] + [K])\{\phi\}_i = \{0\}.$$

Rovnice má dvě řešení. První z nich, kdy $\{\phi\}_i = 0$ považujeme za triviální. Netriviální řešení, kdy $\{\phi\}_i \neq 0$ platí, když je determinant soustavy roven nule:

$$\det[[K] - \omega_i^2[M]] = 0.$$

Po vyřešení rovnic jsou získány vlastní úhlové frekvence a tvary kmitu. Vlastní frekvence v Herzích jsou z vlastních úhlových frekvencí následně vypočteny jako

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}.$$

4.2.3 Obecná odezva konstrukce na dynamické zatížení

Řešené pohybové rovnice lineární dynamické soustavy jsou

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = F^a(t),$$

kde

$[M]$ = celková matice hmotnosti,

$[C]$ = celková matice tlumení,

$[K]$ = celková matice tuhosti,

$\{\ddot{u}(t)\}$ = vektor uzlových zrychlení,

$\{\dot{u}(t)\}$ = vektor uzlových rychlostí,

$\{u(t)\}$ = vektor uzlových posunutí a rotací,

$F^a(t)$ = vektor aplikovaných zatížení.

Rovnice je možné řešit třemi způsoby: Newmarkovou metodou, HHT metodou pro implicitní časovou analýzu, která je rozšířenou Newmarkovou metodou, a Backward Euler metodou. Následující text popisuje právě postup řešení Newmarkovou metodou, která byla použita při řešení dynamické odezvy v této diplomové práci.

Základní pohybové rovnice Newmarkovy metody mohou být formulovány jako

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\},$$

kde

$$\begin{aligned}\{\ddot{u}_{n+1}\} &= \text{vektor uzlových zrychlení } \{\ddot{u}(t_{n+1})\} \text{ v čase } t_{n+1}, \\ \{\dot{u}_{n+1}\} &= \text{vektor uzlových rychlostí } \{\dot{u}(t_{n+1})\} \text{ v čase } t_{n+1}, \\ \{u_{n+1}\} &= \text{vektor uzlových toací a posunů } \{u(t_{n+1})\} \text{ v čase } t_{n+1}, \\ \{F_{n+1}^a\} &= \text{vektor zatížení } \{F^a(t_{n+1})\} \text{ v čase } t_{n+1}.\end{aligned}$$

Pro rychlosti a posunutí v čase t_n platí

$$\begin{aligned}\{\dot{u}_{n+1}\} &= \{\dot{u}_n\} + [(1 - \delta)\{\ddot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t, \\ \{u_{n+1}\} &= \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + [(\frac{1}{2} - \alpha)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t^2,\end{aligned}$$

kde

α a β jsou Newmarkovy integrační parametry.

Newmarkovo integrační schéma se tak skládá ze základních pohybových rovnic tří konečných diferencí a tři neznámé $\{\ddot{u}_{n+1}\}$, $\{\dot{u}_{n+1}\}$, $\{u_{n+1}\}$ jsou numericky řešené třemi algebraickými rovnicemi se známými hodnotami $\{\ddot{u}_n\}$, $\{\dot{u}_n\}$ a $\{u_n\}$.

Prvně je vypočtena neznámá $\{u_{n+1}\}$ rovnicí

$$(a_0[M] + a_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\} + [M](a_0\{u_n\} + a_2\{\dot{u}_n\} + a_3\{\ddot{u}_n\}) + [C](a_1\{u_n\} + a_4\{\dot{u}_n\} + a_5\{\ddot{u}_n\}),$$

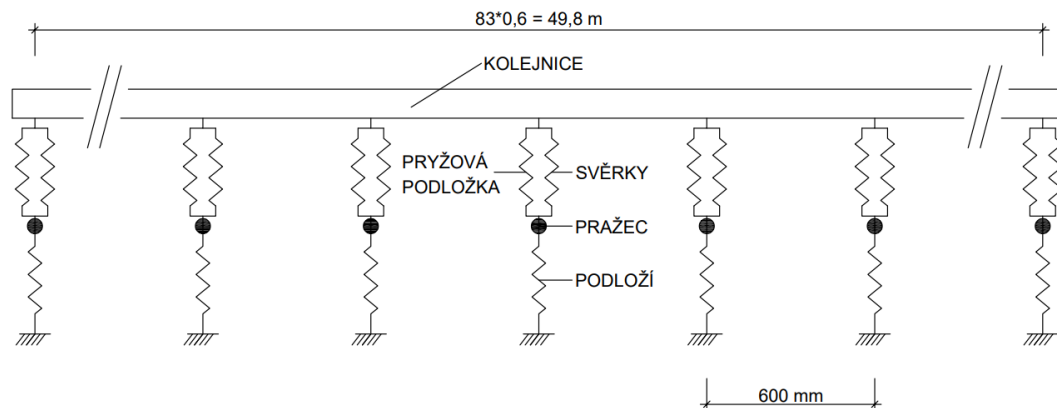
kde pro koeficienty a_i platí: $a_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}$, $a_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}$, $a_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}$, $a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$, $a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$, $a_5 = \frac{\Delta t}{2}(\frac{\delta}{\alpha} - 2)$, $a_6 = \Delta t(1 - \delta)$, $a_7 = \delta\Delta t$.

Poté řeší program zbylé dvě neznámé $\{\dot{u}_{n+1}\}$ a $\{u_{n+1}\}$:

$$\begin{aligned}\{\dot{u}_n\} &= a_1(\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) - a_4\{\dot{u}_{n+1}\} + a_5\{\ddot{u}_{n+1}\}, \\ \{\ddot{u}_n\} &= a_0(\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) - a_2\{\dot{u}_{n+1}\} + a_3\{\ddot{u}_{n+1}\}.\end{aligned}$$

5 Rovinný výpočtový model koleje

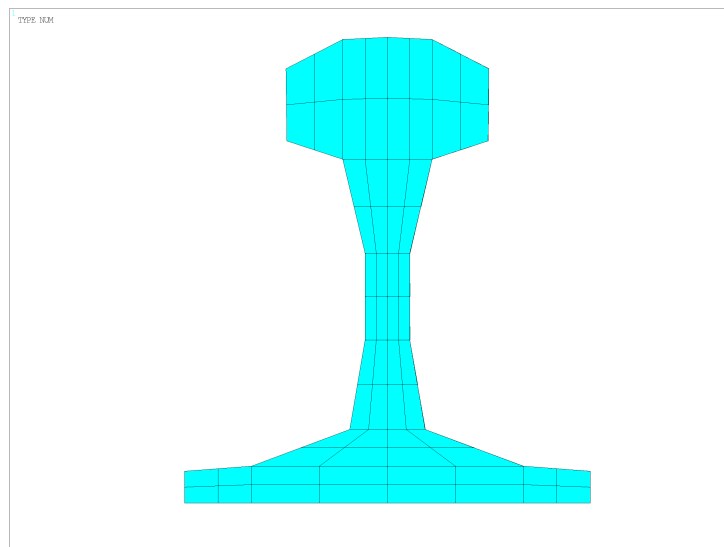
Rovinný výpočtový model reprezentuje podélnou polovinu koleje. Skládá se z kolejnice 60 E2 pružně upevněné na pražci B91S systémem upevnění Vossloh W14. Pražce jsou uloženy na pružném podloží. Kolejnice je modelována jako nosník s definovaným průřezem. Svěrky a podložka pod patu kolejnice jsou modelovány pružnými vazbami s definovanými tuhostmi. Pražec je zjednodušen na soustředěnou hmotnost. Podloží je modelováno pružnými vazbami s definovanou tuhostí.



Obrázek 17: Schéma rovinného výpočtového modelu

5.1 Tvorba modelu

Kolejnice je modelována prutovým prvkem BEAM188 se zadanou hustotou a součinitelem příčné kontrakce. Průřez kolejnice je zjednodušený profil kolejnice 60 E2, jehož plocha, moment setrvačnosti a těžiště odpovídají reálné kolejnici. Dělení průřezu na prvky je patrné na obrázku. V podélném směru je kolejnice dělena na prvky o délce 50 mm.

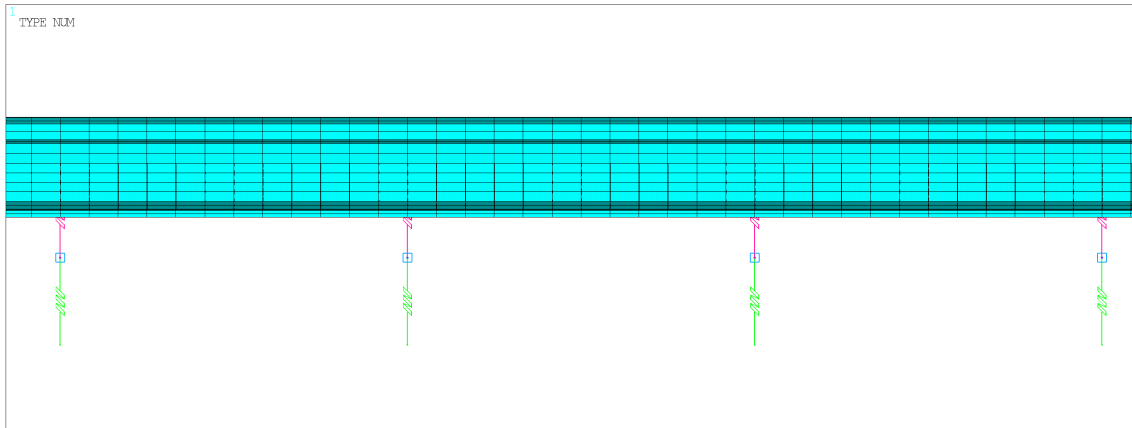


Obrázek 18: Profil a dělení kolejnice v rovinném modelu

Pryžová podložka pod patu kolejnice je modelována prvkem COMBIN14 a definována svou tuhostí. Statická tuhost podložky je určena statickou zatěžovací zkouškou, kdy byla na základě deformace podložky v rozsahu zatížení 50 kN až 70 kN určena hodnota sečné tuhosti 56 kN/mm. Pryž, ze které jsou podložky vyrobeny, se však vyznačuje nelineárním chováním. Experimentálními zkouškami lze ověřit tuhost podložek v závislosti na rychlosti zatížení, což umožňuje rozlišit statickou a dynamickou tuhost podložek. Hodnota dynamické tuhosti uvažované podložky je 176 kN/mm.

Pružné svěrky Skl14 jsou modelovány prvkem COMBIN14. Zadána je tuhost prvku 1,538 kN/mm odpovídající dvěma svěrkám. Hodnota předpínací síly ve svěrkách udávaná výrobcem je 20 kN. Během tvorby modelu byla zkontrolována hodnota předpínací síly po stlačení pružných podložek. Hodnota předpínací síly v upevnění po stlačení podložky je 19,442 kN. Předpínací síla tak poklesla o 558 N, vzhledem k původní hodnotě 20 kN se jedná o 2,79 %. Při následném nastavení hodnoty předpínací síly na hodnotu 20,5 kN klesne tato hodnota po stlačení podložky na 19,929 kN. Vzhledem k požadované hodnotě 20 kN se tak jedná o rozdíl asi o 0,4 %, který lze již považovat za zanedbatelný. Iterativně tak byla určena vstupní hodnota předpínací síly 20,5 kN.

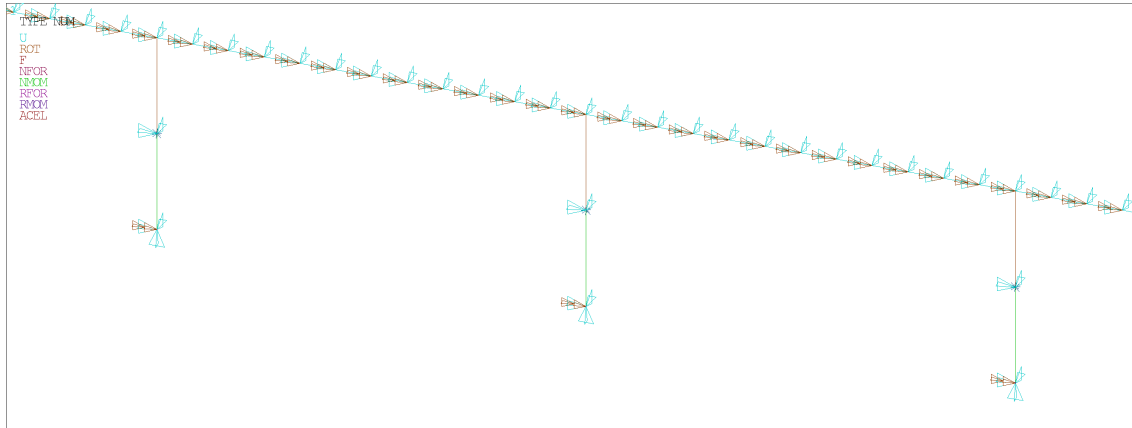
Rozdělení prážců v klasické konstrukci je $u = 600$ mm. V rovinném výpočtovém modelu je tak kolejnice podepřena v podélném směru každých 600 mm. Detail modelu je na následujícím obrázku (pružiny reprezentující svěrky a pryžovou podložku se překrývají).



Obrázek 19: Detail rovinného modelu

Pražec je v tomto modelu zjednodušen na soustředěnou hmotnost, modelovanou prvkem MASS21 a definovanou hmotností 160 kg, která odpovídá polovině hmotnosti pražce B91S. Podloží je modelováno prvkem COMBIN14 a definováno tuhostí 100 kN/mm. Hodnota tuhosti podloží byla iterativně určena tak, aby svislý posun kolejnice pod kolovými silami odpovídal asi 1,5 mm.

V modelu byly zadány okrajové podmínky tak, že kolejnice má zakázaný příčný i podélný posun, stejně jako rotaci kolem podélné osy. V krajních uzlech kolejnice jsou poté zakázány všechny posuny i rotace. Mezilehlý uzel, který definuje polohu pražce, a tak zároveň i jeden z dvojice uzlů prvku COMBIN14 reprezentujících upevnění a jeden z dvojice uzlů pružiny podloží, má zakázaný posun v příčném a podélném směru. Spodní uzel podloží má zakázané posuny ve všech třech směrech a rotaci kolem osy x .



Obrázek 20: Zadané okrajové podmínky

5.2 Vstupní parametry modelu

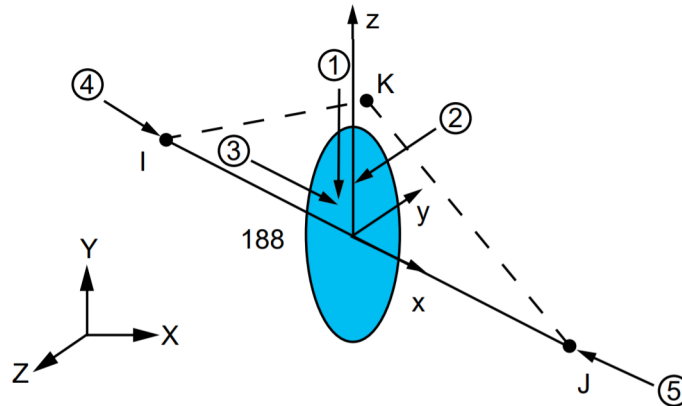
Kolejnice		BEAM188
Profil kolejnice		60 E2
Modul pružnosti	[Pa]	21E9
Součinitel příčné kontrakce	[-]	0,3
Hustota	[kg/m ³]	7850
Podložka pod patu kolejnice		COMBIN14
Statická tuhost	[N/m]	5,6E7
Dynamická tuhost	[N/m]	1,76E8
Svěrky		COMBIN14
Tuhost	[N/m]	7,69E5 * 2
Předpínací síla	[N]	1,025E4 * 2
Pražec		MASS21
Hmotnost	[kg]	160
Podloží		COMBIN14
Tuhost	[N/m]	1E8

5.3 Popis použitých konečných prvků

5.3.1 BEAM188

Prutový prvek BEAM188 je 3D prvek definován uzly I, J a uzlem K, který umožňuje měnit orientaci prvku. V uzlech I a J má prvek 6 stupňů volnosti – posuny ve směru x , y , z a rotace kolem os x , y a z . Prvek je založen na Timošenkově teorii prutu, zahrnuje tedy účinky smykové deformace. Příčné smykové napětí v průřezu je konstantní, průřezy po deformaci zůstávají rovinné. Prvek umožňuje jak lineární, tak i nelineární výpočty s velkými deformacemi a rotacemi.

Zatížení je aplikováno na uzly a je zadáváno jako síly. Spojité zatížení může být zadáno jako povrchové zatížení.



Obrázek 21: Prvek BEAM188 [4]

Uzly: I, J, K (K - orientační uzel, doporučen)

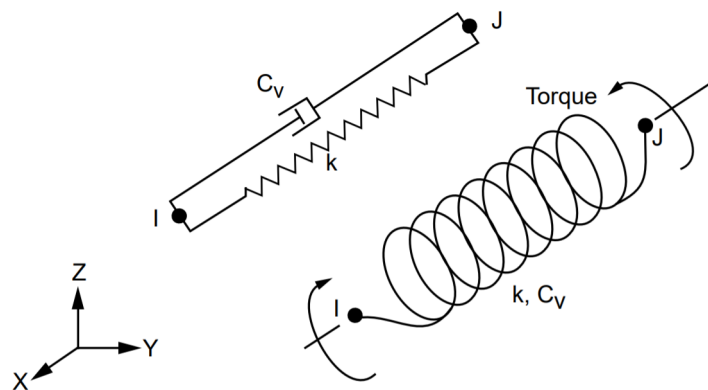
Stupně volnosti: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ

Průřezové charakteristiky: zadání průřezu v programu

Materiálové charakteristiky: EX, (PRXY nebo NUXY), GXY, GXZ, ALPX (nebo CTEX nebo THSX), DENS, ALPD, BETD

5.3.2 COMBIN14

Prvek COMBIN14 je translační a rotační prvek, který se používá v 1D, 2D i 3D modelech. Při podélném přenosu sil má prvek v každém uzlu 3 stupně volnosti, a to posun ve směru x , y a z . Při přenosu torze se jedná o čistě rotační prvek se třemi stupni volnosti, a to rotace kolem os x , y a z . Ohybové chování se nezohledňuje, s hmotností prvku se nepočítá. Prvek je definován dvěma uzly I a J, tuhostí K, koeficienty tlumení CV1 a CV2 a hodnotou předpětí zadávanou jako síla.



Obrázek 22: Prvek COMBIN14 [4]

Uzly: I, J

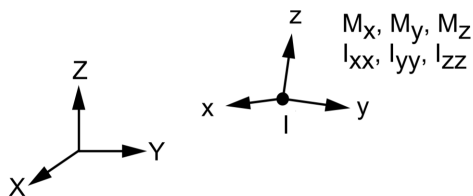
Stupně volnosti: UX, UY, UZ při translačním přenosu sil, ROTX, ROTY, ROTZ při přenosu torze, UX, UY pro 2D variantu

Vlastnosti prvku: K, CV1, CV2, předpětí

Materiálové charakteristiky: BETD - tlumení

5.3.3 MASS21

Prvek MASS21 má 6 stupňů volnosti, a to posunutí ve směru x , y a z a rotace kolem os x , y a z . Prvek je definován jedním uzlem, hmotností a momenty setrvačnosti, které se mohou v jednotlivých směrech lišit.



Obrázek 23: Prvek MASS21 [4]

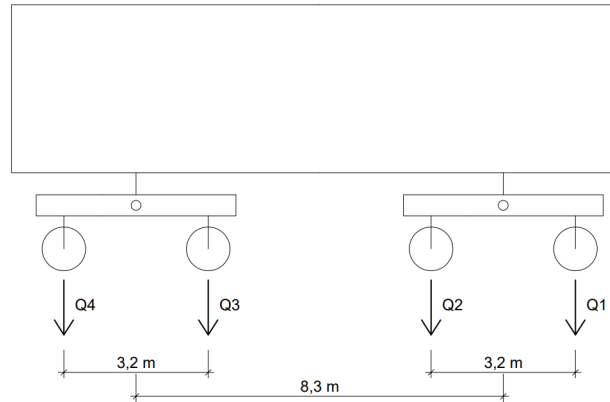
Uzly: I

Stupně volnosti: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ

Vlastnoti prvku: MASSX, MASSY, MASSZ, IXX, IYY, IZZ, KE CN

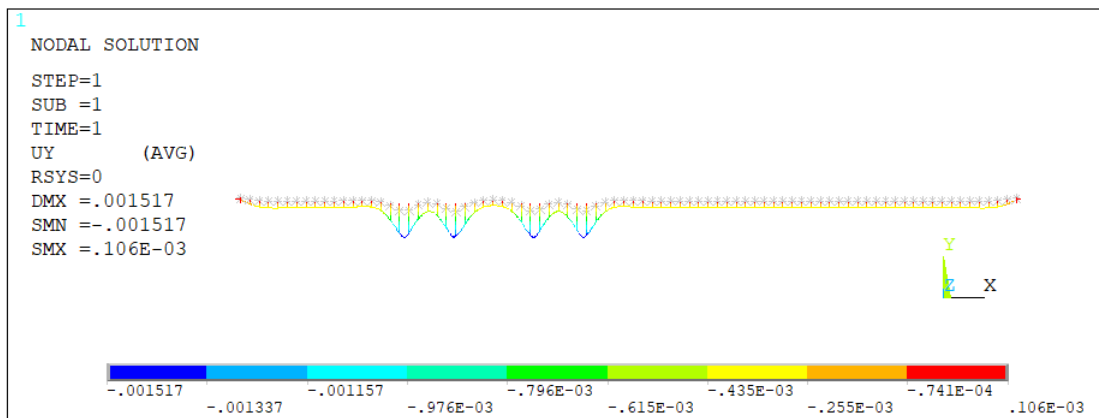
5.4 Statická odezva konstrukce

Při výpočtu statické odezvy byl model zatížen svislými silami reprezentujícími stojící vozidlo o hmotnosti 86 t. Hodnota uvažované kolové síly je 107,5 kN, rozdělená na dvě svislé síly působící v uzlech na hlavě kolejnice. Rozvor náprav je 3,2 m a vzdálenost otočných čepů náprav je 8,3 m. Při výpočtu statické odezvy je uvažovaná statická hodnota tuhosti pryžové podložky pod patou kolejnice.



Obrázek 24: Model zatížení lokomotivou ř. 150 při výpočtu statické odezvy

Byla vypočtena pole posunutí, napětí a přetvoření. Hodnoty svislých posunů po statickém zatížení modelu svislými kolovými silami jsou patrné z následujícího obrázku.

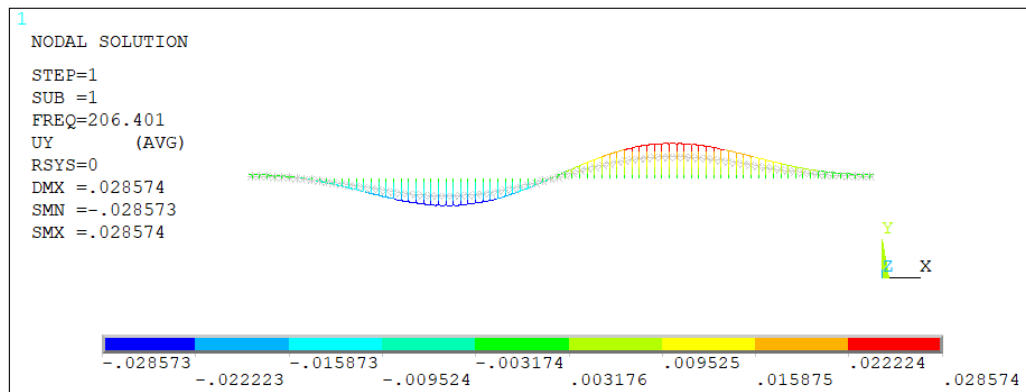


Obrázek 25: Posunutí u_y při zatížení stojícím vozidlem

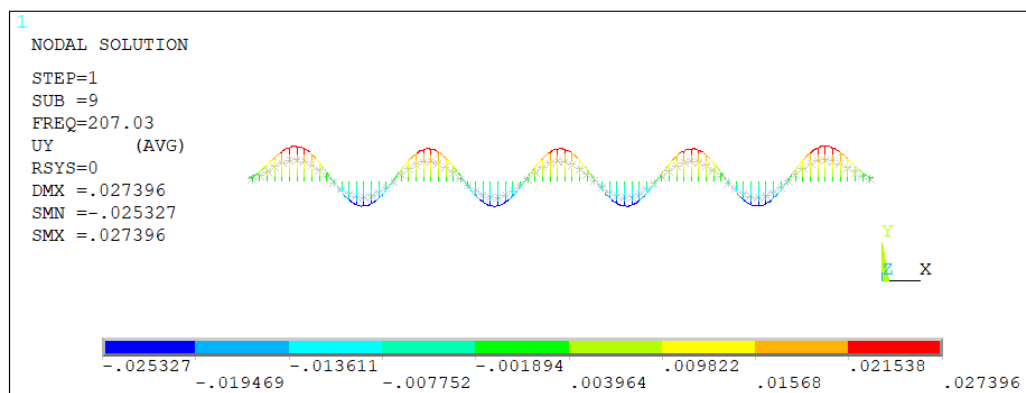
5.5 Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu

Modální analýza byla využita k získání vlastních tvarů kmitů a k nim příslušícím vlastním frekvencím. Lanczosovou metodou bylo určeno 20 vlastních tvarů kmitu a frekvencí. Znalost vlastních frekvencí následně umožní výpočet tlumících koeficientů zadávaných při výpočtu dynamické odezvy koleje.

Vlastní frekvence			
Číslo vlastního tvaru	Vlastní frekvence [Hz]	Číslo vlastního tvaru	Vlastní frekvence [Hz]
1	206,40	11	207,83
2	206,40	12	208,42
3	206,40	13	209,18
4	206,42	14	210,12
5	206,45	15	211,28
6	206,51	16	212,67
7	206,62	17	214,33
8	206,79	18	216,27
9	207,03	19	218,53
10	207,37	20	221,12



Obrázek 26: Vlastní tvar kmitu rovinného výpočtového modelu při frekvenci $f_1=206,40$ Hz

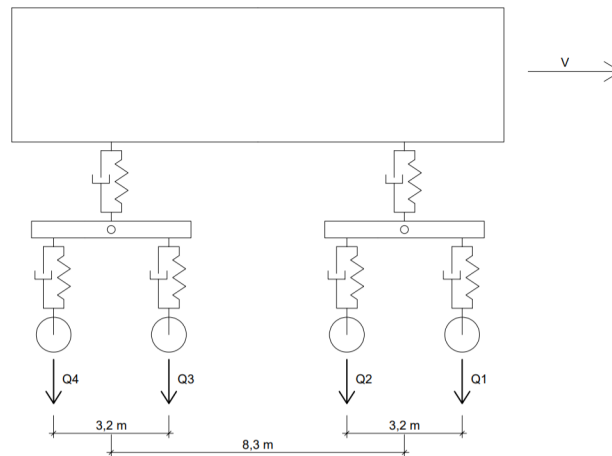


Obrázek 27: Vlastní tvar kmitu rovinného výpočtového modelu při frekvenci $f_9=207,03$ Hz

5.6 Dynamická odezva konstrukce na pojezd vozidla

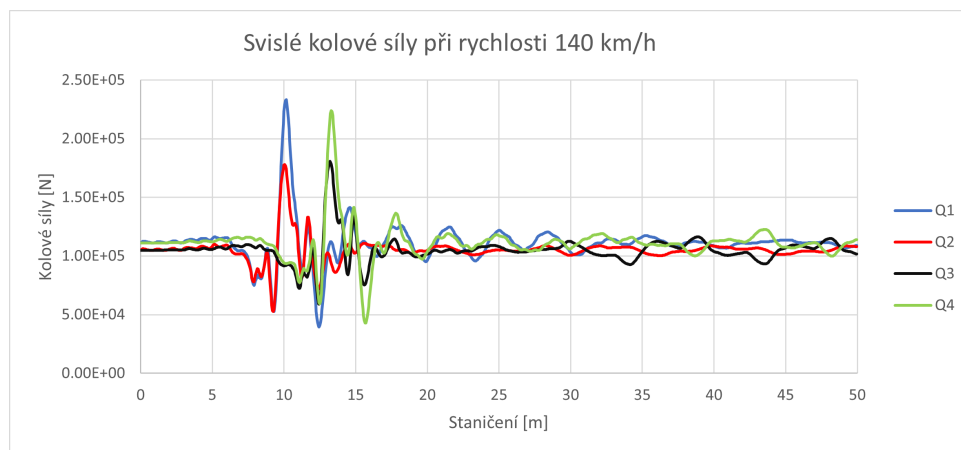
5.6.1 Model zatížení

Pro získání odezvy rovinného modelu na účinky pojezdu vozidla různou rychlostí je třeba simulovat pohybující se vlak soustavou sil postupně měnící svou polohu v závislosti na jízdě vozidla. Tyto síly byly získány simulací pojezdu lokomotivy řady 150 po realisticky zakřivené koleji. Lokomotiva byla idealizována výpočtovým modelem, představující mechanismus složený z absolutně tuhých těles propojených pružinami, tlumiči a klouby.

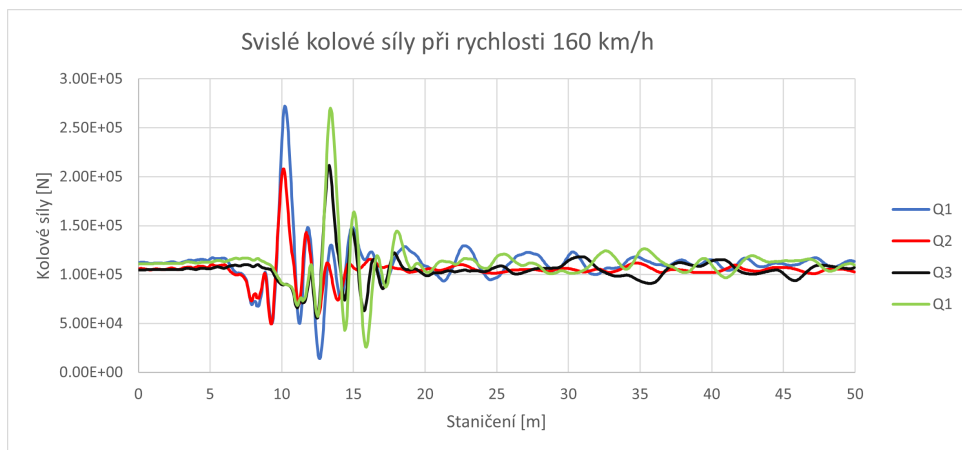


Obrázek 28: Schéma výpočtového modelu lokomotivy ř. 150

Pro rovinný model v této diplomové práci byly použity hodnoty svislých sil simulující pojezdu lokomotivy řady 150 rychlostí 140 a 160 km/h po realisticky zakřivené koleji. Průběh sil je vykreslen na následujících grafech. Velikost sil osciluje kolem statické hodnoty síly 107,5 kN. Tyto odchylky od statické hodnoty vnášejí do modelu dynamické účinky. Součástí simulace byl také přejezd lokomotivy přes lokální závadu, v tomto případě prosedlý styk. V místě přejezdu dochází k rázu a hodnota kolových sil se tak v místě závady násobně zvýší. Čím vyšší je rychlost vozidla, tím vyšší je přirozeně také nárůst síly, jak lze pozorovat na následujících grafech.



Obrázek 29: Průběh hodnot svislých kolových sil při rychlosti 140 km/h



Obrázek 30: Průběh hodnot svislých kolových sil při rychlosti 160 km/h

5.6.2 Model útlumu konstrukce

Při řešení dynamické odezvy byl použit Rayleighův model tlumení s maticí tlumení c_{damp} , který se vyjadřuje jako lineární kombinace matice hmotnosti a matice tuhosti:

$$\mathbf{C}_{damp} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K},$$

kde α a β jsou bezrozměrné tlumící koeficienty. Pro výpočet koeficientů jsou použity významné vlastní frekvence získané modální analýzou v ANSYSu. Alfa tlumení je poté účinné při nízkých frekvencích kmitání a při tlumení translačních a toračních pohybů tělesa, zatímco beta tlumení omezuje kmitání při vyšších frekvencích. Hodnoty koeficientů jsou určeny pomocí následujících vztahů:

$$\alpha = 4\pi\zeta \frac{f_i f_j}{f_i + f_j}$$

$$\beta = \frac{\zeta}{\pi(f_i + f_j)}$$

kde ζ je poměrný útlum konstrukce a f_i a f_j jsou významné vlastní frekvence.

Poměrný útlum byl určen jako 10 %, významné frekvence $f_i = 206,40$ Hz a $f_j = 207,03$ Hz. Následně byly vypočteny koeficienty α a β :

$$\alpha \doteq 129,88$$

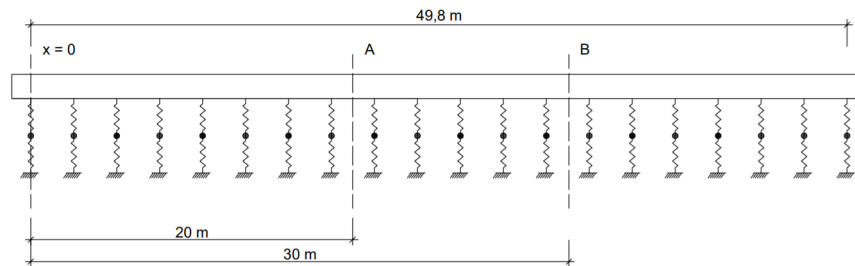
$$\beta \doteq 7,70E - 5$$

5.6.3 Výpočet odezvy

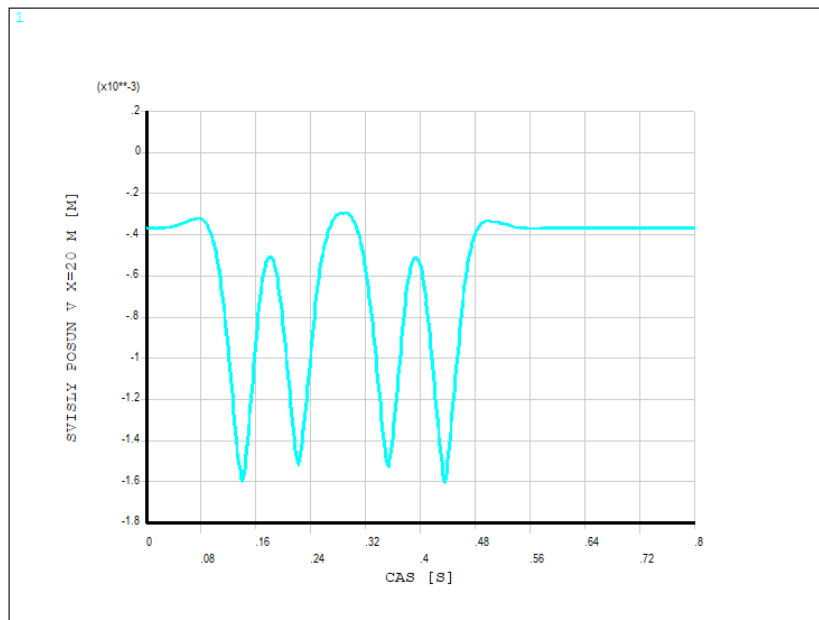
Během výpočtu je nejprve simulován pojezd vozidla po 46,8 m koleje rychlostí 140 km/h a následně rychlostí 160 km/h. Zadané parametry pro časovou integraci jsou rychlost, celkový čas, časový krok a počet kroků. Časový krok vychází z podélného dělení kolejnice po 50 mm a rychlosti pojezdu vozidla. Kolové síly jsou rozmístěny tak, aby byly dodrženy vzdálenosti mezi podvozky a nápravami. V prvním kroku výpočtu jsou síly přiloženy do výchozí polohy a model je staticky zatížen. Následně je zapnuta časová integrace a síly jsou postupně přikládány na uzly odpovídající rychlostí. Výpočet tak neuvažuje rozjíždění/brždění vozidla.

5.6.4 Výsledky

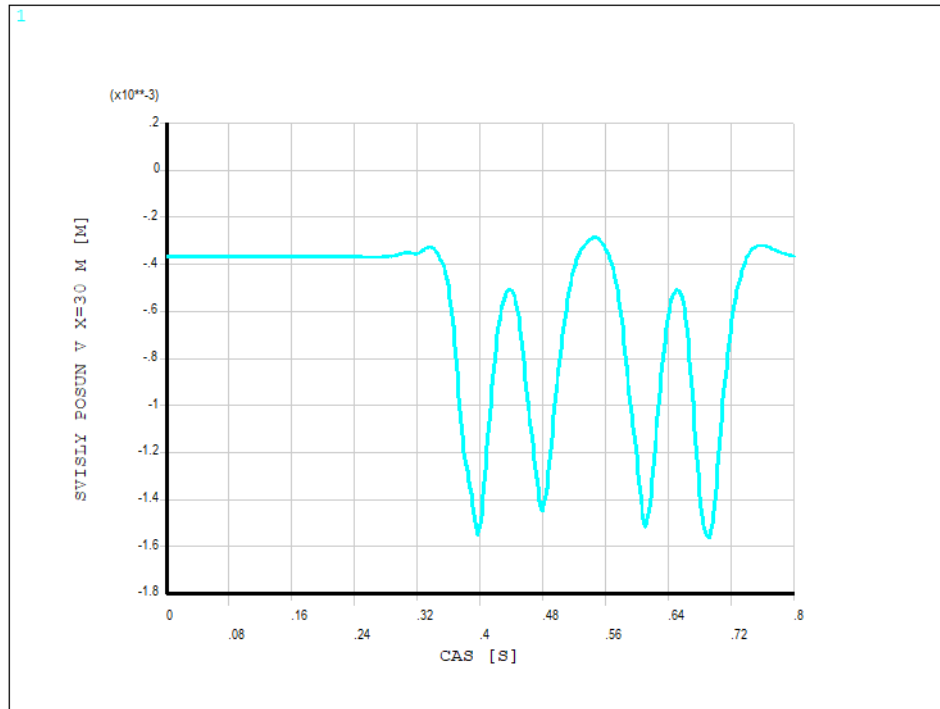
Byla vypočtena pole posunutí, napětí a přetvoření. Z výsledkového souboru byly zobrazeny hodnoty posunutí u_y ve místech A a B. Je zřejmé, že při dynamickém zatěžování je dosaženo vyšších hodnot svislých posunů. Při rychlosti 140 km/h je dosaženo maximální hodnoty svislého posunutí až 1,6 mm a během simulace pojezdu vozidla rychlostí 160 km/h byla hodnota svislého posunu až 1,8 mm, zatímco maximální hodnota svislého posunu při statickém zatížení je asi 1,5 mm.



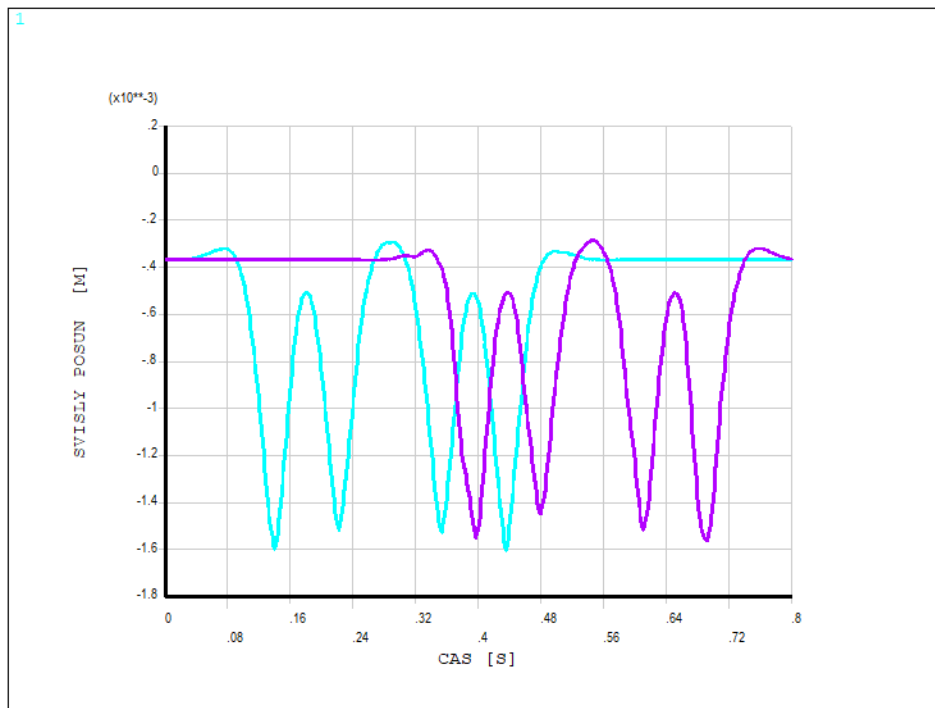
Obrázek 31: Poloha sledovaných míst A a B



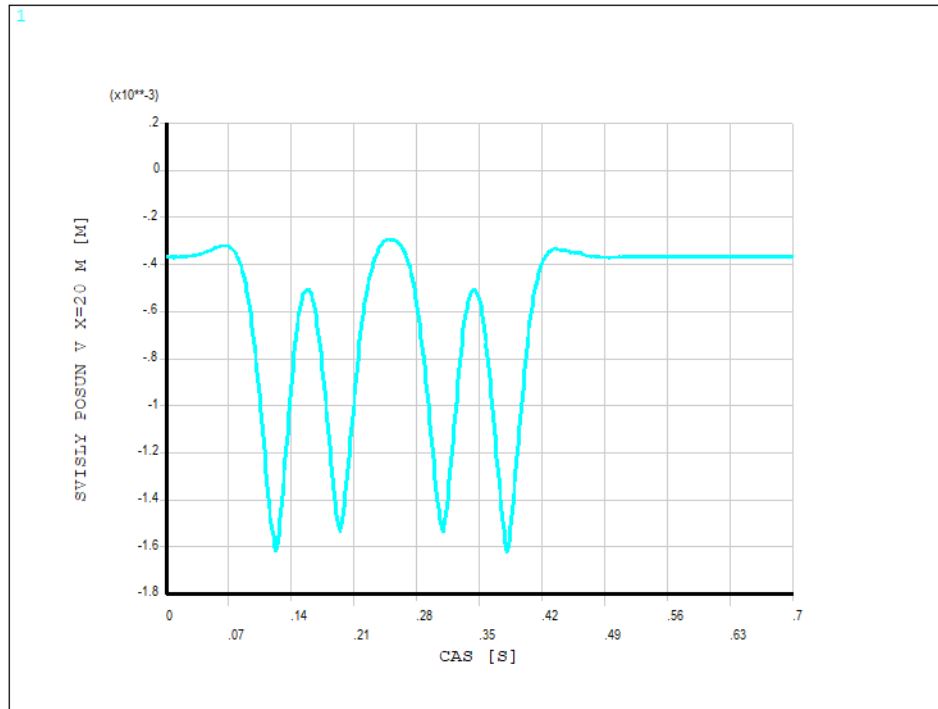
Obrázek 32: Posunutí u_y v místě A, $v = 140$ km/h



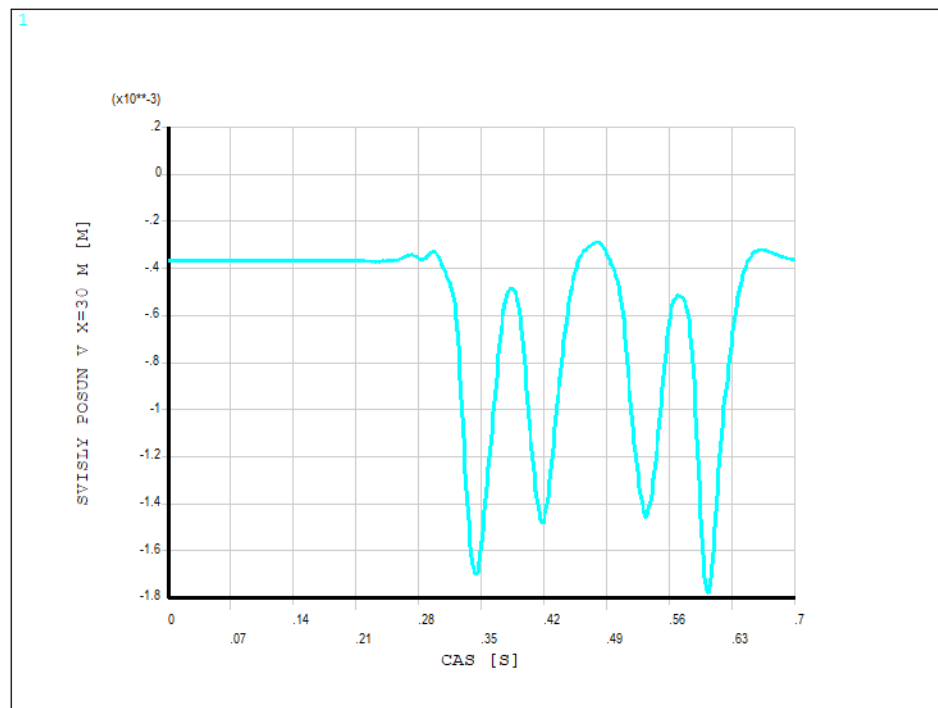
Obrázek 33: Posunutí u_y v místě B, $v = 140$ km/h



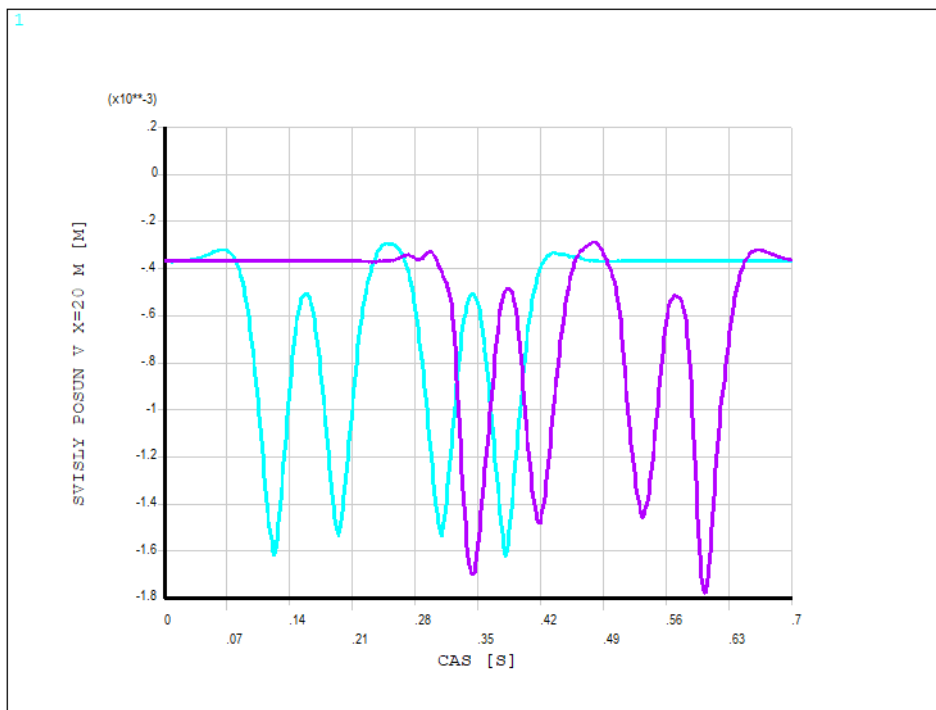
Obrázek 34: Posunutí u_y v místě A a B, $v = 140$ km/h



Obrázek 35: Posunutí u_y v místě A, $v = 160$ km/h



Obrázek 36: Posunutí u_y v místě B, $v = 160$ km/h



Obrázek 37: Posunutí u_y v místě A a B, $v = 160$ km/h

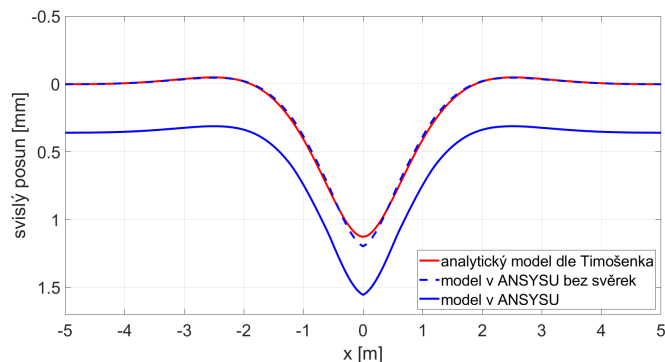
5.7 Porovnání odezvy výpočtového modelu s analytickým řešením

Pro ověření korektní odezvy rovinného výpočtového modelu byl svislý posun při zatížení kolovou silou 112,5 kN porovnán s analytickým řešením. Pro porovnání byl zvolen software MATLAB, ve kterém byly vyřešeny diferenciální rovnice popsané v sekci 4.1 *Diferenciální postupy*, a kam byly nahrány výsledky výpočtů z ANSYSu.

5.7.1 Statická odezva

V případě statického zatížení kolovou silou byly výsledné hodnoty svislých posunů porovnány s řešením dle Timošenska. V modelu bylo třeba odstranit pražce, jejichž hmotnost měla vliv jak na průhyb, tak i na tuhost modelu. Na výsledné hodnoty svislého posunu mají v modelu také značný vliv svěrky, které stlačením podložky předpínací silou zvyšují svislý posun kolejnice. Vliv svěrek je patrný z následující grafu, na kterém lze vidět:

- průhybovou křivku získanou analytickým řešením dle Timošenska,
- průhybovou křivku rovinného modelu v ANSYSu, kde byly odstraněny svěrky z výše uvedených důvodů,
- průhybovou křivku rovinného modelu v ANSYS, bez hmotnosti pražců, ale při ponechání svěrek.



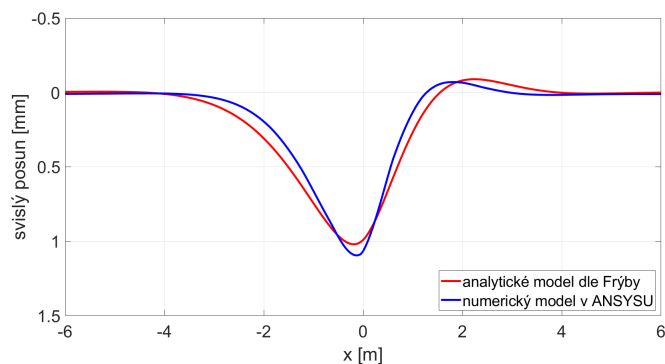
Obrázek 38: Porovnání odezvy na zatížení kolovou silou

Maximální hodnota svislého posunu pro kolovou sílu 112,5 kN je 1,13 mm dle analytického řešení, pro rovinný model v ANSYSu bez vlivu svěrek je to 1,20 mm. Maximální hodnota posunu získaná výpočtem metodou konečných prvků je tak o 0,07 mm větší, což je o 6 % více vzhledem k řešení dle Timošenka.

Rozdíl může být způsoben několika faktory: analytické řešení neuvažuje vliv smyku, na rozdíl od výpočtového modelu, kde je kolejnice modelována prvkem BEAM188, který zahrnuje i smykové účinky. Kolejnice je v analytickém řešení uvažovaná jako nekonečně dlouhý nosník, zatímco délka výpočtového modelu je přibližně 50 m. Další odlišností je také podepření kolejnice, které je v případě modelu po 600 mm, což odpovídá standardní hodnotě rozdělení prážců. Analytické řešení však uvažuje souvisle podepřenou kolejnici. V modelu je navíc kolejnice poměrně hrubě dělená, a to na 50 mm prvky v podélném směru, z důvodu doby trvání výpočtu.

5.7.2 Dynamická odezva

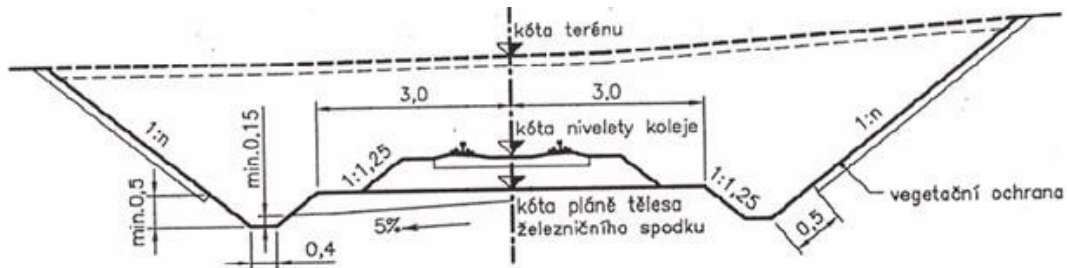
Pro porovnání odezvy výpočtového modelu na zatížení silou pohybující se rychlostí v (v tomto případě $v = 140$ km/h) byl zvolen analytický model dle Frýby, který rozšiřuje Timošenkovo řešení o účinky setrvačných sil a tlumení. Před výpočtem odezvy byly z výpočtového modelu odstraněny prážce a svěrky. Uvažována byla dynamická hodnota tuhosti podložky pod patou kolejnice. Při dynamickém zatížení lze opět pozorovat poměrně malý rozdíl v maximálním svislém posunu, a to 0,08 mm, a mírně odlišný tvar průhybové křivky. Stejně jako v případě porovnání statické odezvy modelu s Timošenkovým řešením se tak odezva mírně liší, vzhledem k popsaným faktorům však lze tyto rozdíly považovat za přijatelné.



Obrázek 39: Porovnání odezvy na zatížení pohyblivou silou

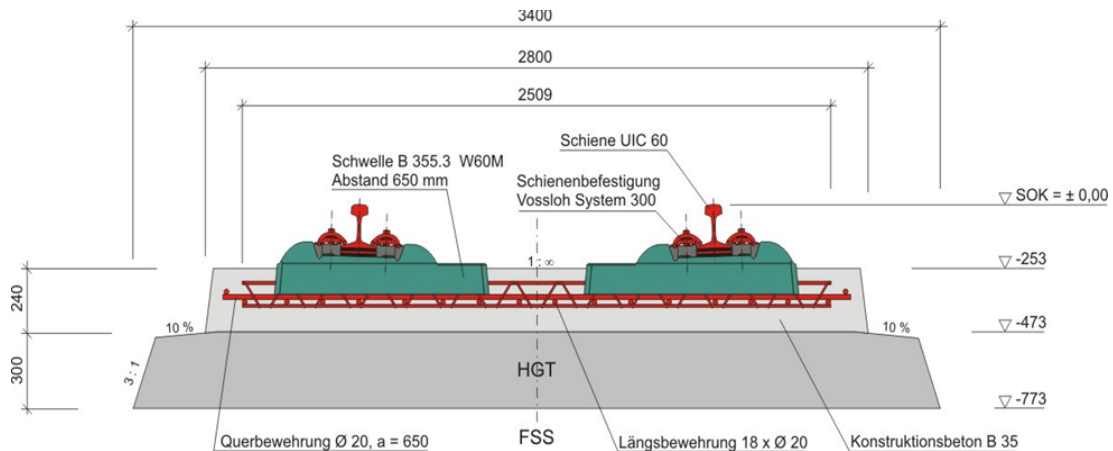
6 Prostorové výpočtové modely

Pro 3D modelování byly zvoleny dva typy konstrukce železniční trati. První je klasická konstrukce jednokolejné trati v zářezu. Základní konstrukční uspořádání klasické konstrukce definují *Vzorové listy železničního spodku*. Ty určují geometrii modelu klasické konstrukce, spolu s požadavkem na minimální tloušťku konstrukční vrstvy 150 mm. Kolejový rošt se skládá z kolejnice 60 E2, upevnění Vossloh W14 a prážců B91S. Pražcové podloží tvoří štěrkové kolejové lože, konstrukční vrstva a podloží.



Obrázek 40: Vzorový příčný řez jednokolejné železniční tratě v zářezu [16]

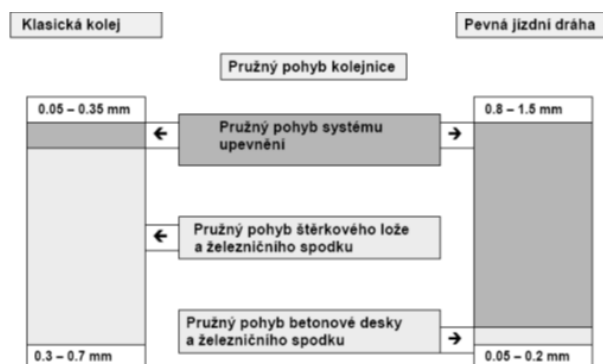
Druhým typem konstrukce je pevná jízdní dráha RHEDA 2000. Zjednodušená geometrie modelu byla určena v souladu se zobrazeným schématem. Kolejový rošt se skládá z kolejnic 60 E2, upevnění Vossloh system 300 a dvoublokových prážců zalitých v monolitické betonové desce. Pod betonovou deskou se nachází roznášecí vrstva z hydraulicky stmeleného materiálu (HGT). Ta je uložena na ochranné vrstvě proti nepříznivým účinkům vody a mrazu (FSS).



Obrázek 41: Konstrukční uspořádání pevné jízdní dráhy RHEDA 2000 [17]

Narozdí od klasické konstrukce koleje umožňuje systém upevnění v pevné jízdni dráze dostatečnou regulaci směrové a výškové polohy koleje pro účely vyrovnání lokálních provozních odchylek. Z hlediska mechanického chování přejímá systém upevnění v pevné jízdni dráze naprostou většinu svislé pružnosti, zatímco v klasické konstrukci je většina svislé pružnosti v pražcovém podloží.

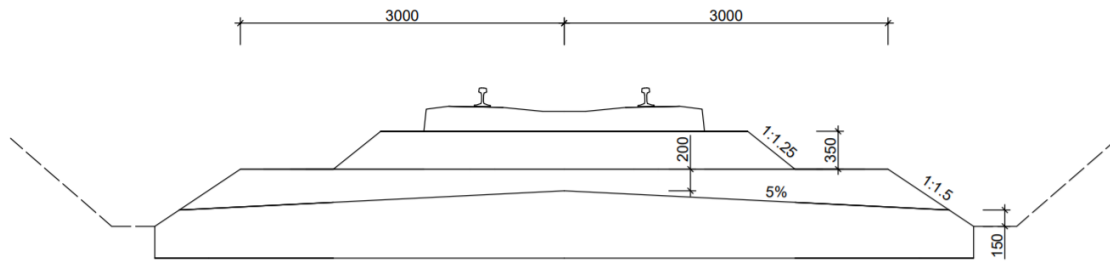
Pružný svislý posun kolejnice při zatížení kolovou silou je znázorněn na následujícím grafu, který dobře ilustruje rozdíl mezi klasickou konstrukcí a pevnou jízdni dráhou:



Obrázek 42: Svislý průhyb v klasické konstrukci a pevné jízdni dráze

Prostorové modely jsou tvořeny hmotnou kolejnicí, uzlem upevnění a pražcem. V případě klasické konstrukce jsou vrstvy nacházející se pod pražcem modelovány jako nehmotné, a je tak simulován pojezd vozidla po konstrukci, na které již nedochází k průhybu - sedání způsobené hmotností konstrukce pražcového podloží. V realitě se však dynamická odezva projeví také na části šterku kolem pražce, který se rozvíbruje. Tato kmitající část šterku (resp. hmotnost šterku u které lze předpokládat kmitání) byla připočtena k hmotnosti pražce zadáním přepočtené hodnoty hustoty. V případě modelu pevné jízdni dráhy byla jako hmotná zadávána krom kolejového roštu také betonová deska. Stmelená roznášecí vrstva pod betonovou deskou byla uvažována jako nehmotná.

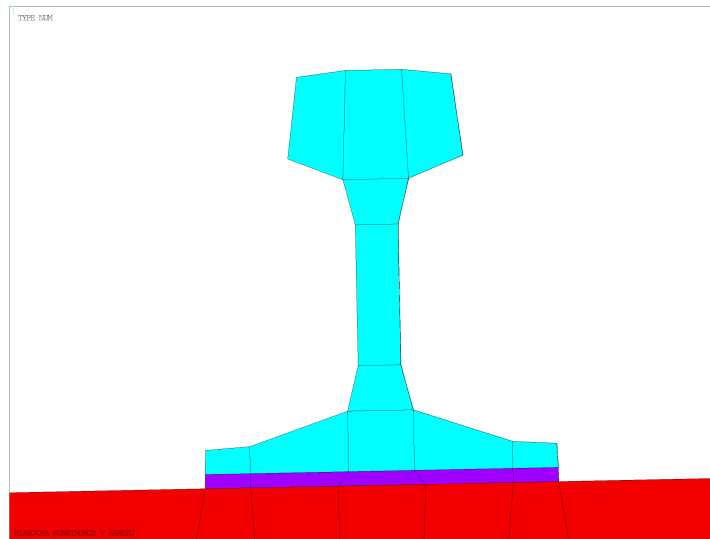
6.1 Výpočtový model klasické konstrukce v zázřezu



Obrázek 43: Schéma modelu klasické konstrukce

6.1.1 Tvorba modelu

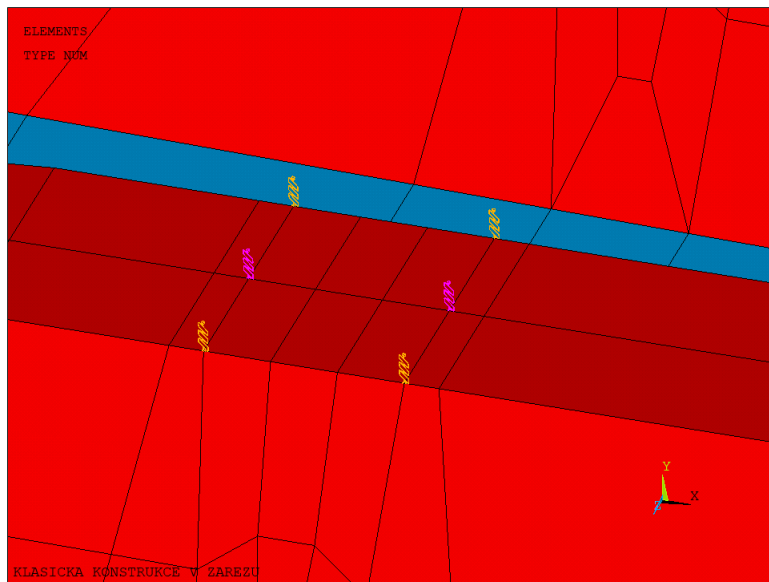
Kolejnice 60 E2 je modelována prvkem SOLID185 s definovanou hustotou, modulem pružnosti a součinitelem příčné kontrakce. Průřez kolejnice je zjednodušen a dělen na 11 prvků. Plocha, moment setrvačnosti a těžiště zjednodušeného průřezu odpovídají reálné kolejnici. V podélném směru je kolejnice dělena po 50 mm. Průřez kolejnice a její dělení je patrné na následujícím obrázku.



Obrázek 44: Profil, dělení a úklon kolejnice

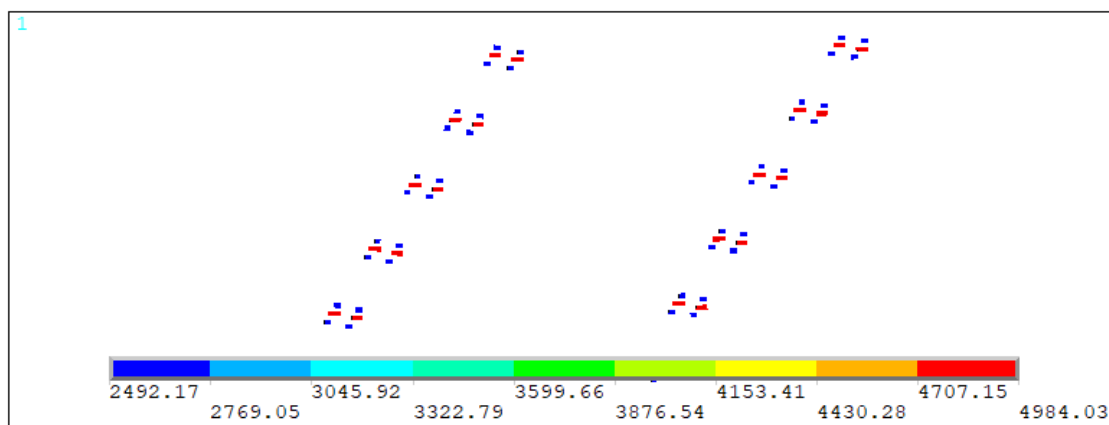
Na pražcích je kolejnice upevněná v úklonu 1:40. Vzhledem k úklonu kolejnice a svisle působícímu zatížení je její korektní poloha zajištěna tzv. coupled nodes, což je dvojice uzlů, kterým je předepsán stejný posun v daném směru. V tomto případě se jedná o posun v příčném směru uzlu na patě kolejnice a na pražci: kolejnice se tak může pohybovat jen kolmo k pražci. Pružná pryžová podložka pod patou kolejnice je modelována prvkem SOLID185 s definovanou hustotou, modulem pružnosti a součinitelem příčné kontrakce. Rozměry podložky jsou 150x150x6 mm.

Svěrky Skl14 jsou modelovány prvkem COMBIN14 s definovanou tuhostí a předpínací silou. Jedna svěrka je modelována třemi prvky COMBIN14, mezi které je tuhost a předpínací síla rozdělena tak, že tuhost a předpínací síla prostřední svěrky tvoří 50 % celkových hodnot, zbylých 50 % se rozdělí napůl mezi krajní svěrky. Umístění svěrek je patrné z obrázku.



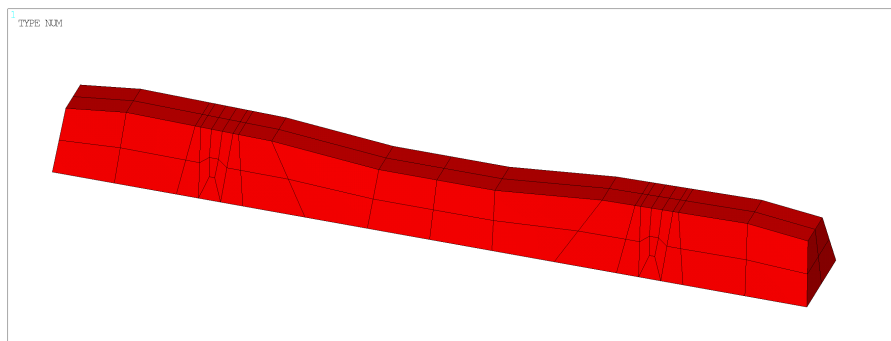
Obrázek 45: Umístění pružin reprezentující svěrky

Poté, co je do svěrek zavedena předpínací síla, stlačí svěrky podložku pod patou kolejnice a dojde k poklesu předpínací síly stejně jako u rovinného modelu. V tomto případě byl úbytek síly 31,63 N, což je asi 0,3 % vzhledem k původní hodnotě 10 kN. Rozdíl se tak dá považovat za zanedbatelný. Hodnoty sil ve svěrkách po stlačení podložky jsou zobrazeny na následujícím grafu.



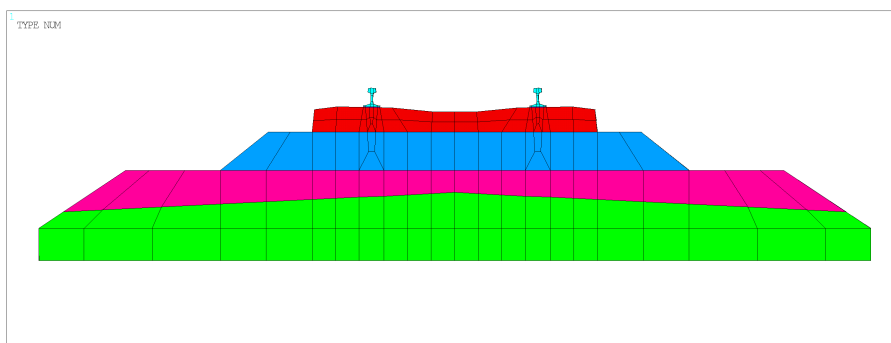
Obrázek 46: Hodnoty předpínací síly ve svěrkách po stlačení podložky

Pražec typu B91S je modelován prvkem SOLID185 s definovanou hustotou, modulem pružnosti a součinitelem příčné kontrakce. Hustota pražce je přepočtena tak, aby zohledňovala jak zjednodušení tvaru pražce, tak i hmotnost části štěrku, u které se během dynamického zatěžování předpokládá kmitání společně s kolejovým roštem. Pražec je ve výpočtovém modelu pevně spojen s štěrkovým ložem, což neodpovídá realitě, kdy je na kontaktu pražce a štěrkového lože tření, jehož velikost závisí na mnoha faktorech – velikosti zrn a jejich pozice určující styčnou plochu mezi pražcem a štěrkovým ložem, velikosti síly působící na pražec od konstrukce i kolové síly apod. Tření by bylo možné v modelu simulovat využitím kontaktního prvku, výpočet by se nicméně stal nelineárním a každý krok, během kterého dochází k výpočtu účinků od kolové síly v dané poloze by navíc zahrnoval několik iterací. To by znamenalo značné zvýšení požadavků na výpočetní techniku a prodloužení již tak značné doby výpočtu.



Obrázek 47: Zjednodušený tvar a dělení pražce

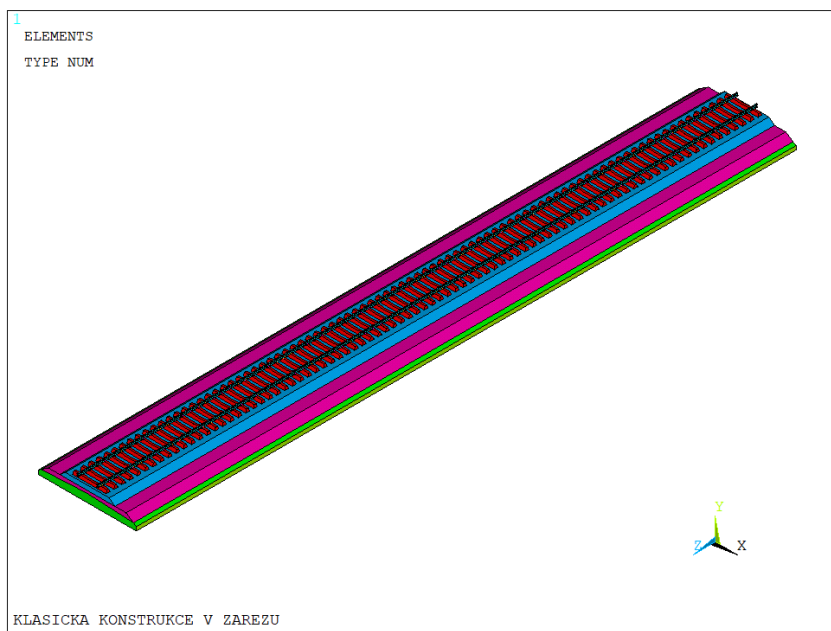
Štěrkové lože je modelováno prvkem SOLID185 s definovaným modulem pružnosti a součinitelem příčné kontrakce, se zanedbatelnou hodnotou hustoty. Daná vrstva se totiž uvažuje nehmotná, aby bylo možné pozorovat čistě účinky pojezdu vozidla na konstrukci, jak již bylo vysvětleno v předchozí části textu. Stejným způsobem je modelována také konstrukční a podkladní vrstva, definované modulem pružnosti a součinitelem příčné kontrakce, se zanedbatelnou hodnotou hustoty.



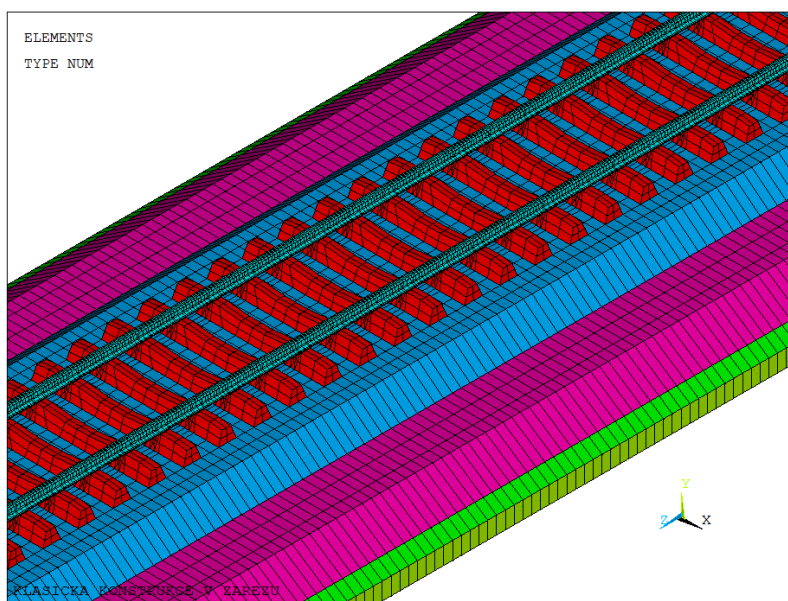
Obrázek 48: Příčný řez modelem klasické konstrukce

Podkladní vrstva je obalena zeminou, která je modelována plošným prvkem SURF154 s definovanou tuhostí. Tato tuhost byla určena iterativně tak, aby svislý posun kolejnice od zatížení nápravou působící silou 225 kN odpovídal hodnotě 1,5 mm.

Celková délka výpočtového modelu klasické konstrukce je 50,4 m, skládá se tak z 84 segmentů s délkou odpovídající dělení právců $u = 600$ mm.



Obrázek 49: Výpočtový model klasické konstrukce



Obrázek 50: Detail výpočtového modelu klasické konstrukce

Okrajové podmínky byly zadány na uzly spodní plochy modelu, kde byl zakázán posun v příčném a podélném směru (ve svislém směru působí tuhost podloží modelovaného prvku SURF154). V uzlech na čelech modelu je zakázán posun v podélném směru.

6.1.2 Vstupní parametry modelu

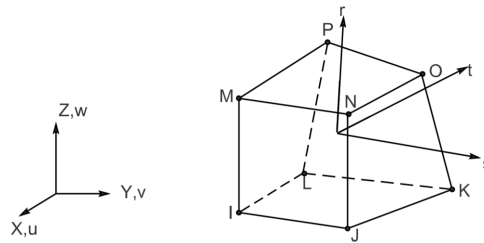
Kolejnice			SOLID185
Profil kolejnice			60 E2
Modul pružnosti	[Pa]		21E9
Součinitel příčné kontrakce	[-]		0,3
Hustota	[kg/m ³]		7850
Podložka pod patu kolejnice			SOLID185
Modul pružnosti - statická odezva	[Pa]		1,38E8
Modul pružnosti - dynamická odezva	[Pa]		4,37E8
Součinitel příčné kontrakce	[-]		0,001
Svěrky - střední			COMBIN14
Tuhost	[N/m]		3,845E5
Předpínací síla	[N]		5E3
Svěrky - krajní			COMBIN14
Tuhost	[N/m]		1,9225E5
Předpínací síla	[N]		2,5E3
Pražec			SOLID185
Modul pružnosti	[Pa]		3,7E10
Součinitel příčné kontrakce	[-]		0,2
Hustota	[kg/m ³]		3353
Kolejové lože			SOLID185
Modul pružnosti	[Pa]		1.5E8
Součinitel příčné kontrakce	[-]		0,25
Konstrukční vrstva			SOLID185
Modul pružnosti	[Pa]		9E7
Součinitel příčné kontrakce	[-]		0,25
Podkladní vrstva			SOLID185
Modul pružnosti	[Pa]		6E7
Součinitel příčné kontrakce	[-]		0,35
Podloží a okolní zemina			SOLID185
Tuhost	[Pa]		1E7

6.2 Popis použitých konečných prvků

Při tvorbě prostorových modelů byly použity prvky SOLID185, COMBIN14 a SURF154. Prvek COMBIN14 byl popsán již v seznamu prvků použitých v rovinném modelu, následující text se tak soustředí na popis zbývajících prvků.

6.2.1 SOLID185

Prvek SOLID185 se používá k modelování trojrozměrných těles. Prvek je definován osmi uzly se třemi stupni volnosti, a to posuny ve směru x , y a z . Zadávány jsou uvedené materiálové charakteristiky. Prvek je vhodný jak na lineární, tak na nelineární analýzu.



Obrázek 51: SOLID185 [4]

Uzly: I, J, K, L, M, N, O, P

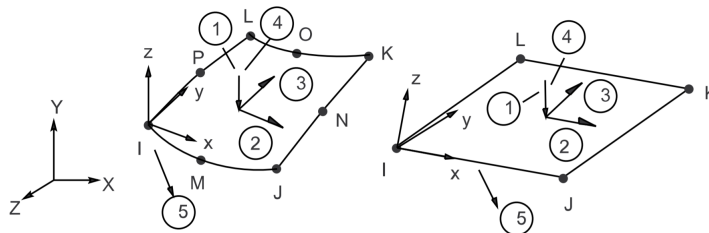
Stupně volnosti: UX, UY, UZ

Materiálové charakteristiky: EX, EY, EZ, PRXY, PRYZ, PRXZ (nebo NUXY, NUYZ, NUXZ), GXY, GYZ, GXZ, ALPX, ALPY, ALPZ (nebo CTEX, CTEY, CTEZ nebo THSX, THSY, THSZ), DENS, ALPD, BETD

Povrchové zatížení: spojitě na plochy 1-6

6.2.2 SURF154

Plošný prvek SURF154 je vhodný pro aplikaci povrchového zatížení. Prvek je definován čtyřmi nebo osmi uzly se třemi stupni volnosti, a to posuny ve směru x , y a z . Zadávány jsou uvedené parametry.



Obrázek 52: SURF154 [4]

Uzly: I, J, K, L

Stupně volnosti: UX, UY, UZ

Vlastnosti prvku: EFS, SURT, ADMSUA, TKI, TKJ, TKK, TKL

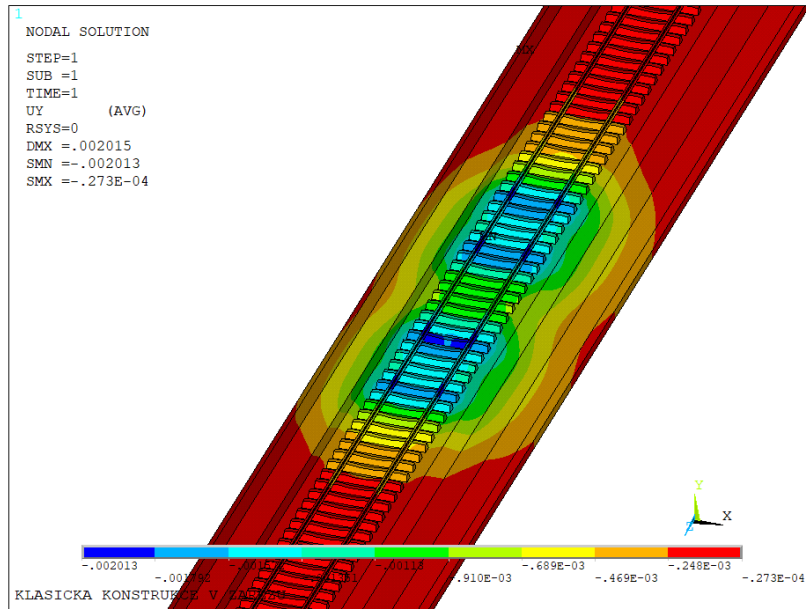
Materiálové charakteristiky: DENS, VISC, ALPD, BETD

Povrchové zatížení: spojitě zatížení na plochy 1-5

6.3 Statická odezva konstrukce

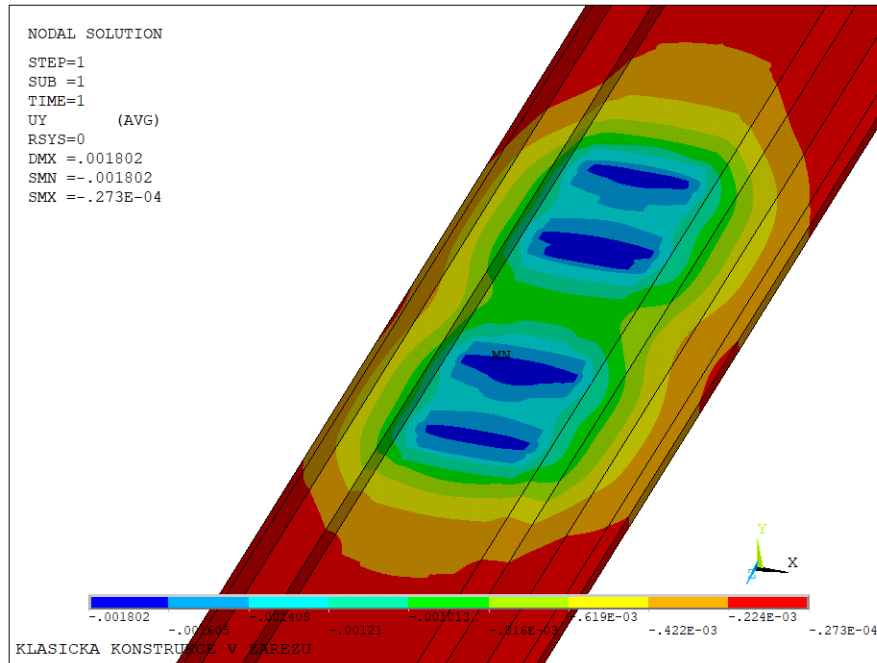
Při výpočtu statické odezvy byl model zatížen svislými silami reprezentujícími stojící vozidlo o hmotnosti 90 t. Hodnota uvažované kolové síly je 112,5 kN, rozdělená na dvě síly působící v uzlech na hlavě kolejnice. Rozvor náprav je 3,2 m a vzdálenost otočných čepů náprav je 8,3 m. Při výpočtu statické odezvy je uvažována statická hodnota modulu pružnosti pryžové podložky pod patou kolejnice.

Byla vypočtena pole posunutí, napětí a přetvoření. Z rozsáhlého výsledkového souboru jsou následně zobrazeny zvolené veličiny.

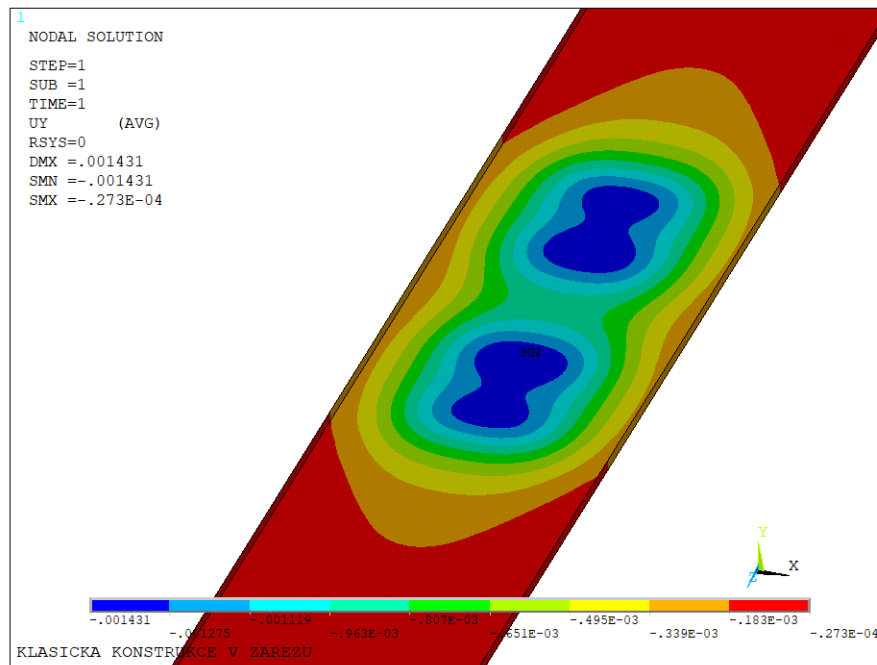


Obrázek 53: Pole posunutí u_y klasické konstrukce při zatížení vozidlem

Hodnota svislých posunů se snižuje s hloubkou konstrukce. Zatímco maximální svislý posun kolejnice je asi 2 mm, ve štěrkovém loži je to 1,8 mm a na konstrukční vrstvě (hloubka 0,35 m od vrchní hrany štěrkového lože) je to 1,7 mm. Svislý posun podloží (hl. 1,2 m) je asi 1,4 mm. Odezva staticky zatíženého modelu je tak v souladu s teorií popsanou v sekci 6. *Prostorové výpočtové modely*, kdy v klasické konstrukci přejímá většinu svislé pružnosti štěrkové lože a železniční spodek.

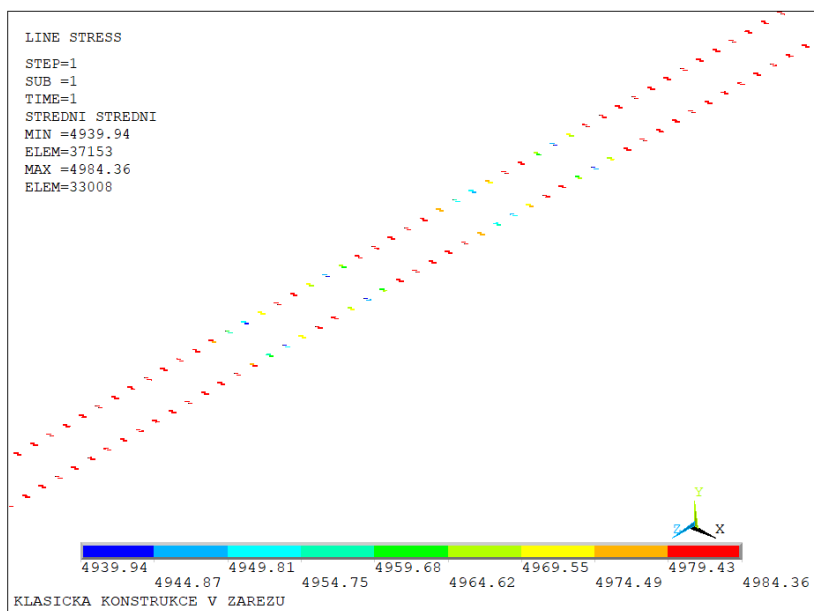


Obrázek 54: Pole posunutí u_y šterkového lože

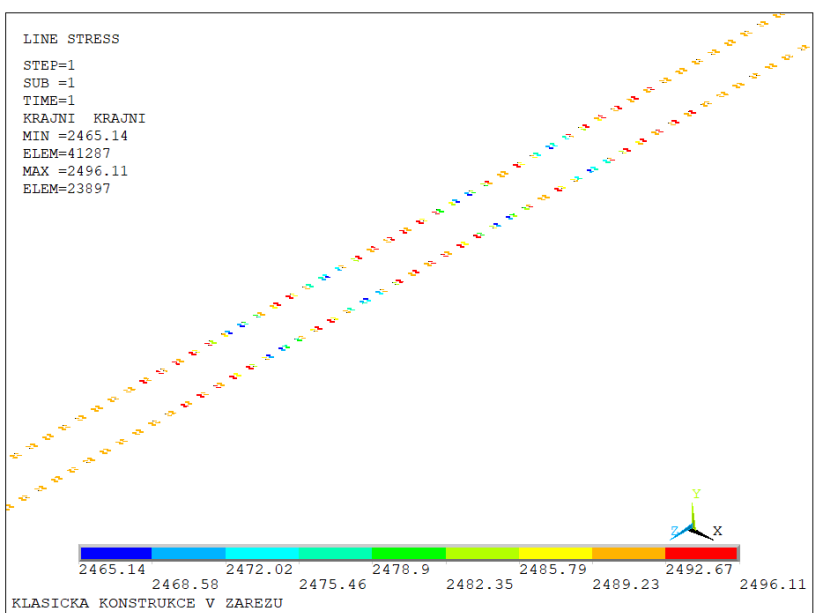


Obrázek 55: Pole posunutí u_y podloží

Při statickém zatížení konstrukce a následnému stlačení pryžových podložek působením kolových sil dojde k dalšímu úbytku předpínací síly ve svěrkách. V případě klasické konstrukce byla hodnota předpínací síly rozdělena mezi tři pružiny COMBIN14, jak již bylo popsáno předchozím textu. Předpínací síla ve střední pružině klesne o 65 N, z hodnoty 4984 N na hodnotu 4919 N po zatížení vozidlem. V případě krajních pružin dojde k poklesu o 27 N, z 2492 N na 2465 N. Hodnoty předpínacích sil v pružinách reprezentující svěrku jsou vykreslené na následujících obrázcích.



Obrázek 56: Předpínací síla ve střední pružině svěrky

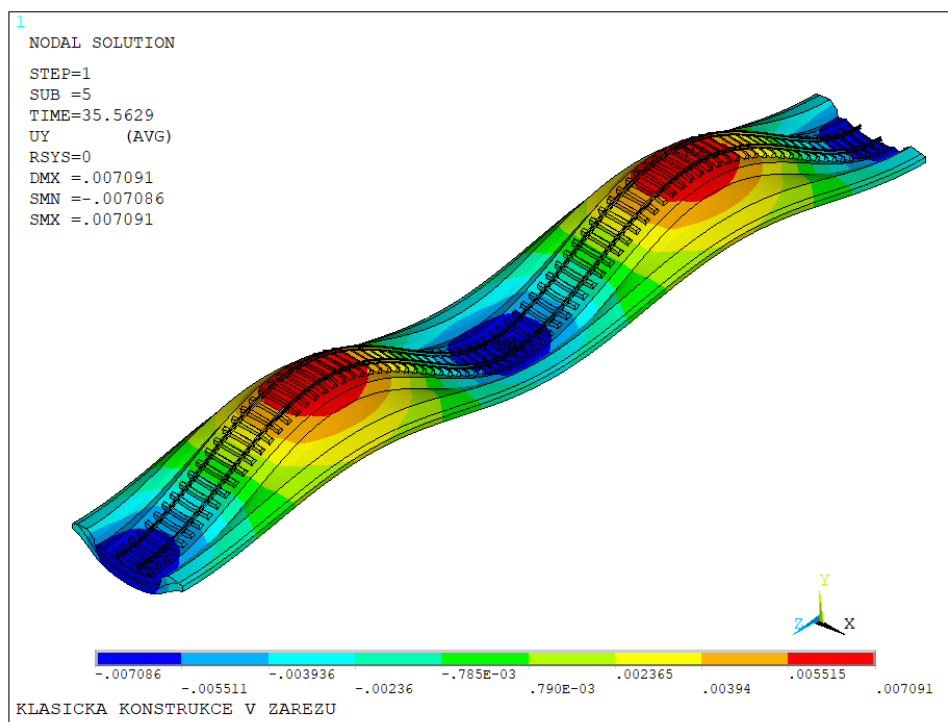


Obrázek 57: Předpínací síla v krajních pružinách svěrky

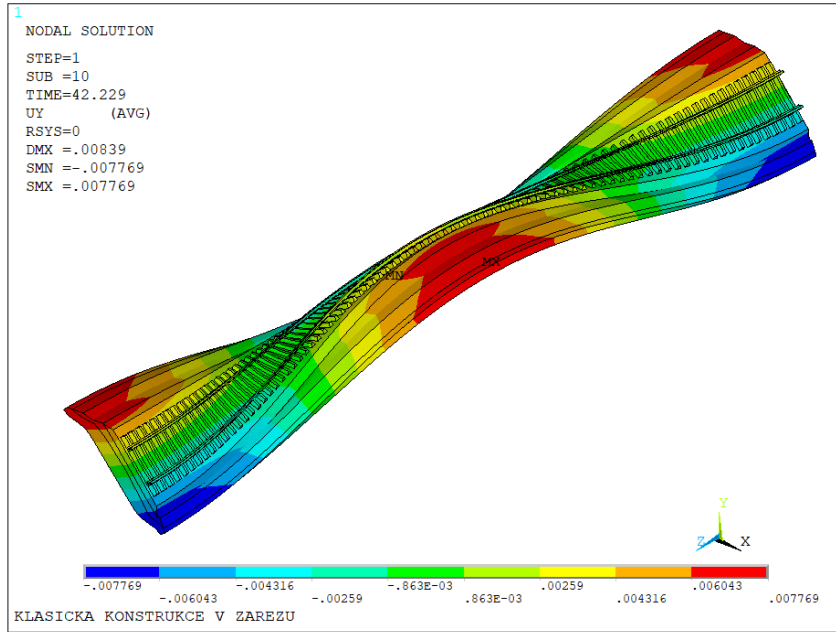
6.4 Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu

Lanczosovou metodou bylo vypočteno 30 vlastních tvarů kmitu a příslušných frekvencí. Vzhledem k tomu, že cílem modální analýzy je také získání hodnot významných frekvencí pro výpočet tlumících koeficientů α a β , je během výpočtu zadána dynamická hodnota modulu pružnosti pryžových podložek.

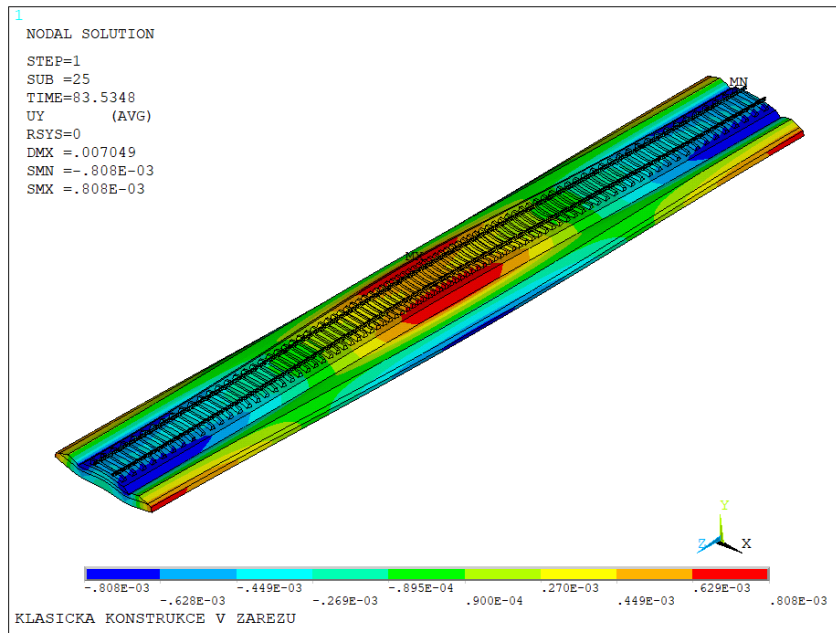
Vlastní frekvence			
Číslo vlastního tvaru	Vlastní frekvence [Hz]	Číslo vlastního tvaru	Vlastní frekvence [Hz]
1	32,215	16	56,540
2	32,216	17	59,968
3	32,669	18	64,047
4	33,781	19	64,455
5	35,563	20	65,846
6	38,034	21	72,067
7	40,043	22	72,167
8	40,554	23	78,576
9	41,201	24	80,449
10	42,229	25	83,535
11	45,038	26	85,330
12	45,374	27	88,557
13	49,492	28	92,294
14	50,183	29	94,487
15	54,493	30	94,494



Obrázek 58: Vlastní tvar kmitu klasické konstrukce při frekvenci $f_5=35,563$ Hz



Obrázek 59: Vlastní tvar kmitu klasické konstrukce při frekvenci $f_{10}=42,229$ Hz

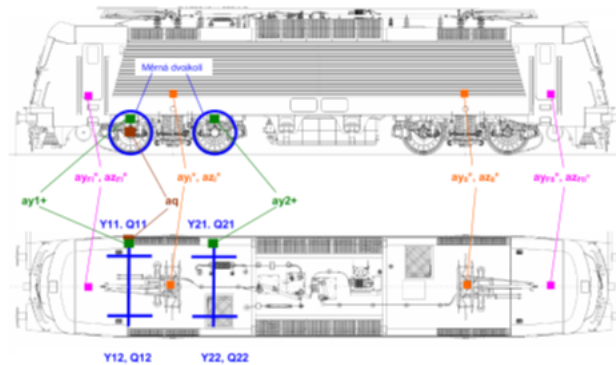


Obrázek 60: Vlastní tvar kmitu klasické konstrukce při frekvenci $f_{25}=83,535$ Hz

6.5 Dynamická odezva konstrukce na pojezd vozidla

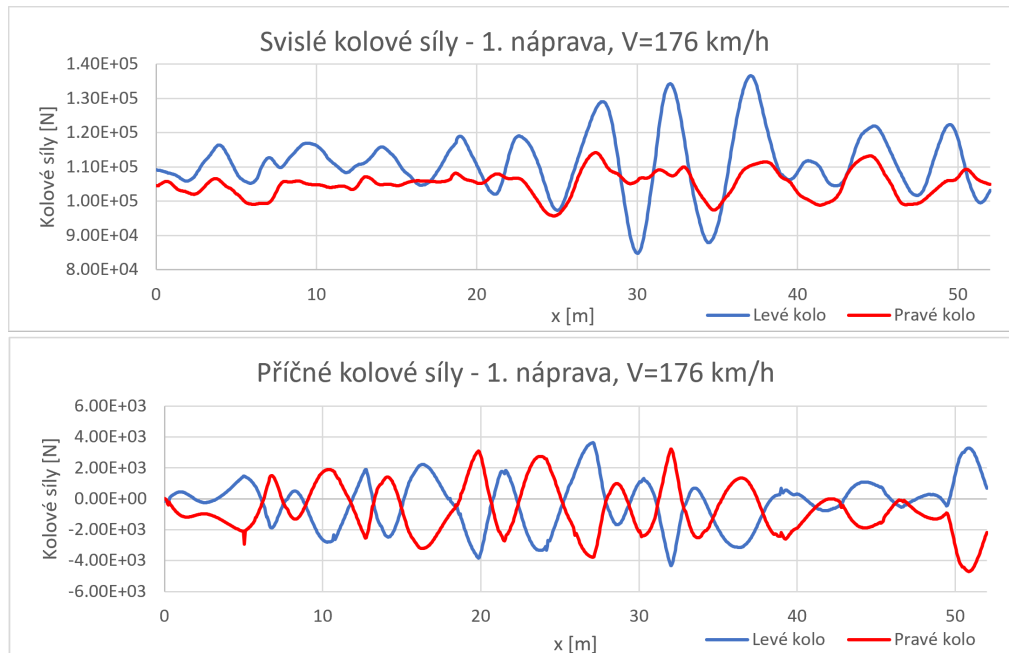
6.5.1 Model zatížení

Pohyb vozidla je stejně jako v případě rovinného modelu nahrazen soustavou sil postupně měnící svou polohu v závislosti na jízdě vozidla. V případě prostorového modelu se jedná jak o svislé kolové síly, tak i příčné vodící síly. Jedno kolo je tak reprezentováno dvěma svislými silami působícími ve dvou uzlech na hlavně kolejnice (hodnota jedné síly je polovina svislé kolové síly) a jednou příčnou vodící silou.

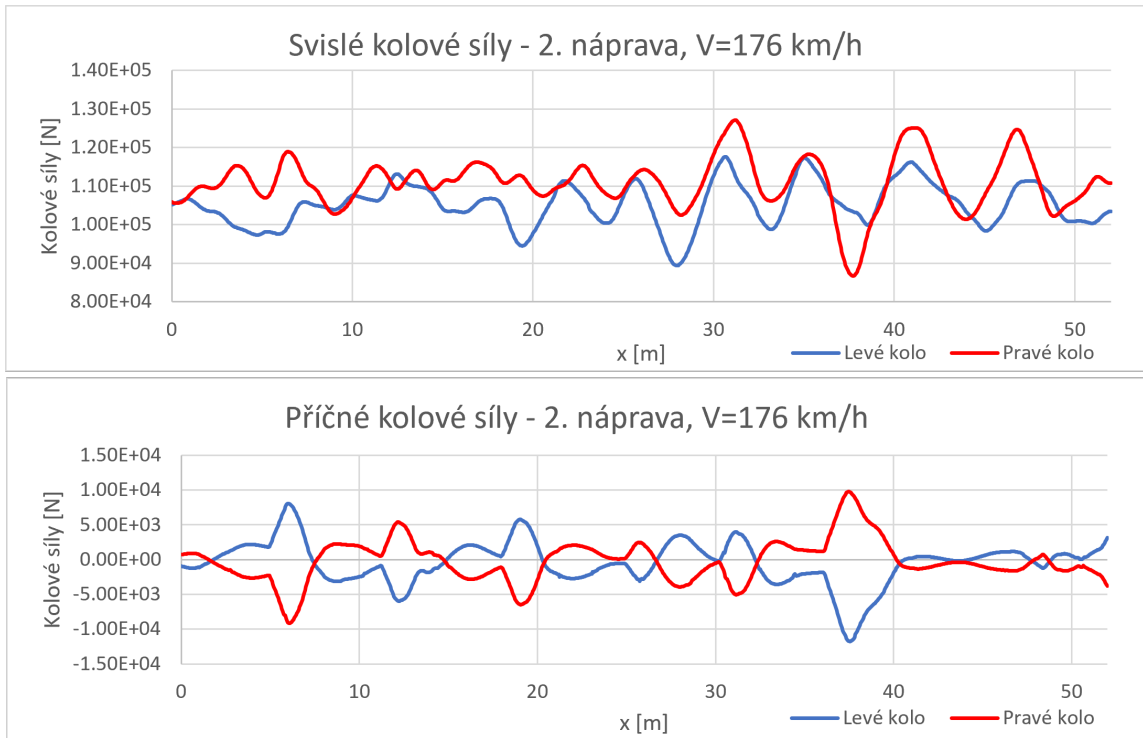


Obrázek 61: Kolové síly Q a vodící síly Y

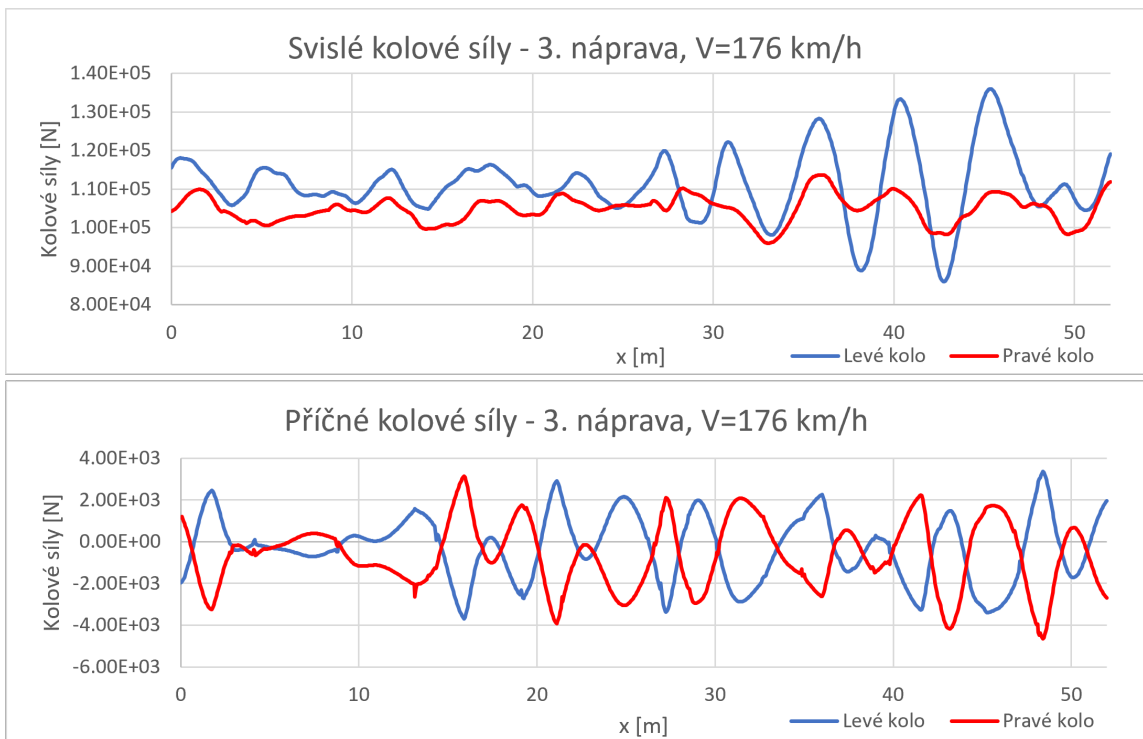
Pro prostorové modely v této diplomové práci byly použity hodnoty sil zjištěné simulací pojezdu vozidla rychlostí 176, 230 a 253 km/h. Průběh svislých a příčných sil od jednotlivých náprav je vykreslen na následujících grafech.



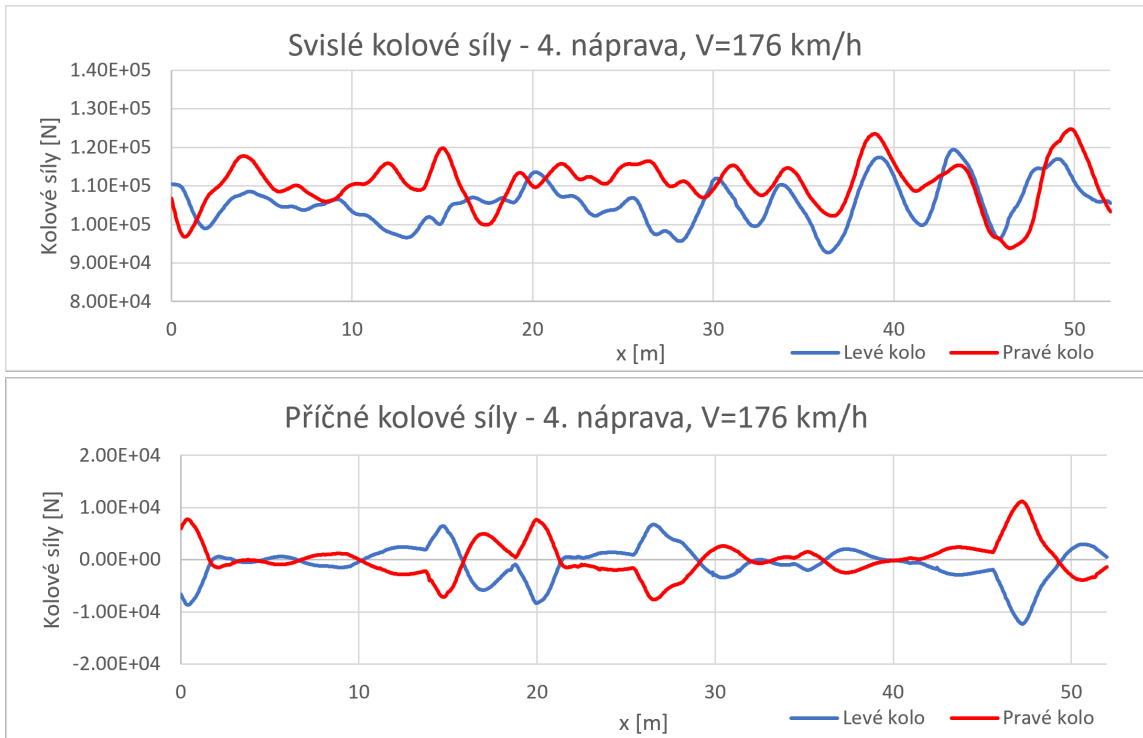
Obrázek 62: Průběh kolových sil od 1. nápravy, $v = 176$ km/h



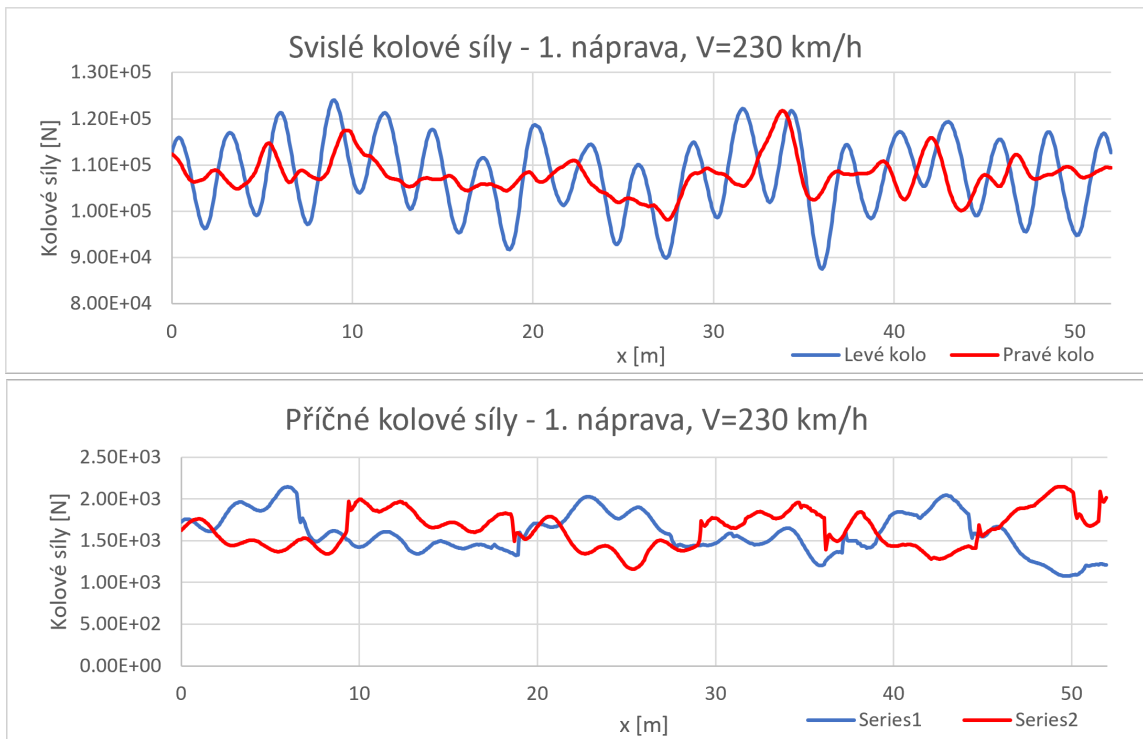
Obrázek 63: Průběh kolových sil od 2. nápravy, $v = 176$ km/h



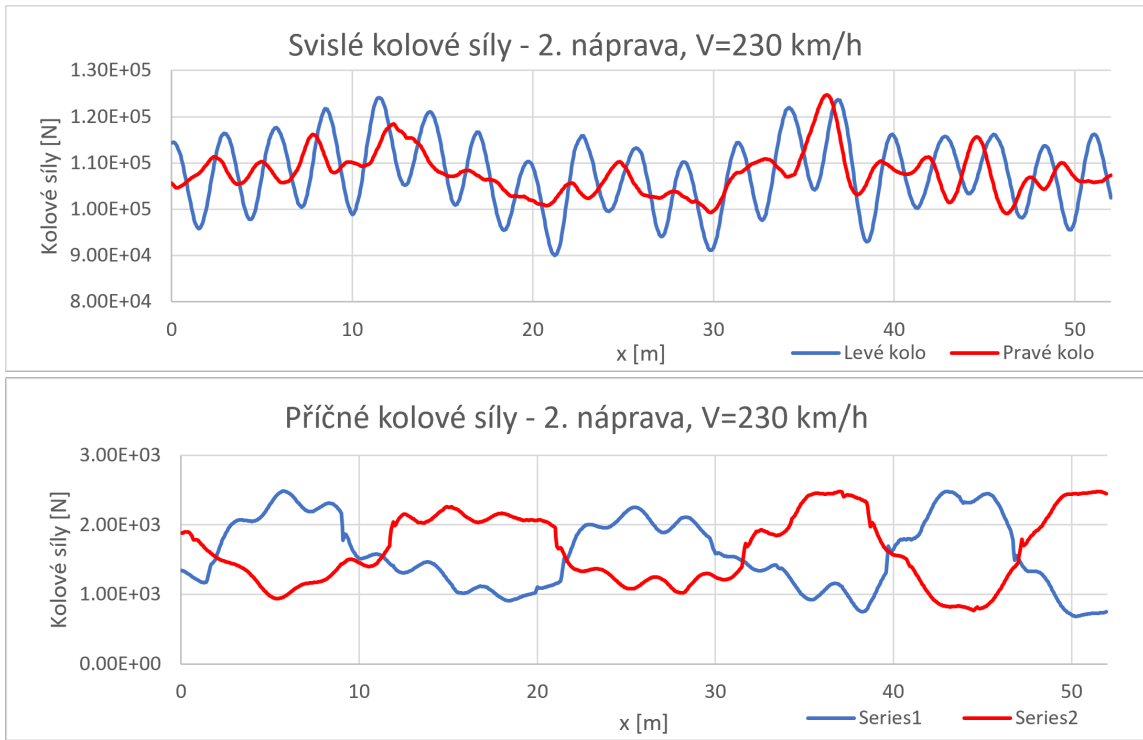
Obrázek 64: Průběh kolových sil od 3. nápravy, $v = 176$ km/h



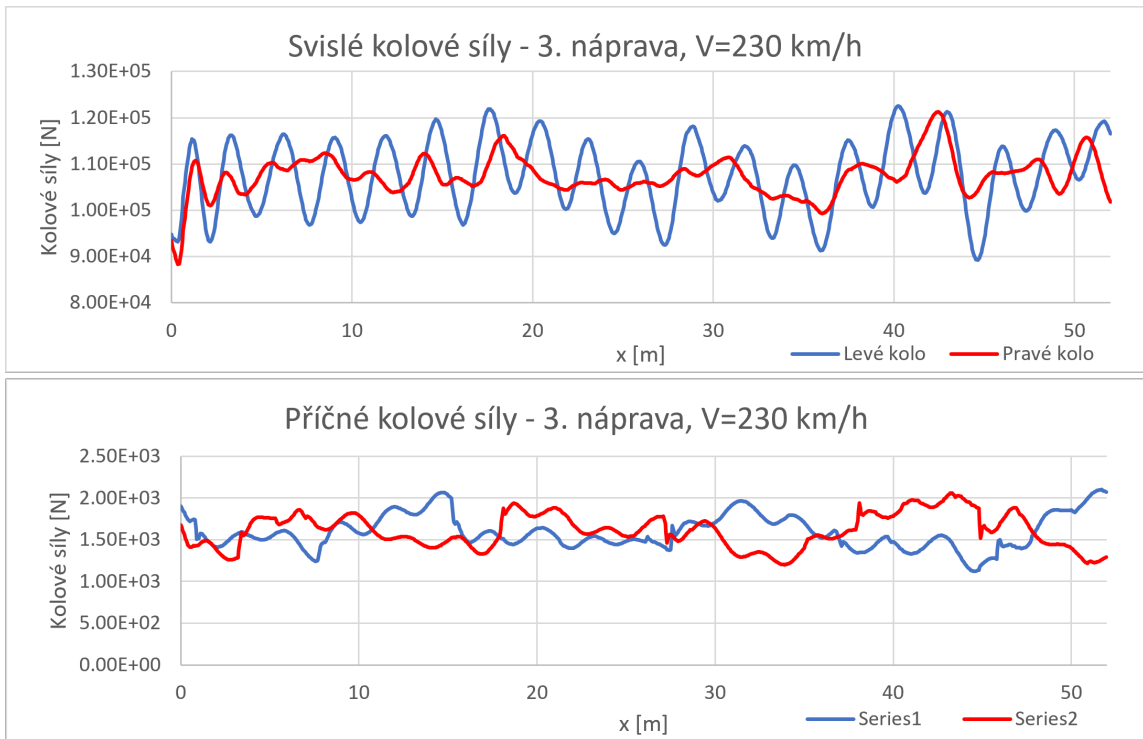
Obrázek 65: Průběh kolových sil od 4. nápravy, $v = 176$ km/h



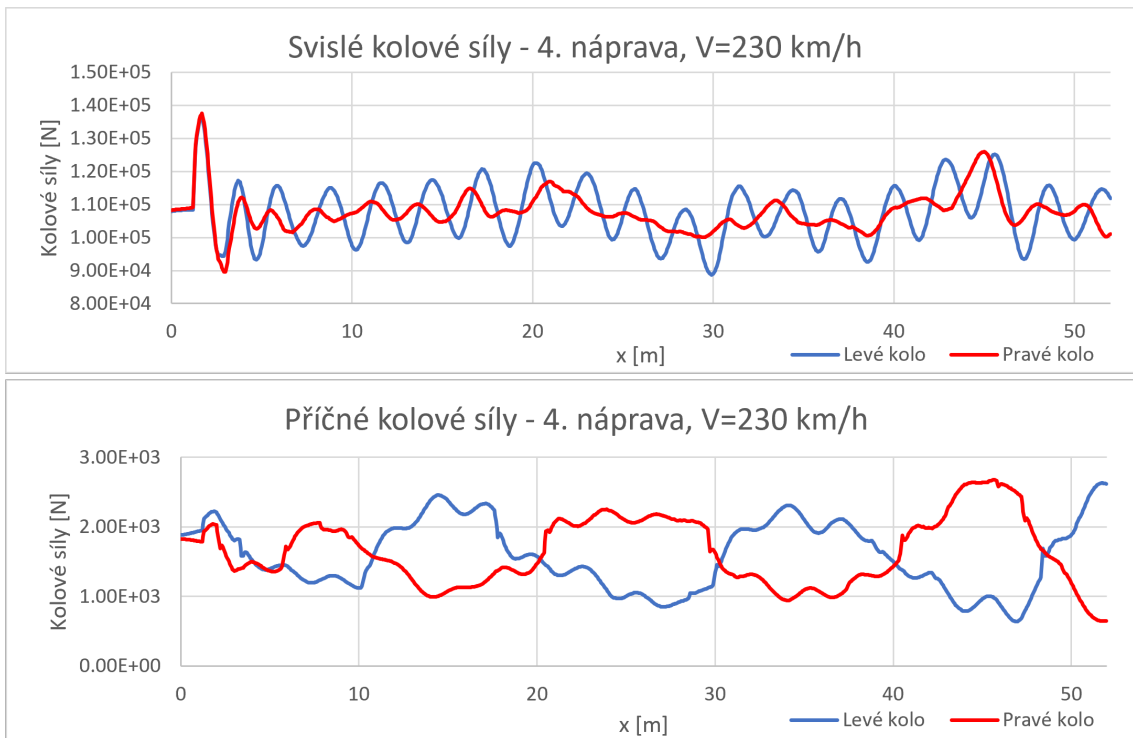
Obrázek 66: Průběh kolových sil od 1. nápravy, $v = 230$ km/h



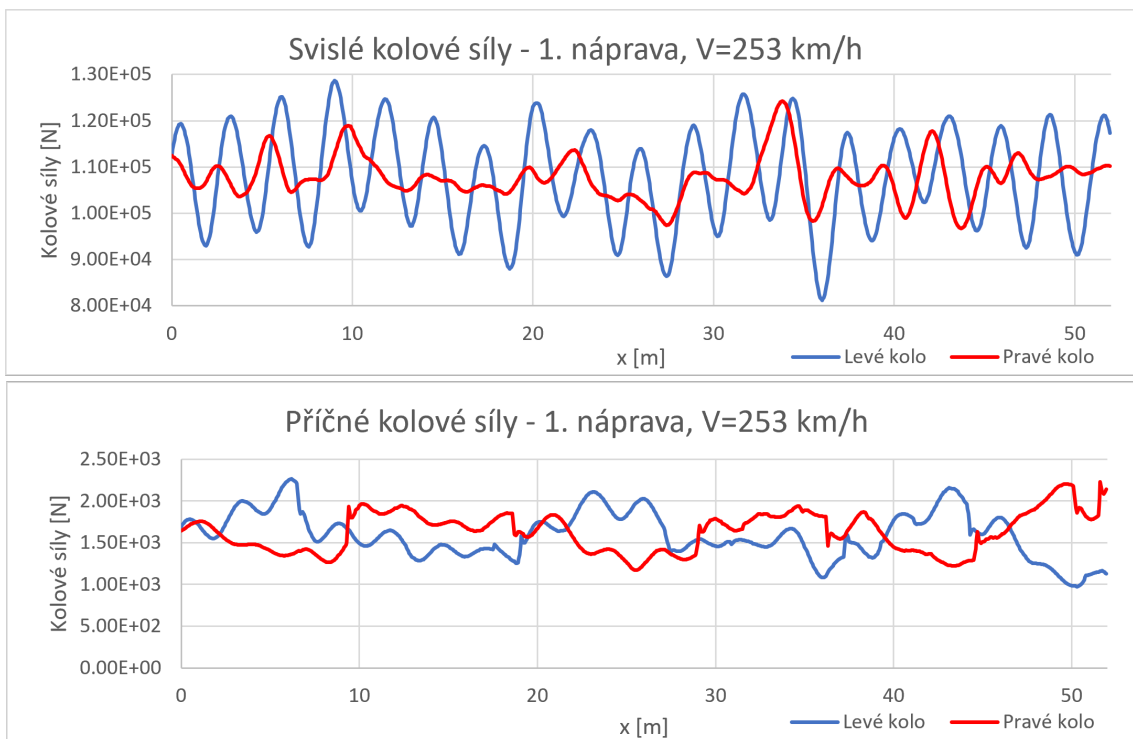
Obrázek 67: Průběh kolových sil od 2. nápravy, $v = 230$ km/h



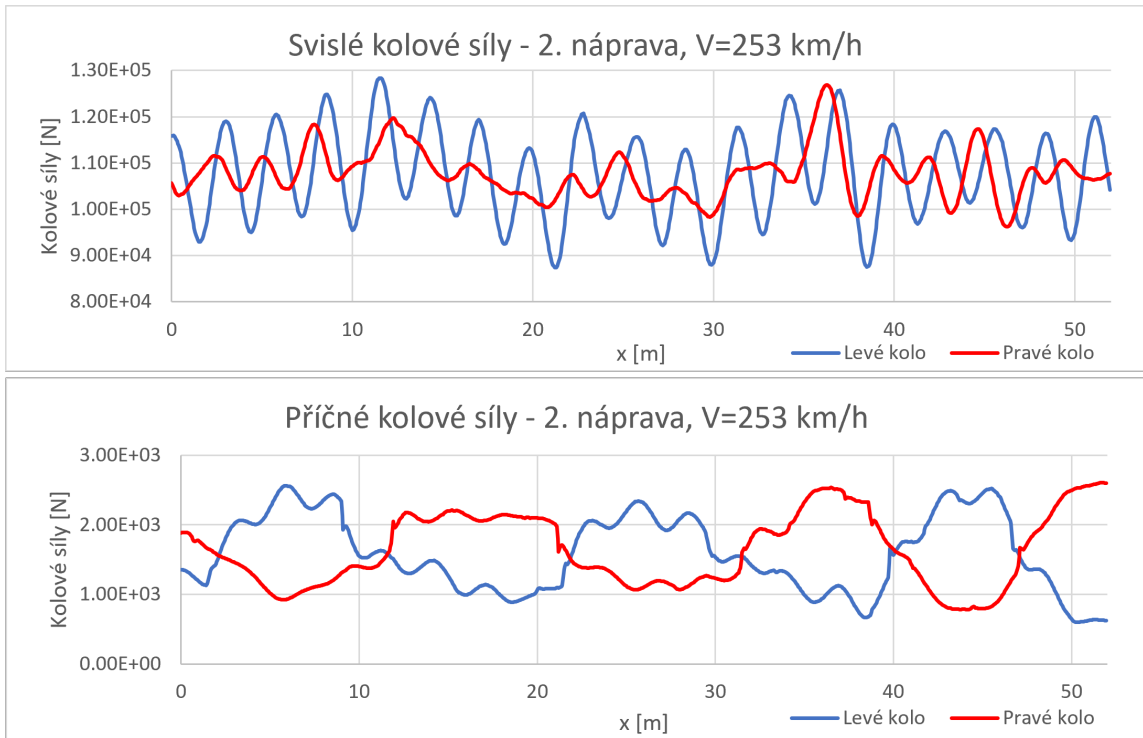
Obrázek 68: Průběh kolových sil od 3. nápravy, $v = 230$ km/h



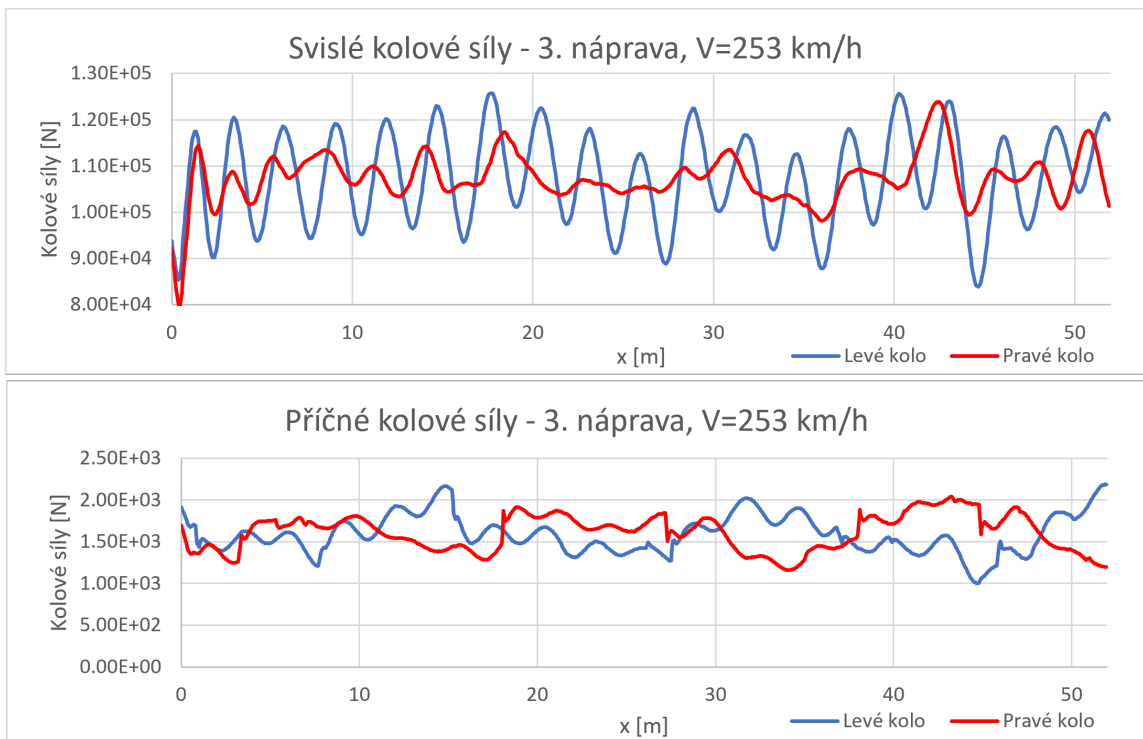
Obrázek 69: Průběh kolových sil od 4. nápravy, $v = 230$ km/h



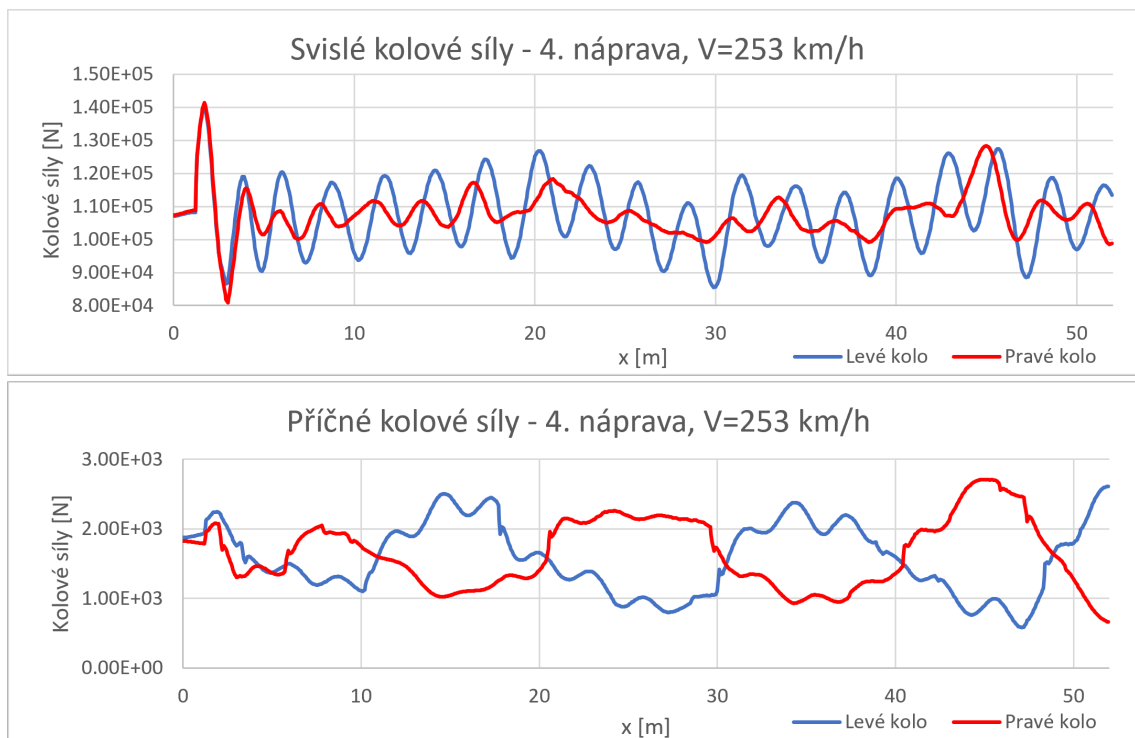
Obrázek 70: Průběh kolových sil od 1. nápravy, $v = 253$ km/h



Obrázek 71: Průběh kolových sil od 2. nápravy, $v = 253$ km/h



Obrázek 72: Průběh kolových sil od 3. nápravy, $v = 253$ km/h



Obrázek 73: Průběh kolových sil od 4. nápravy, $v = 253$ km/h

6.5.2 Model útlumu konstrukce

V klasické konstrukci železniční tratě se na tlumení podílí především šterkové lože a železniční spodek, kde vznikají tlumící síly kladoucí odpor kmitání tratě. Jedná se zejména o vnitřní a strukturální tření vrstev pražcového podloží. Dále jsou to tlumící síly mezi pražci a kolejovým ložem a také tlumení v systému upevnění, které má ovšem v klasické konstrukci spíše zanedbatelný vliv. Údávaná hodnota η poměrného útlumu pro kolejový rošt ve šterkovém loži se pohybuje v intervalu 1,6-15,7 %. Hodnoty poměrného útlumu však mohou být pro dané konstrukční části značně proměnné a závislé na mnoha faktorech. V této diplomové práci je uvažována hodnota poměrného útlumu 10 %. Po výpočtu vlastních frekvencí a tvarů kmitu byly určeny dvě významné frekvence $f_i = 32,669$ Hz a $f_j = 35,563$ Hz a následně spočítány koeficienty tlumení

$$\alpha \doteq 21,397,$$

$$\beta \doteq 4,665E - 4.$$

6.5.3 Výpočet odezvy

Dynamické zatížení simulující zatížení lokomotivou při pojezdu koleje je načteno do ANSYSU jako vektory obsahující hodnoty sil. Jedná se o tři vektory pro každé kolo lokomotivy: dva vektory se stejnými hodnotami svislých sil (svislá kolová síla je rozdělena na dvě síly působící ve dvou uzlech na hlavě kolejnice) a jeden vektor s příčnými silami. Následně je spuštěno makro v jazyce APDL (ANSYS Parametric Design Language), které obsahuje nastavení řešiče a cykly zajišťující korektní přiřkládání jednotlivých sil v okamžik odpovídající působení kolové síly vlaku jedoucího danou rychlostí. Během dynamické analýzy je zadána hodnota dynamického modulu pružnosti pro pryžové podložky pod patou kolejnice.

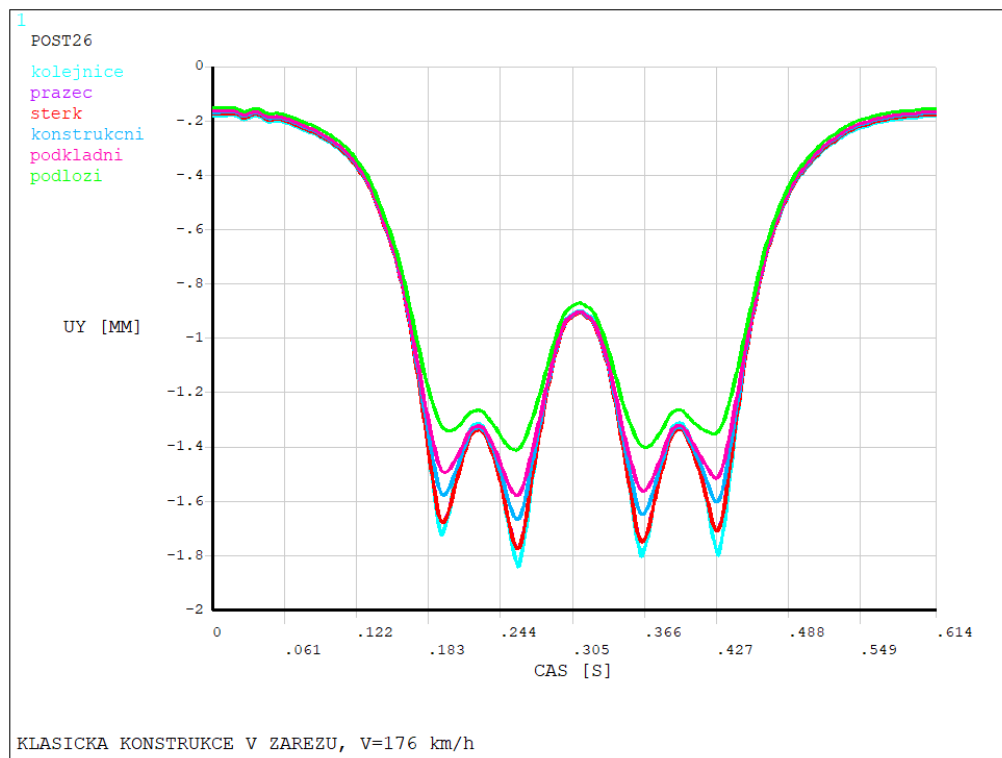
Zadané parametry pro časovou integraci jsou rychlost, celkový čas, časový krok a počet kroků. Časový krok vychází z podélného dělení kolejnice po 50 mm a rychlosti pojezdu vozidla. Kolové síly jsou rozmístěny tak, aby odpovídali vzdálenosti mezi podvozky a nápravami. V prvním kroku výpočtu jsou síly přiloženy do výchozí polohy a model je staticky zatížen. Následně je zapnuta časová integrace a síly jsou postupně přikládány na uzly odpovídající rychlostí. Výpočet tak neuvazuje rozjždění/brždění vozidla.

Parametry časové integrace			
Rychlost	Délka pojezdu [m]	Doba pojezdu [s]	Časový krok [s]
176	30	0,6136	1,0227E-3
230	30	0,4696	0,7826E-3
253	30	0,4269	0,7115E-3

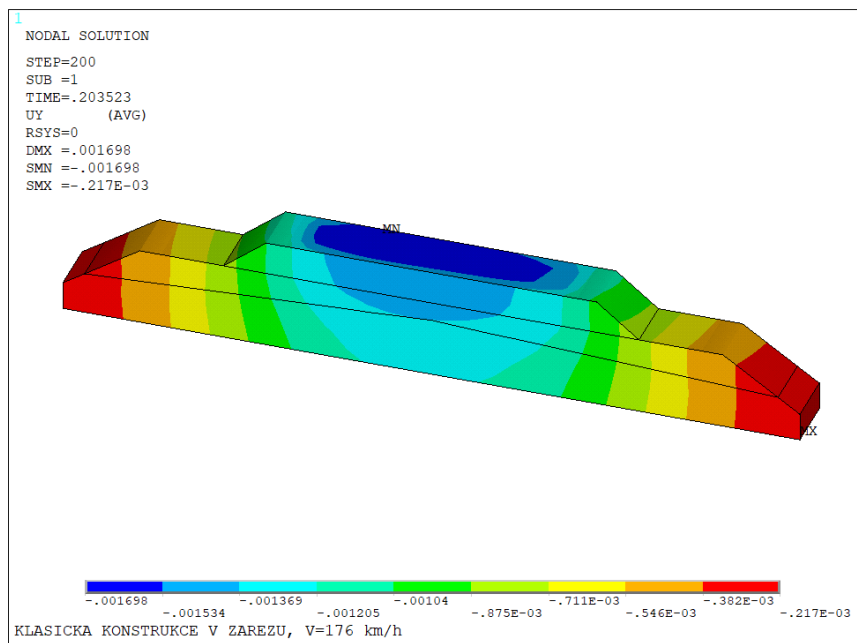
6.5.4 Výsledky

Byla vypočtena pole posunutí, napětí a přetvoření. Z rozsáhlého výsledkového souboru jsou zobrazeny vybrané veličiny.

Prostorový výpočtový model umožňuje podrobně sledovat odezvu jednotlivých konstrukčních částí. V postprocesoru POST26 lze následně vykreslit průběh veličin sledovaného uzlu v čase. Maximální svislý posun kolejnice se příliš neliší od svislého posunu pražce a šterkového lože (průhybové křivky pražce a šterkového lože mají velmi podobné hodnoty a v grafu se tak překrývají), jelikož pryžová podložka se zadaným dynamickým modulem pružnosti se při zatížení zmáčkne jen minimálně - z grafu je zřejmé, že se jedná o hodnoty v řádu desetin milimetrů. Většina zatížení se tak přenáší do dalších vrstev konstrukce.

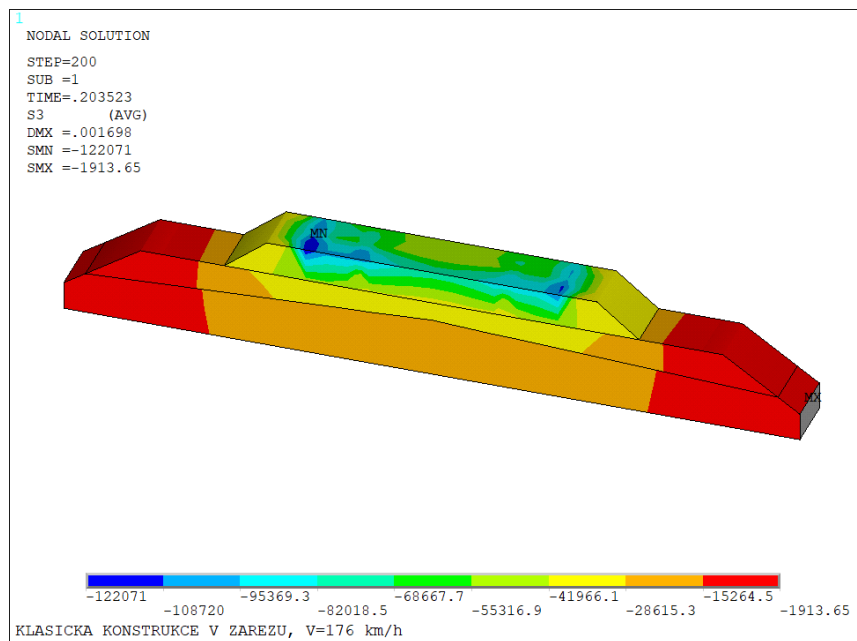


Obrázek 74: Posun u_y jednotlivých konstrukčních částí v čase $t = 0,2035$ s

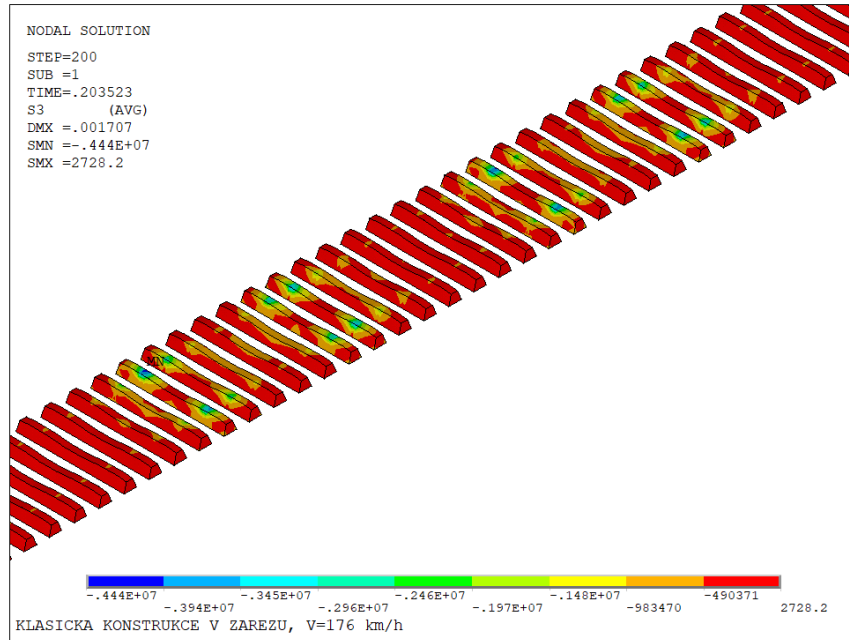


Obrázek 75: Pole posunutí u_y v prážcovém podloží pod nápravou v čase $t = 0,2035$ s

Hodnoty napětí pod nápravou odpovídají řádově předpokládaným hodnotám popsaným v části textu zabývající se interakcí mezi vozidlem a kolejí. Na vrchní ploše šterkového lože dosahuje napětí pod koly hodnot kolem 0,1 MPa. Do konstrukčních vrstev se přenáší napětí v řádu desítek kPa. Na následujícím obrázku je vykresleno pole hlavního napětí σ_3 v prážcovém podloží.

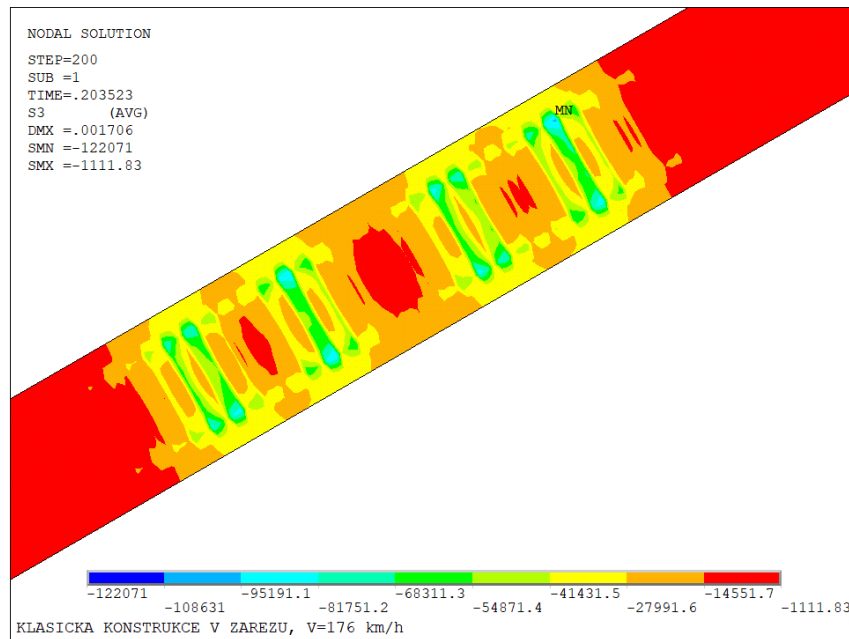


Obrázek 76: Pole napětí σ_3 v prážcovém podloží pod nápravou v čase $t = 0,2035$ s



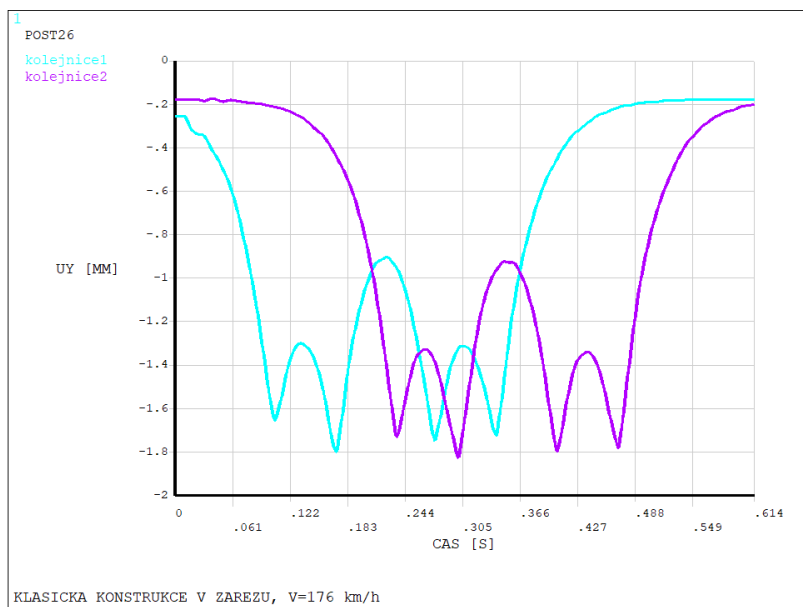
Obrázek 77: Pole napětí σ_3 na pražcích v čase $t = 0,2035$ s

Napětí z kolejnic se přes jednotlivé pražce přenáší do šterkového lože. I na spodní straně šterkového lože lze poté ještě pozorovat oblasti značné koncentrace napětí. Vzhledem k materiálu nedochází k roznosu účinků na větší plochu, jako to lze očekávat u nahrazení šterkového lože betonovou deskou v pevné jízdni dráze.

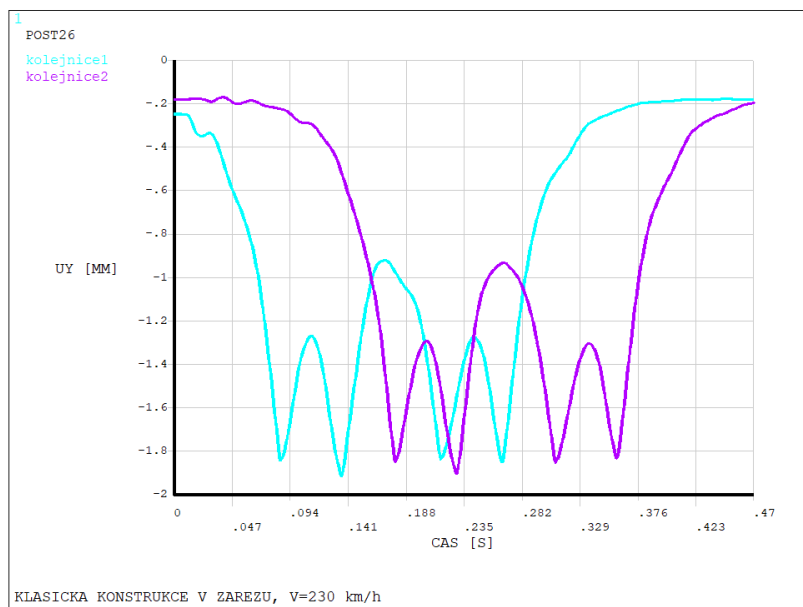


Obrázek 78: Pole napětí σ_3 na spodní ploše šterkového lože v čase $t = 0,2035$ s

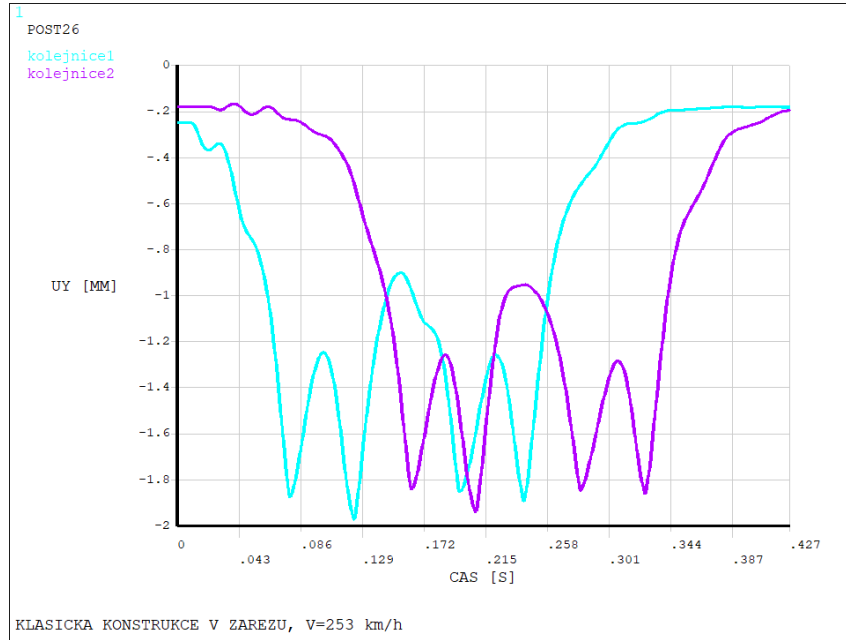
Svislý posun v čase byl vykreslen ve dvou uzlech pro všechny rychlosti, což umožňuje sledovat účinky dynamického zatížení, které se mění v průběhu pojezdu vozidla danou rychlostí. Pokud navíc porovnáme tyto svislé posuny ve stejných uzlech pro všechny tři rychlosti, je zřejmý značný nárůst dynamických účinků se zvyšující se rychlostí. Zatímco při pojezdu rychlostí 176 km/h byl maximální svislý posun asi 1,8 mm, při rychlosti 253 km/h to bylo téměř 2 mm, což znamená zvýšení o více než 11 %.



Obrázek 79: Svislý posun u_y vybraných uzlů na hlavní kolejnici v čase, $v = 176$ km/h

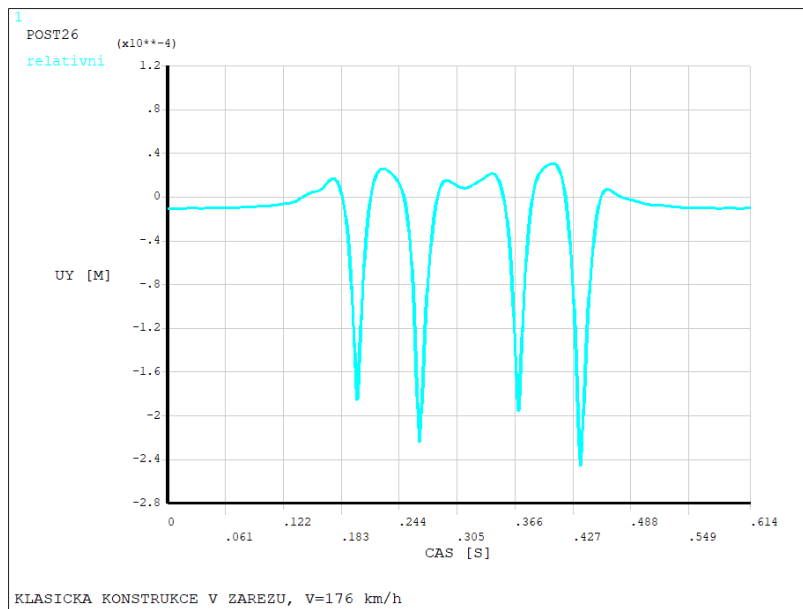


Obrázek 80: Svislý posun u_y vybraných uzlů na hlavní kolejnici v čase, $v = 230$ km/h



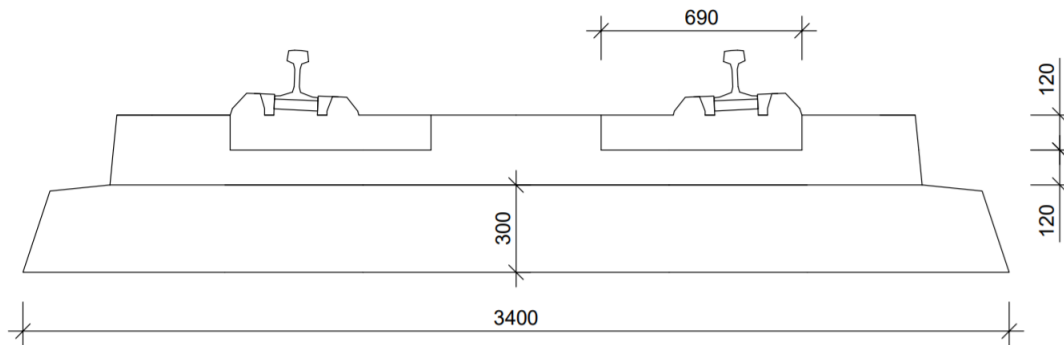
Obrázek 81: Svislý posun u_y vybraných uzlů na hlavní kolejnice v čase, $v = 253$ km/h

V této práci jsou zobrazovány absolutní hodnoty posunů u_y konstrukčních částí. V některých případech je ovšem preferováno zobrazení relativního posunutí u_y kolejnice vůči středu šterkového lože, jak je tomu na následujícím obrázku. Tyto hodnoty se poté dají lépe srovnat s případným měřením v terénu, kdy se svislý posun kolejnice měří zpravidla právě vůči šterkovému loži.



Obrázek 82: Relativní posunutí u_y kolejnice, $v = 176$ km/h

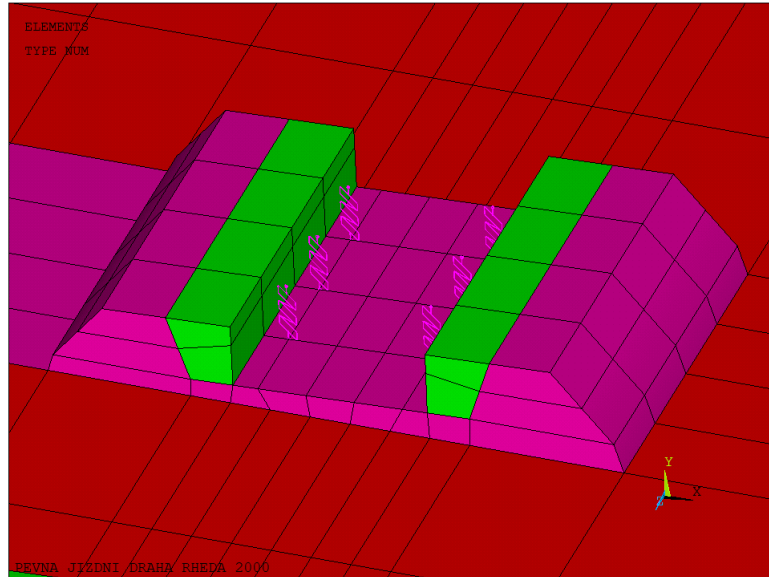
6.6 Výpočtový model pevné jízdní dráhy RHEDA 2000



Obrázek 83: Schéma modelu pevné jízdní dráhy RHEDA 2000

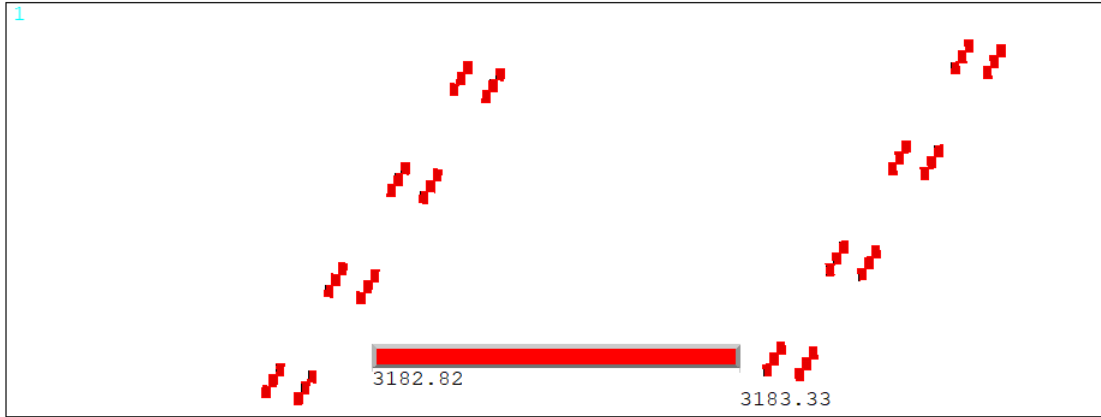
6.6.1 Tvorba modelu

Kolejnice je modelována stejně jako v modelu klasické konstrukce, včetně prvku SOLID185 a zadaných parametrů. Svěrky byly modelovány prvkem COMBIN14 s definovanou tuhostí a předpínací silou. Stejně jako v klasické konstrukci byla jedna svěrka modelována třemi prvky COMBIN14. V tomto modelu ovšem prvky nejsou umístěny přímo na okrajích pražce (u toho byly v případě pevné jízdní dráhy uvažovány širší styčné plochy, než u pražce B91S), proto je tuhost i předpínací síla rozdělena rovnoměrně na třetiny.



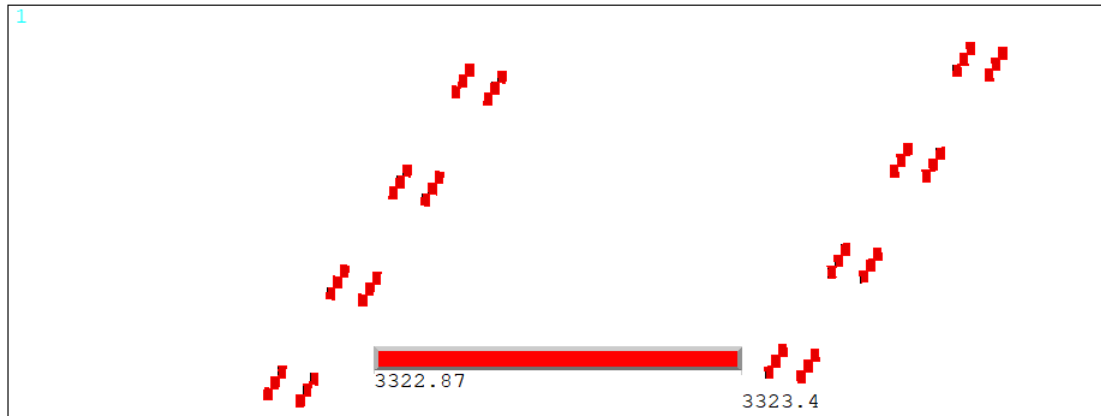
Obrázek 84: Umístění pružin reprezentující svěrky

Po zavedení předpínací síly dojde ke stlačení podložky a úbytku síly asi o 450 N, což je vzhledem k původní hodnotě 10 kN pokles o 4,5 %.



Obrázek 85: Hodnoty předpínací síly po stlačení podložky při zadané síle 3333 N

Následně tedy byla iterativě určena hodnota předpínací síly tak, aby po stlačení podložek byla dodržena hodnota síly 10 kN. Při zadání předpínací síly 3480 kN v jedné pružině COMBIN14, celkem tedy 10 440 N v jedné svěrci, je hodnota síly ve svěrci po stlačení podložky 9 969 N. Oproti požadované hodnotě 10 kN se jedná asi o 0,3 % rozdíl, který lze považovat za zanedbatelný.



Obrázek 86: Hodnoty předpínací síly po stlačení podložky při zadané síle 3480 N

Pružná podložka tl. 6 mm, ocelové podkladnice tl. 16 mm a vysoce elastická podložka tl. 12 mm byly modelovány jako jeden objem prvkem SOLID185 s definovanou hustotou, modulem pružnosti a součinitelem příčné kontrakce. K průhybu dochází v pevné jízdni dráze především v uzlu upevnění, jak již bylo popsáno. Prvky nahrazující podložky a podkladnici jsou tak pružnější, než je tomu v případě podložky v klasické konstrukci. Modul pružnosti je určen na základě známé hodnoty tuhosti v uzlu upevnění Vossloh system 300, která odpovídá 32 kN/mm při statickém zatížení a 38 kN/mm při dynamickém zatížení.

$$E = \frac{k l}{A}$$

$$E_{stat} \doteq 25,361E6$$

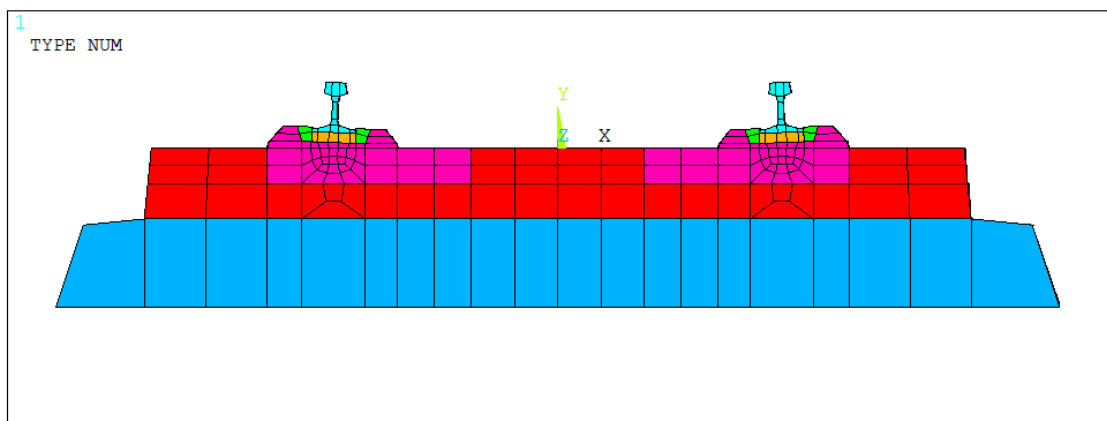
$$E_{dyn} \doteq 30,117E6$$

Narozdíl od podložky v uzlu upevnění klasické konstrukce tak nedochází k násobnému zvýšení tuhosti podložky pod patu kolejnice při změně zatížení ze statického na dynamické.

Úhlová vodící vložka zajišťující korektní polohu kolejnice je modelována prvkem SOLID185 s definovanou hustotou, modulem pružnosti a součinitelem příčné konstrukce. Vložka je uvažována jako tuhý prvek. Mezi vložkou a patou kolejnice jsou coupled nodes, které mají v tomto případě definovaný stejný posun v příčném a podélném směru. Kolejnice se tak vůči pražci může pohybovat pouze v kolmém směru. Pro samotný výpočet je tedy vodící vložka důležitá z hlediska správného posunu kolejnice pod zatížením. Ve výpočtu je sice také uvažována její hmotnost, ta by se ovšem vzhledem k hmotnosti ostatních částí konstrukce a velikosti zatížení vozidlem dala považovat za zanedbatelnou.

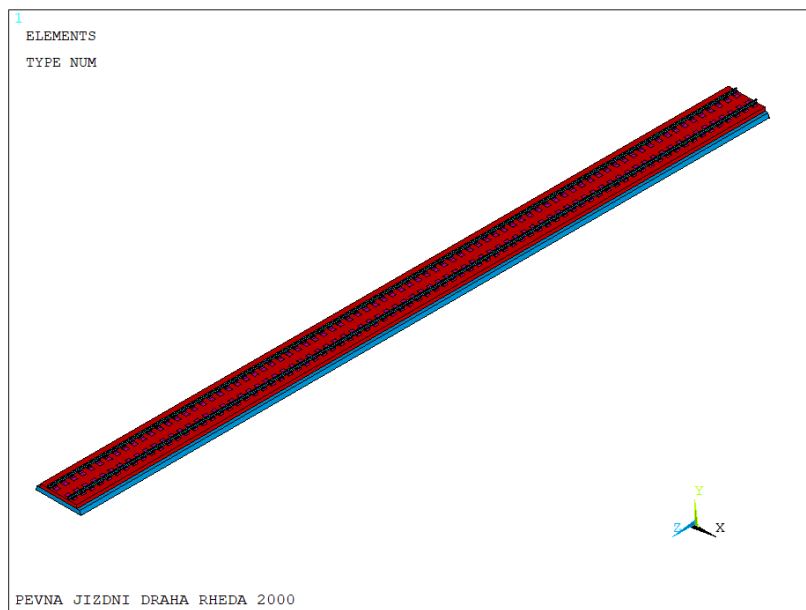
Pražec je modelován prvkem SOLID185 a definován hustotou, modulem pružnosti a součinitelem příčné kontrakce. Z obrázku pražců v úvodním textu je patrné, že se jedná o dvoublokový pražec s podélnou ocelovou výztuží. Konstrukce pražce byla v modelu podstatně zjednodušena. Ocelová výztuž byla vzata v potaz pouze při zadání hustoty pražce. Dvoublokový pražec je zalitý do monolitické betonové desky modelované prvkem SOLID185 s definovanou hustotou, modulem pružnosti a součinitelem příčné kontrakce.

Hydraulicky stmelená roznášecí vrstva je modelována prvkem SOLID185 s definovaným modulem pružnosti a součinitelem příčné konstrukce. Výrobce udává požadovanou hodnotu modulu pružnosti. Pod touto roznášecí vrstvou se v případě pevné jízdní dráhy nachází ochranná vrstva proti mrazu, která je modelována prvkem SURF154 s modulem pružnosti určeným výrobcem.

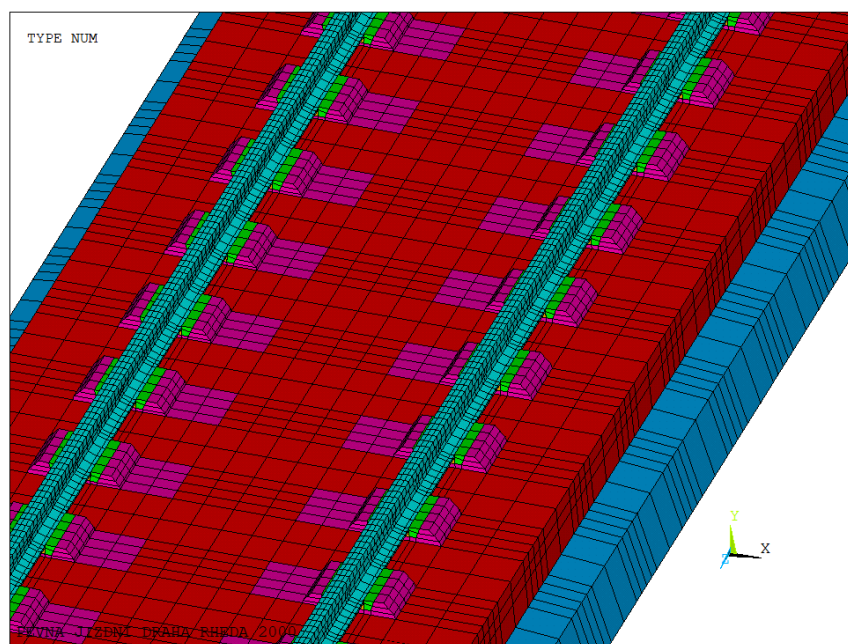


Obrázek 87: Svislý řez modelem pevné jízdní dráhy RHEDA 2000

Celková délka modelu pevné jízdní dráhy je 52 m, skládá se z 80 segmentů s délkou odpovídající standardní hodnotě rozdělení pražců 650 mm pro pevnou jízdní dráhu.



Obrázek 88: Výpočtový model pevné jízdní dráhy RHEDA 2000



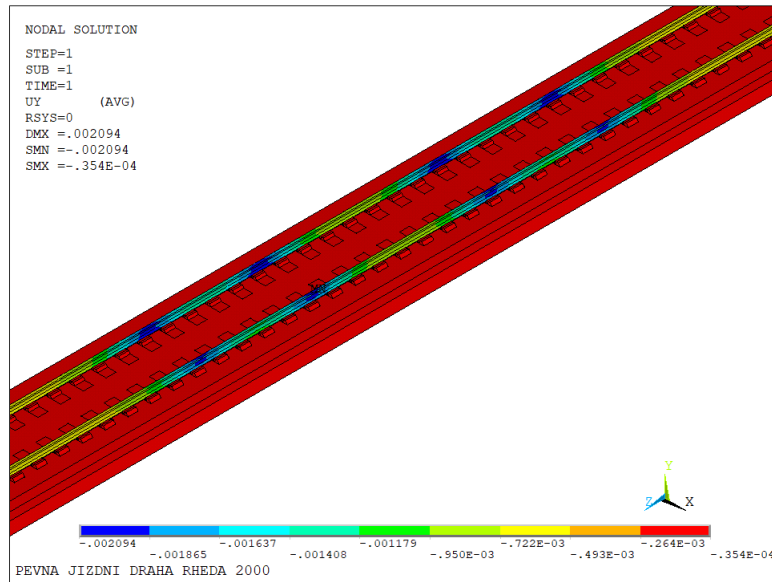
Obrázek 89: Detail výpočtového modelu pevné jízdní dráhy RHEDA 2000

6.6.2 Vstupní parametry modelu

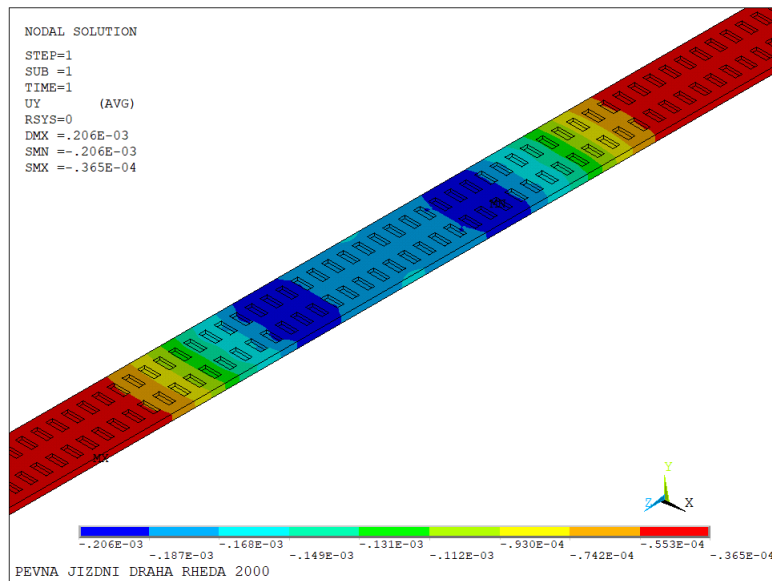
Kolejnice		SOLID185
Profil kolejnice		60 E2
Modul pružnosti	[Pa]	21E9
Součinitel příčné kontrakce	[-]	0,3
Hustota	[kg/m ³]	7850
Podložka pod patu kolejnice		SOLID185
Modul pružnosti - statická odezva	[Pa]	2,54E7
Modul pružnosti - dynamická odezva	[Pa]	3,01E7
Součinitel příčné kontrakce	[-]	0,001
Svěrky		COMBIN14
Tuhost	[N/m]	2,563E5
Předpínací síla	[N]	3,48E3
Plastová vodící vložka		SOLID185
Modul pružnosti	[Pa]	2E11
Součinitel příčné kontrakce	[-]	0,4
Hustota	[kg/m ³]	1300
Pražec		SOLID185
Modul pružnosti	[Pa]	3,7E10
Součinitel příčné kontrakce	[-]	0,2
Hustota	[kg/m ³]	2500
Betonová deska		SOLID185
Modul pružnosti	[Pa]	3,4E10
Součinitel příčné kontrakce	[-]	0,2
Hustota	[kg/m ³]	2400
Roznášecí vrstva		SOLID185
Modul pružnosti	[Pa]	7E9
Součinitel příčné kontrakce	[-]	0,2
Podkladní vrstva		SURF154
Tuhost	[Pa]	1,2E8

6.7 Statická odezva konstrukce

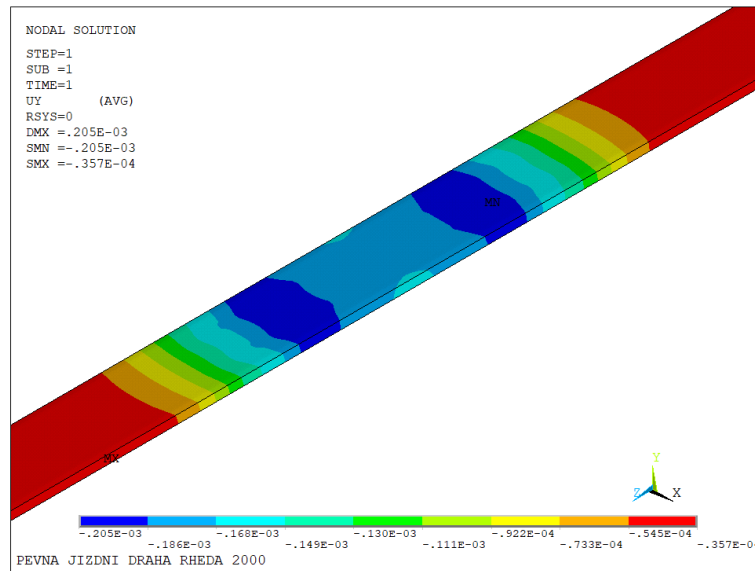
Stejně jako v případě klasické konstrukce je model pevné jízdni dráhy staticky zatížen kolovými silami o velikost 112,5 kN. Na obrázku je patrné, že k průhybu dochází především stlačením podložky v uzlu upevnění. Maximální průhyb kolejnice je asi 2 mm, maximální průhyb monolitické betonové desky je asi 0,2 mm. Na betonové desce pochopitelně nedochází k výrazným pružným deformacím, průhyb stabilizované roznášecí vrstvy je tak v podstatě stejný.



Obrázek 90: Pole posunutí u_y pevné jízdni dráhy při statickém zatížení vozidlem

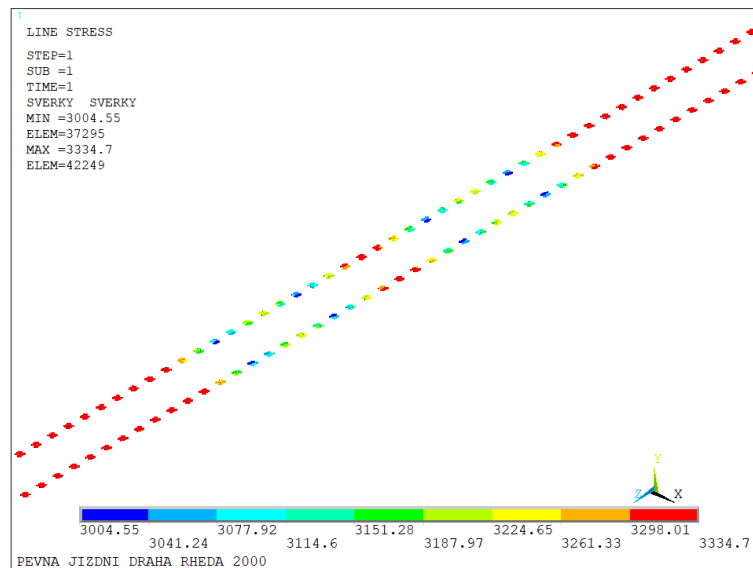


Obrázek 91: Pole posunutí u_y betonové desky



Obrázek 92: Pole posunutí u_y stabilizované roznášecí vrstvy

Při zatížení vozidlem dojde k dalšímu poklesu předpínací síly ve svěrkách. V případě pevné jízdní dráhy byla jedna svěrka modelována třemi pružinami COMBIN14 se stejnými hodnotami zadané předpínací síly v každé pružině, která byla iteračně určena jako 3480 N. Následně dojde ke stlačení podložek a poklesu předpínací síly na hodnotu asi 3323 N, jak bylo popsáno v předchozím textu. Při statickém zatížení nápravou poté dojde k dalšímu poklesu síly v uzlech upevnění zatížených kolovou silou asi o 300 N, na hodnotu 3005 N. V některých svěrkách se naopak hodnota předpínací síly mírně zvýší, zřejmě v důsledku tvaru průhybové křivky pod statickým zatížením, vykreslené např. v kapitole 5.7 *Porovnání odezvy výpočtového modelu s analytickým řešením*, kdy dochází ke vzniku zdvihové vlny před a za působící silou.

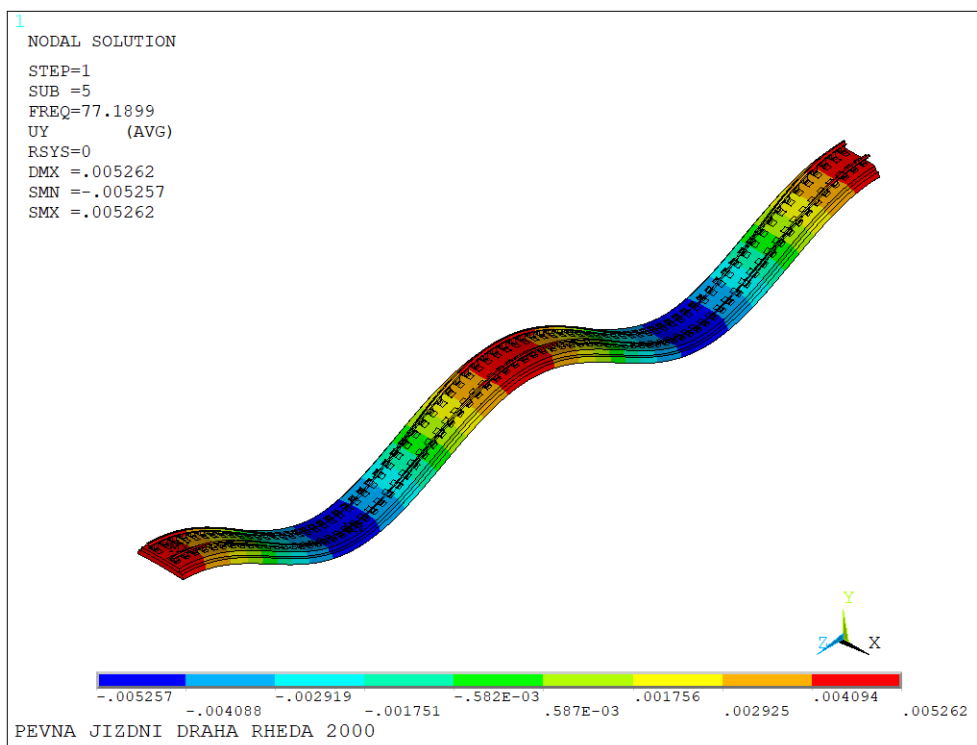


Obrázek 93: Předpínací síla ve svěrkách po statickém zatížení vozidlem

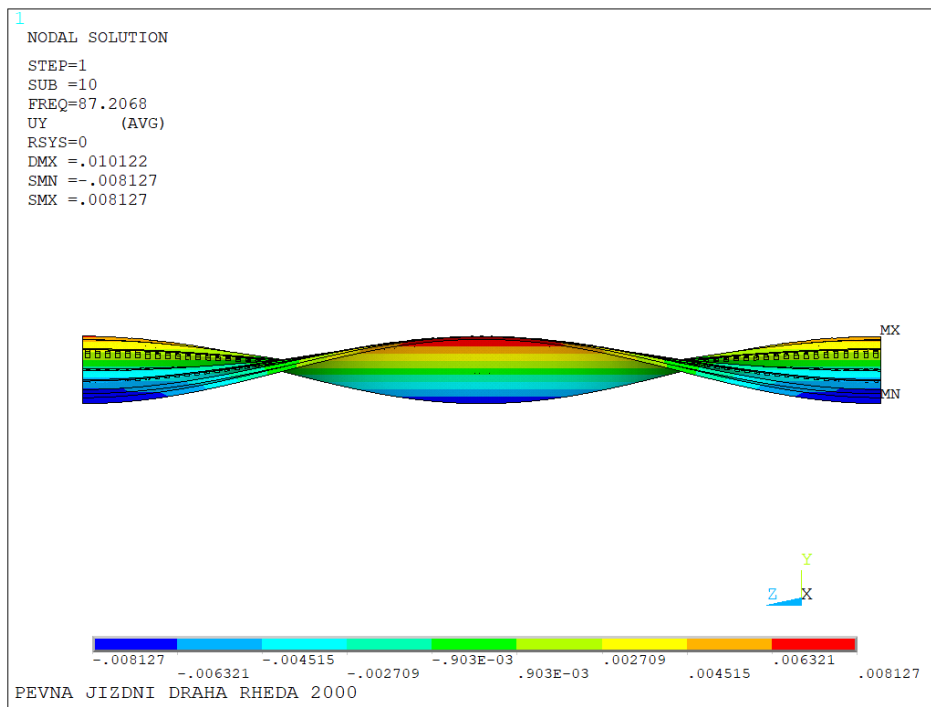
6.8 Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu

Lanczosovou metodou bylo vypočteno 30 vlastních tvarů kmitu a jejich frekvencí. Tužší konstrukce pevné jízdní dráhy kmitá s asi dvojnásobně vyššími frekvencemi oproti klasické konstrukci. Při výpočtu vlastních frekvencí a tvarů kmitu byl zadán dynamický modul pružnosti podložky pod patu kolejnice.

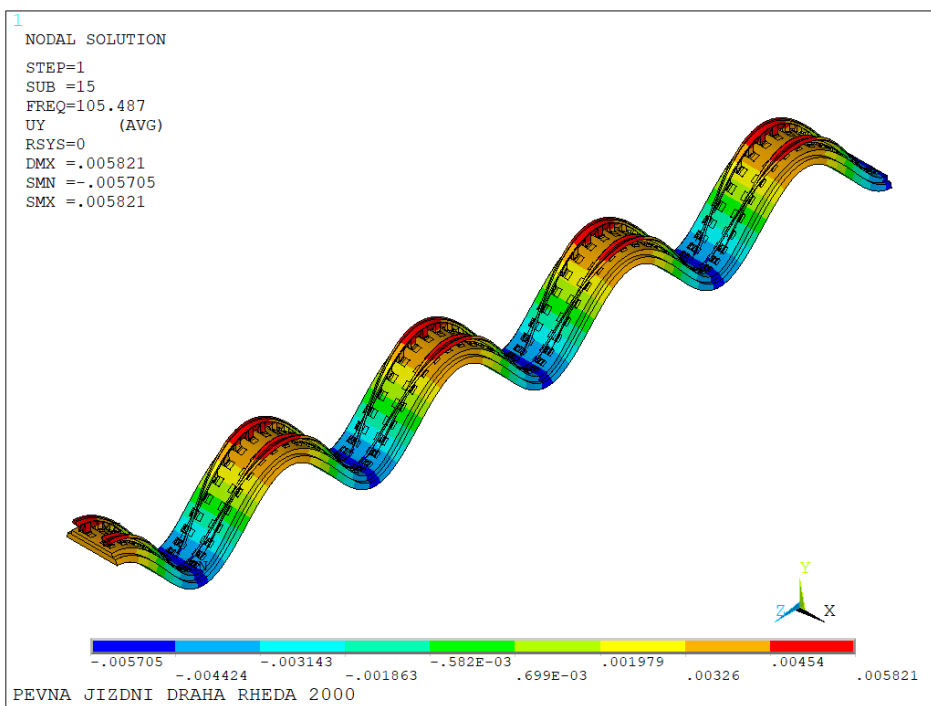
Vlastní frekvence			
Číslo vlastního tvaru	Vlastní frekvence [Hz]	Číslo vlastního tvaru	Vlastní frekvence [Hz]
1	75,602	16	112,51
2	75,612	17	116,33
3	75,677	18	116,51
4	76,079	19	116,71
5	77,190	20	117,10
6	79,440	21	117,74
7	80,292	22	117,92
8	82,089	23	118,64
9	83,221	24	119,01
10	87,207	25	119,25
11	88,793	26	119,80
12	94,907	27	119,88
13	96,241	28	121,11
14	104,03	29	121,16
15	105,49	30	121,19



Obrázek 94: Vlastní tvar kmitu při frekvenci $f_5=77,190$ Hz



Obrázek 95: Vlastní tvar kmitu při frekvenci $f_{10}=87,207$ Hz



Obrázek 96: Vlastní tvar kmitu při frekvenci $f_{15}=105,49$ Hz

6.9 Dynamická odezva konstrukce na pojezd vozidla

6.9.1 Model zatížení

V této diplomové práci je pevná jízdní dráha zatěžována stejným setem sil jako klasická konstrukce. Nejedná se ovšem o ideální řešení: interakční síly byly získány simulací pojezdu vozidla po klasické konstrukci. Z porovnání odezvy klasické konstrukce a pevné jízdní dráhy, kterou se zabývá poslední podkapitola této práce však bude zřejmé, že odezva, a tedy i interakce kolej-vozdlo se mezi těmito typy konstrukcí značně liší. Pro získání kvalitnějších výsledků v případě modelování odezvy pevné jízdní dráhy je třeba použít zatížení získané simulací interakce kolej-vozdlo příslušné konstrukce. Ty však nebyly v době provádění výpočtů v této diplomové práci k dispozici, proto jsou oba typy konstrukce zatěžované stejným setem dat.

6.9.2 Model útlumu konstrukce

Narozdíl od klasické konstrukce na šterkovém loži lze v případě konstrukce pevné jízdní dráhy předpokládat, že značný podíl na tlumení konstrukce bude mít především uzel upevnění. Dle výrobce upevnění Vossloh je hyperelastická podložka pod patu kolejnice schopna minimalizovat vibrace. To se naopak nedá předpokládat u betonové desky a stabilizované roznášecí vrstvy s poměrně vysokou tuhostí. Hodnoty útlumu upevnění však bohužel nejsou známy, proto i pro výpočet koeficientů útlumu pro pevnou jízdní dráhu byla uvažována hodnota poměrného útlumu 10 %. Uvažovány jsou významné frekvence $f_i = 77,190$ Hz a $f_j = 80,292$ Hz. Výsledné hodnoty koeficientů útlumu

$$\alpha \doteq 49,454,$$
$$\beta \doteq 2,021E - 4.$$

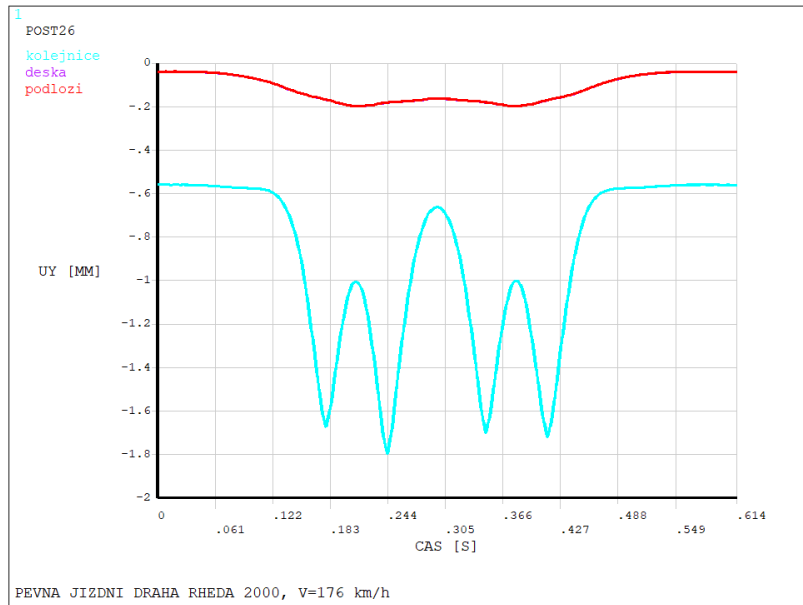
6.9.3 Výpočet odezvy

Výpočet odezvy na dynamické zatížení proběhl stejně jako v případě klasické konstrukce pomocí APDL. Makra pro výpočet odezvy pevné jízdní dráhy se od klasické konstrukce liší v podstatě jen zadáním polohy působišť jednotlivých sil. Stejně jsou také hodnoty parametrů pro časovou integraci. Během výpočtu je zadaná dynamická hodnota modulu pružnosti podložky pod patou kolejnice.

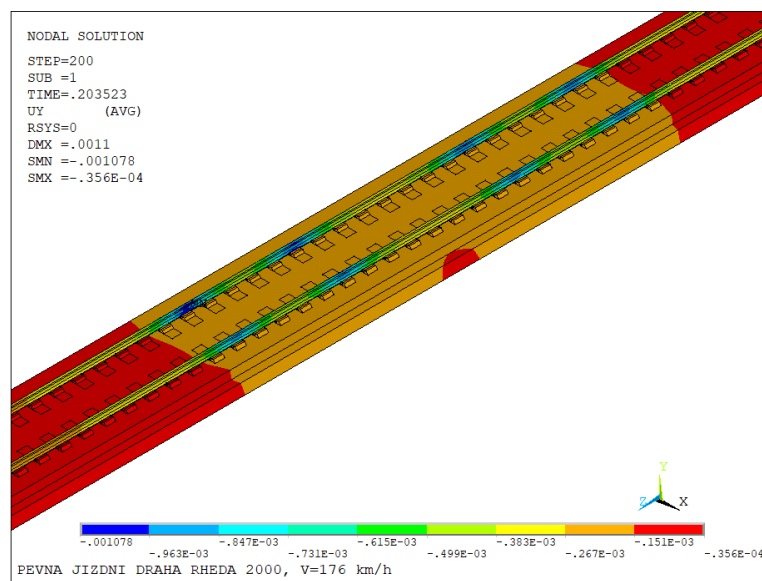
6.9.4 Výsledky

Byla vypočtena pole posunutí, napětí a přetvoření. Z rozsáhlého výsledkového souboru jsou zobrazeny vybrané veličiny.

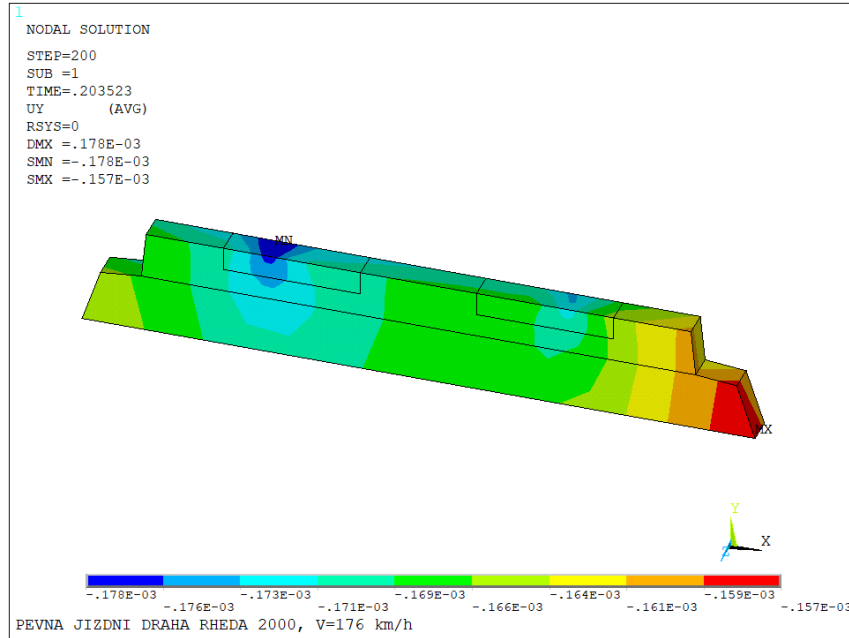
Maximální svislý posun kolejnice je asi 1,8 mm, u betonové desky a stabilizované vrstvy je to asi 0,2 mm. Protože betonová deska i stabilizovaná konstrukční jsou poměrně tuhé, nedochází zde během zatěžování téměř k žádným deformacím. Průhybové křivky se tak překrývají.



Obrázek 97: Posun u_y jednotlivých konstrukčních částí, $v = 176$ km/h

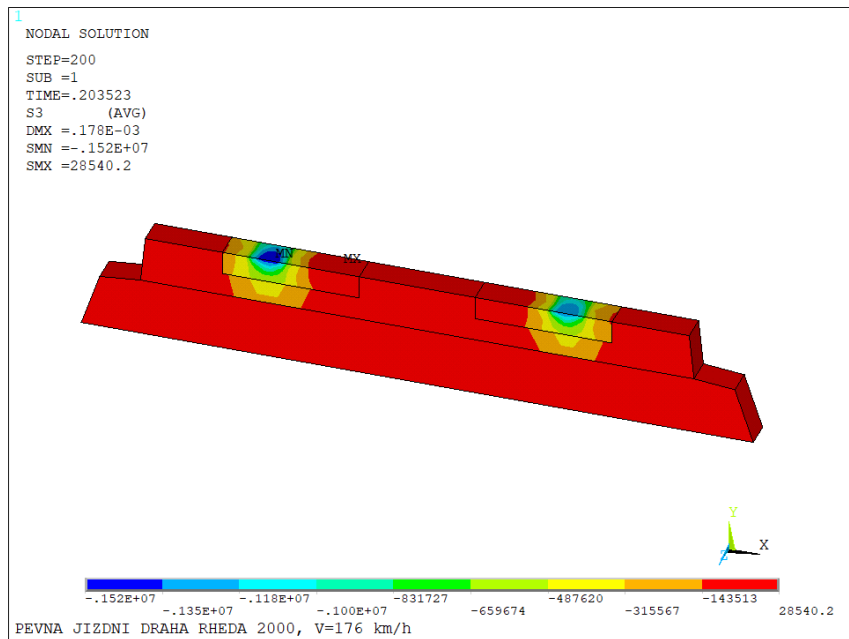


Obrázek 98: Pole posunutí u_y pevné jízdní dráhy v čase $t = 0,2035$ s

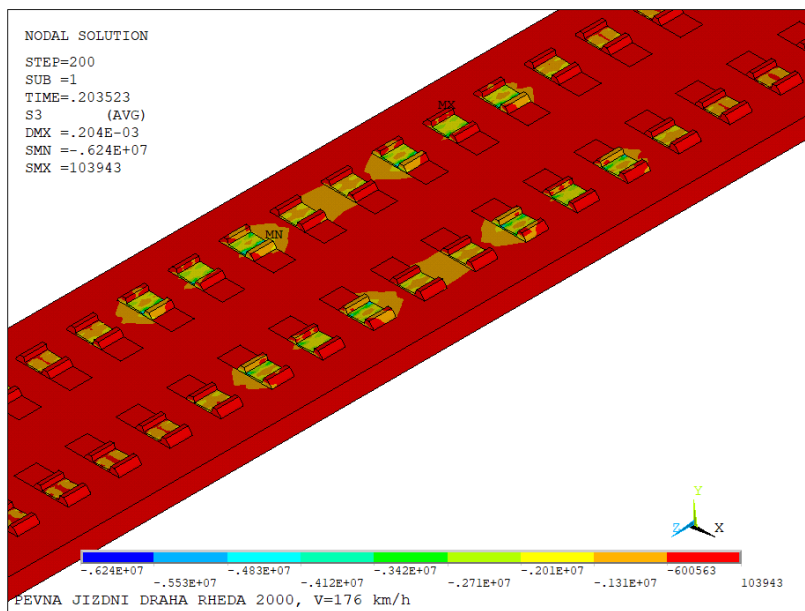


Obrázek 99: Pole posunutí u_y pod nápravou v čase $t = 0,2035$ s

Průběh napětí v pevné jízdni dráze pod nápravou se značně liší od klasické konstrukce. Pevná jízdni dráha by měla být díky vysoké ohybové tuhosti betonové desky a stabilizované roznášecí vrstvy schopna roznášet zatížení od dopravy na delší část konstrukce a přenášet tak méně zatížení do dalších vrstev a zemního tělesa.

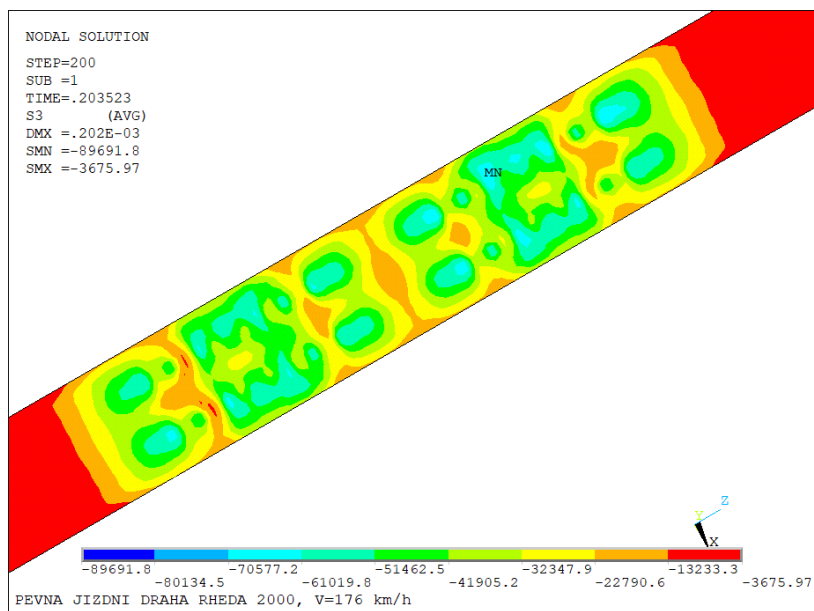


Obrázek 100: Pole napětí σ_3 pod nápravou v čase $t = 0,2035$ s



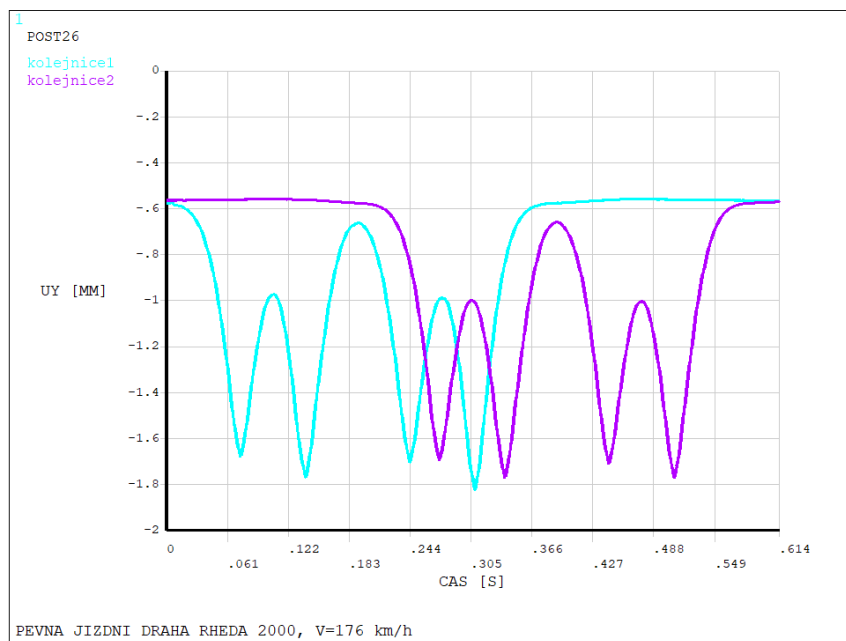
Obrázek 101: Pole napětí σ_3 na betonové desce pod dvěma nápravami

Na spodní ploše betonové desky lze skutečně pozorovat větší roznos účinků zatížení, než na spodní ploše štěrkového lože s většími koncentracemi napětí přímo pod pražci. Pokud bychom však chtěli porovnávat absolutní hodnoty napětí, je nutné si uvědomit, že ve výpočtovém modelu pevné jízdní dráhy byla betonová deska definována odpovídající hustotou, narozdíl od výpočtového modelu klasické konstrukce, kde bylo štěrkové lože uvažováno jako nehmotné.

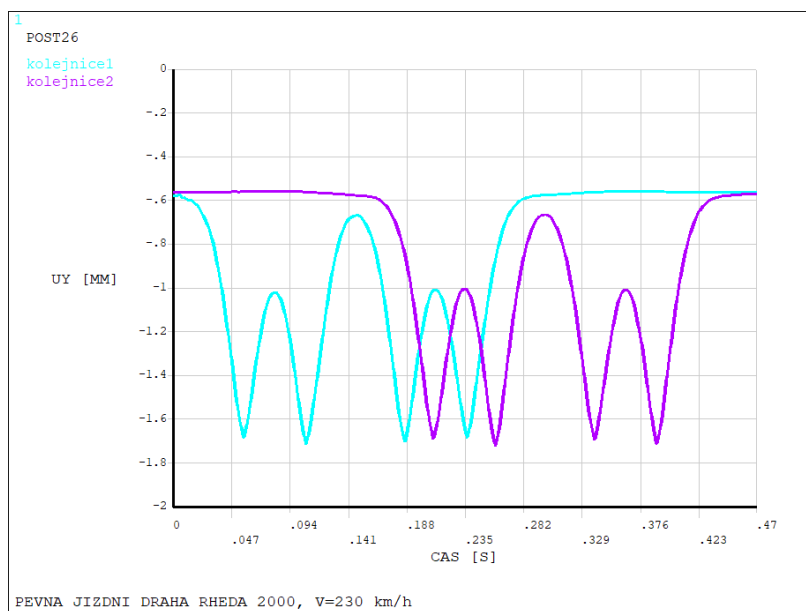


Obrázek 102: Pole napětí σ_3 na spodní ploše roznášecí stabilizované vrstvy

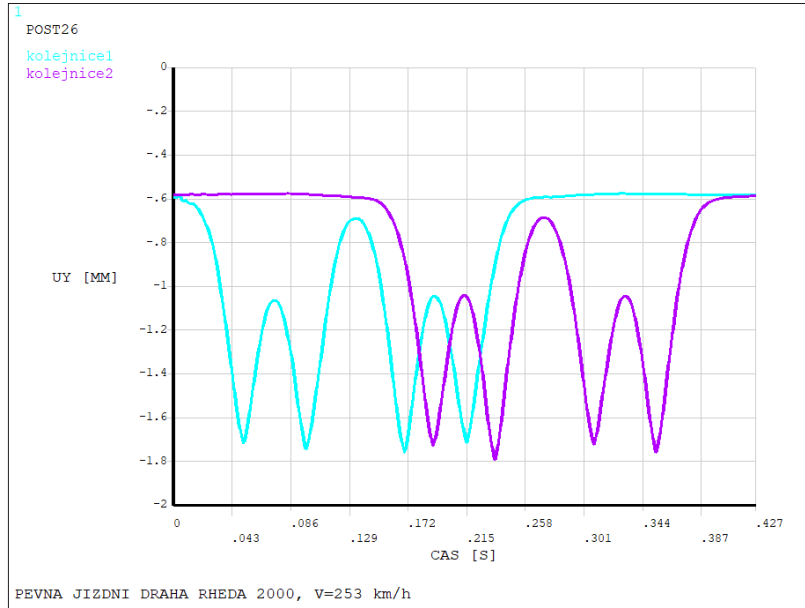
V pevné jízdní dráze se nárůst dynamických účinků spolu se zvyšující se rychlostí narozdíl od klasické konstrukce příliš neprojevuje. To je zřejmé i z následujících grafů, kde byl stejně jako v případě klasické konstrukce vykreslen posun u_y ve vybraných uzlech pro všechny tři rychlosti. Maximální hodnota svislého posunu asi 1,8 mm je stejná pro pojezd rychlostmi 176 i 253 km/h.



Obrázek 103: Posunutí u_y vybraných uzlů na hlavně kolejnice v čase, $v = 176$ km/h

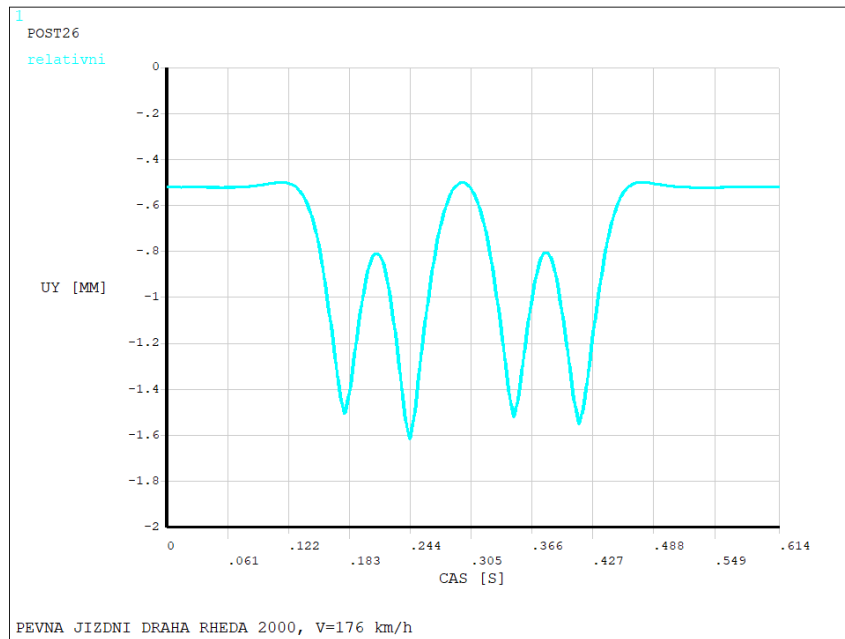


Obrázek 104: Posunutí u_y vybraných uzlů na hlavně kolejnice v čase, $v = 230$ km/h



Obrázek 105: Posunutí u_y vybraných uzlů na hlavně kolejnice v čase, $v = 253$ km/h

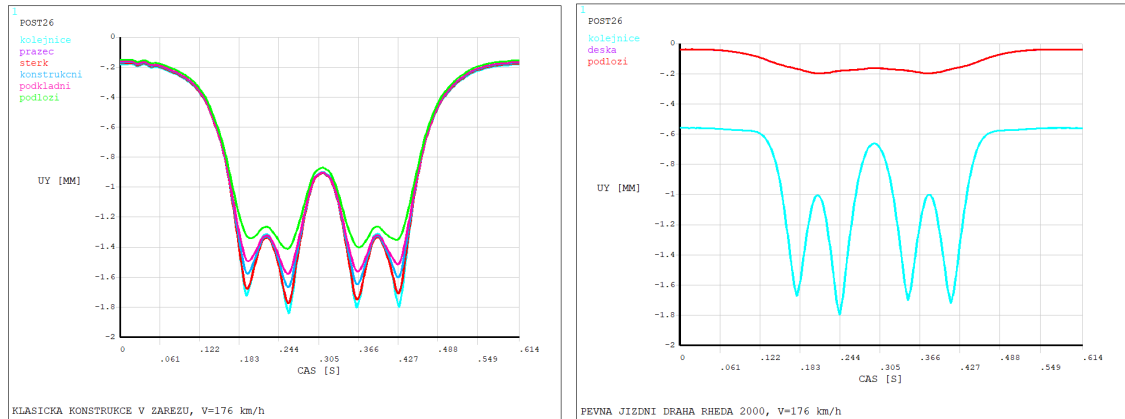
Vzhledem k tomu, že u pevné jízdní dráhy se většina svislého posunu odehrává v uzlu upevnění, absolutní hodnota posunu kolejnice u_y se od relativní hodnoty posunu kolejnice u_y vůči betonové desce příliš nemění.



Obrázek 106: Relativní posunutí u_y kolejnice, $v = 176$ km/h

6.10 Porovnání výsledků

Jak již bylo popsáno v předchozím textu, v případě klasické konstrukce dochází k přenosu účinků do značné hloubky zemního tělesa. Při modelování klasické konstrukce včetně vrstev podloží až do hloubky 4,35 m, lze ještě v této hloubce sledovat svislý posun dynamicky zatěžované konstrukce více než 0,5 mm [1]. To v realitě poté klade značné nároky na kvalitu konstrukčních vrstev. U pevné jízdni dráhy je naopak přes betonovou desku a stabilizovanou roznášecí vrstvu do zemního tělesa přenášena menší část zatížení. Především v případě velkého dynamického zatížení vysokorychlostních tratí je tak pevná jízdni dráha vhodným typem konstrukce, o čemž svědčí také její dominance oproti klasické konstrukci např. v nově budovaných VRT v Německu nebo Číně.



(a) Svislý průhyb v klasické konstrukci

(b) Svislý průhyb v pevné jízdni dráze

Obrázek 107: Porovnání dynamické odezvy modelů, $v = 176$ km/h

V obou konstrukcích lze pozorovat odlišné chování různých konstrukčních prvků, a to i přes nekorektně zvolený totožný set zatěžovacích sil, získaný simulací pojezdu lokomotivy po klasické konstrukci. Kromě odlišného svislého posunu konstrukční částí s definovanými různými tuhostmi bylo také zajímavé sledovat chování uzlu upevnění, kdy svěrky se stejnými parametry vykazovaly jiné chování v obou konstrukcích, a především v modelu pevné jízdni dráhy se jejich působení při různém zatěžování lišilo.

Při sledování průběhu napětí pod nápravou v obou konstrukcích je patrné, že vysoká tuhost betonové desky umožňuje roznesení účinků od železničních vozidel na větší plochu. Při zobrazení průběhu napětí na spodní ploše šterkového lože lze vidět značné koncentrace napětí pod pražci. Při odpovídajícím zobrazení pro pevnou jízdni dráhu (spodní plocha betonové desky odpovídá přibližně stejné vzdálenosti od paty kolejnice, jako je tomu pro spodní plochu šterkového lože v klasické konstrukci) lze vidět rovnoměrnější průběh a menší hodnoty napětí, přestože hodnota napětí na betonové desce je zvýšena také o vlastní tíhu desky, narozdíl od šterkového lože, které je uvažováno jako nehmotné.

V každém případě lze konstatovat, že prostorové výpočtové modely umožňují sledovat chování železniční konstrukce mnohem detailněji, než je tomu v případě rovinných výpočtových modelů. Rovinné modely jsou nenáročnou variantou, ať již z hlediska samotné tvorby modelů, tak i nároků na výpočetní techniku. Narozdíl od prostorových modelů ovšem poskytují velmi zjednodušenou informaci o dějích v konstrukci při různém zatěžování. Prostorové modely naopak poskytují komplexní informaci o chování konstrukce, a to za akceptovatelné náročnosti tvorby modelů i požadavků na výpočetní techniku - v této diplomové práci probíhaly veškeré výpočty na běžném notebooku.

7 Závěr

Diplomová práce se zabývá studiem možností modelování železniční tratě a výpočtem odezvy konstrukce koleje na statické a dynamické zatížení železničním vozidlem. V první části práce byly představeny jednotlivé konstrukční prvky koleje. Následně byly popsány způsoby výpočtů odezvy koleje při statickém i dynamickém zatížení, a to jak diferenciální postupy řešení dle Timošenka a Frýby, tak i řešení metodou konečných prvků, patřící do skupiny přibližných řešení využívající variační principy. Software zvolený pro výpočty metodou konečných prvků byl programový systém ANSYS Classic.

V praktické části práce byl nejprve vytvořen zjednodušený rovinný výpočtový model reprezentující podélnou polovinu koleje. Parametry konstrukčních prvků byly zadány na základě hodnot daných výrobcem daného prvku. V případě podloží byly parametry určeny iterativně tak, aby svislý posun od zatížení kolovými silami byl asi 1,5 mm. Rovinný výpočtový model byl následně staticky a dynamicky zatěžován interakčními silami, které simulovaly účinky vozidla. Byla vypočtena statická odezva od zatížení vozidlem a vlastní frekvence a tvary kmitu. Poté byly určeny významné frekvence, na základě kterých byly spočítány parametry pro model útlumu. Při výpočtu dynamické odezvy byl model zatěžován soustavami svislých kolových sil simulující pojezd vozidla při rychlosti 140 a 160 km/h. Z výsledkového souboru byl vykreslen svislý posun zvolených uzlů v čase. Statická odezva modelu od jedné kolové síly vypočtena v ANSYSu byla následně porovnána s analytickým řešením dle Timošenka v programu MATLAB. Dynamická odezva vypočtena v ANSYSu pro rychlost 140 km/h byla porovnána v MATLABU s řešením dle Frýby. Poměrně dobrá shoda výsledků potvrdila korektní odezvu rovinného výpočtového modelu na účinky vozidla. Protože rovinný model umožňuje získat pouze základní informace o účincích železničního vozidla na konstrukci, byly sledovány především hodnoty svislých posunů.

Alternativou umožňující získání komplexní informace o dějích v konstrukci železniční tratě jsou prostorové výpočtové modely, kterým byla věnována další část práce. Modelována byla klasická konstrukce jednokolejné trati v zářezu a konstrukce pevné jízdní dráhy typu RHEDA 2000. V pevné jízdní dráze přejímá většinu svislé pružnosti systém upevnění, narozdíl od klasické konstrukce, kde je většina svislé pružnosti v pražcovém podloží. Výběr zmíněných typů konstrukcí tak umožnil sledovat rozdíly v odezvě těchto dvou modelů na účinky železničních vozidel. Byla popsána tvorba modelů včetně určení hodnot parametrů. Následně byla vypočtena statická odezva při zatížení vozidlem, vlastní frekvence a tvary kmitů a určeny parametry modelu útlumu. Při dynamické odezvě byly oba prostorové modely zatěžovány soustavami sil odpovídající pojezdu vozidla rychlostí 176, 230 a 253 km/h. Byla vypočtena pole posunutí, napětí a přetvoření a z rozsáhlých výsledkových souborů byly zobrazeny vybrané veličiny. Odezva prostorových modelů byla následně porovnána. Svislý posun hlavy kolejnice asi 1,8 mm při pojezdu vozidla rychlostí 176 km/h je stejný pro oba typy konstrukcí. Zatímco však v klasické konstrukci lze sledovat svislý posun asi 1 mm ještě v hl. 1,2 m, v pevné jízdní dráze je svislý posun podloží v hl. 0,54 m asi 0,2 mm.

Prokázalo se, že výpočtové modely železniční tratě umožňují především v případě prostorových modelů možnost analyzovat jak celkové chování konstrukce při zatěžování vozidlem, tak i účinky od zatížení na konkrétních konstrukčních prvcích, jako jsou svěrky v modelu upevnění, konstrukční vrstvy apod. Další zajímavé poznatky by mohlo přinést zatěžování výpočtového modelu pevné jízdní dráhy korektním setem interakčních sil. V průběhu vyhodnocení výsledků analýz se také jednoznačně ukázalo, že je třeba modelovat železniční spodek do větších hloubek, aby bylo možné komplexněji studovat děje v konstrukci, a to především v případě klasické konstrukce.

8 Literatura

Reference

- [1] Vlastislav Salajka, Jiří Kala, Petr Hradil, Zita Salajková (2018). *Matematické modelování železniční trati*, VUT v Brně.
- [2] Coenraad Esveld (2001). *C. Modern Railway Track*, 2nd ed., MRT Productions, Zaltbommel, ISBN: 90-800324-3-3.
- [3] Petr Vymlátíl (2009). *Komplexní dynamická analýza působení kolejových vozidel na železniční konstrukce*, Disertační práce, FAST, VUT v Brně.
- [4] ANSYS, Inc. and ANSYS Europe (2021). *Theory Reference*, ANSYS, Inc.
- [5] Josef Kopeček (2019). *Analýza chování koleje na účinky železničních vozidel*, Diplomová práce, FAST, VUT v Brně.
- [6] Pavel Kulich (2017). *Dynamická analýza koleje*, Diplomová práce, FAST, VUT v Brně.
- [7] Mojmír Nejezchleb (2000). *Konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku modernizovaných tratí*. [online], Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195402/1007.pdf/2d21f7bf-ee4f-44d2-9c71-63c724a2cb8d>
- [8] *Pevná jízdní dráha*. [online], Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/o-nas/vse-o-sprave-zeleznic/zeleznice-cr/za-jimavosti-z-vyvoje-zeleznicniho-svrsku/pevna-jizdni-draha>
- [9] *The way to go. rheda 2000 ballastless track system*. [online], Dostupné z: <https://docplayer.net/21000910-The-way-to-go-rheda-2000-ballastless-track-system.html>
- [10] *Transport Rail 60E2 - ArcelorMittal. Rails and special sections of ArcelorMittal - Home*. [online], Dostupné z: <https://rails.arcelormittal.com/types-rails/transport-rails/european-standards/rail-60e2>
- [11] *System W 14*. [online], Dostupné z: https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_11018.php
- [12] *System 300*. [online], Dostupné z: https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_9996.php
- [13] *Pražce B91S*. [online], <https://www.spravazeleznic.cz/o-nas/vse-o-sprave-zeleznic/zeleznice-cr/za-jimavosti-z-vyvoje-zeleznicniho-svrsku/prazce>
- [14] *RHEDA 2000*. [online], Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RHEDA_2000_01.JPG
- [15] *Klingelův pohyb*. [online], Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-45376-7_8
- [16] *Vzorový řez jednokolejné železniční tratě v zářezu*. [online], Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3305811/>
- [17] *Konstrukční uspořádání pevné jízdní dráhy RHEDA 2000*. [online], Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Slab-track-system-Rheda-2000-5fig1_280876134

9 Seznam obrázků

Seznam obrázků

1	Pevná jízdní dráha typu RHEDA 2000 v úseku Třebovice-Rudoltice 8	4
2	Rozdělení konstrukce koleje na železniční svršek a spodek	4
3	Profil kolejnice 60 E2 10	5
4	Systém upevnění Vossloh W14 11	6
5	Bilineární tuhost různých typů svřek 11	6
6	Systém upevnění Vossloh system 300 12	7
7	Pražce B 91S 13	7
8	Dvoublokové pražce používané v systému RHEDA 2000 14	8
9	Uspořádání tělesa železničního spodku	9
10	Sinusoidový pohyb dvojkolí 15	10
11	Jednobodový a dvoubodový kontakt 11	10
12	Kontaktní elipsa 11	11
13	Roznos svislé kolové síly na pražce 5	11
14	Hodnoty napětí na částech konstrukce po zatížení kolovou silou 5	11
15	Schéma elementu Timošenkova modelu 6	12
16	Schéma elementu Frýbova modelu 6	13
17	Schéma rovinného výpočtového modelu	17
18	Profil a dělení kolejnice v rovinném modelu	17
19	Detail rovinného modelu	18
20	Zadané okrajové podmínky	19
21	Prvek BEAM188 4	20
22	Prvek COMBIN14 4	21
23	Prvek MASS21 4	21
24	Model zatížení lokomotivou ř. 150 při výpočtu statické odezvy	22
25	Posunutí u_y při zatížení stojícím vozidlem	22
26	Vlastní tvar kmitu rovinného výpočtového modelu při frekvenci $f_1=206,40$ Hz	23
27	Vlastní tvar kmitu rovinného výpočtového modelu při frekvenci $f_9=207,03$ Hz	23
28	Schéma výpočtového modelu lokomotivy ř. 150	24
29	Průběh hodnot svislých kolových sil při rychlosti 140 km/h	24
30	Průběh hodnot svislých kolových sil při rychlosti 160 km/h	25
31	Poloha sledovaných míst A a B	26
32	Posunutí u_y v místě A, $v = 140$ km/h	26
33	Posunutí u_y v místě B, $v = 140$ km/h	27
34	Posunutí u_y v místě A a B, $v = 140$ km/h	27
35	Posunutí u_y v místě A, $v = 160$ km/h	28
36	Posunutí u_y v místě B, $v = 160$ km/h	28
37	Posunutí u_y v místě A a B, $v = 160$ km/h	29
38	Porovnání odezvy na zatížení kolovou silou	30
39	Porovnání odezvy na zatížení pohyblivou silou	30
40	Vzorový příčný řez jednokolejné železniční tratě v zářezu 16	31
41	Konstrukční uspořádání pevné jízdní dráhy RHEDA 2000 17	31
42	Svislý průhyb v klasické konstrukci a pevné jízdní dráze	32
43	Schéma modelu klasické konstrukce	33
44	Profil, dělení a úklon kolejnice	33
45	Umístění pružin reprezentující svřeky	34
46	Hodnoty předpínací síly ve svřkách po stlačení podložky	34
47	Zjednodušený tvar a dělení pražce	35
48	Příčný řez modelem klasické konstrukce	35

49	Výpočtový model klasické konstrukce	36
50	Detail výpočtového modelu klasické konstrukce	36
51	SOLID185 [4]	38
52	SURF154 [4]	38
53	Pole posunutí u_y klasické konstrukce při zatížení vozidlem	39
54	Pole posunutí u_y šterkového lože	40
55	Pole posunutí u_y podloží	40
56	Předpínací síla ve střední pružině svěrky	41
57	Předpínací síla v krajních pružinách svěrky	41
58	Vlastní tvar kmitu klasické konstrukce při frekvenci $f_5=35,563$ Hz	42
59	Vlastní tvar kmitu klasické konstrukce při frekvenci $f_{10}=42,229$ Hz	43
60	Vlastní tvar kmitu klasické konstrukce při frekvenci $f_{25}=83,535$ Hz	43
61	Kolové síly Q a vodící síly Y	44
62	Průběh kolových sil od 1. nápravy, $v = 176$ km/h	44
63	Průběh kolových sil od 2. nápravy, $v = 176$ km/h	45
64	Průběh kolových sil od 3. nápravy, $v = 176$ km/h	45
65	Průběh kolových sil od 4. nápravy, $v = 176$ km/h	46
66	Průběh kolových sil od 1. nápravy, $v = 230$ km/h	46
67	Průběh kolových sil od 2. nápravy, $v = 230$ km/h	47
68	Průběh kolových sil od 3. nápravy, $v = 230$ km/h	47
69	Průběh kolových sil od 4. nápravy, $v = 230$ km/h	48
70	Průběh kolových sil od 1. nápravy, $v = 253$ km/h	48
71	Průběh kolových sil od 2. nápravy, $v = 253$ km/h	49
72	Průběh kolových sil od 3. nápravy, $v = 253$ km/h	49
73	Průběh kolových sil od 4. nápravy, $v = 253$ km/h	50
74	Posun u_y jednotlivých konstrukčních částí v čase $t = 0,2035$ s	51
75	Pole posunutí u_y v pražcovém podloží pod nápravou v čase $t = 0,2035$ s	52
76	Pole napětí σ_3 v pražcovém podloží pod nápravou v čase $t = 0,2035$ s	52
77	Pole napětí σ_3 na pražcích v čase $t = 0,2035$ s	53
78	Pole napětí σ_3 na spodní ploše šterkového lože v čase $t = 0,2035$ s	53
79	Svislý posun u_y vybraných uzlů na hlavně kolejnice v čase, $v = 176$ km/h	54
80	Svislý posun u_y vybraných uzlů na hlavně kolejnice v čase, $v = 230$ km/h	54
81	Svislý posun u_y vybraných uzlů na hlavně kolejnice v čase, $v = 253$ km/h	55
82	Relativní posunutí u_y kolejnice, $v = 176$ km/h	55
83	Schéma modelu pevné jízdní dráhy RHEDA 2000	56
84	Umístění pružin reprezentující svěrky	56
85	Hodnoty předpínací síly po stlačení podložky při zadané síle 3333 N	57
86	Hodnoty předpínací síly po stlačení podložky při zadané síle 3480 N	57
87	Svislý řez modelem pevné jízdní dráhy RHEDA 2000	58
88	Výpočtový model pevné jízdní dráhy RHEDA 2000	59
89	Detail výpočtového modelu pevné jízdní dráhy RHEDA 2000	59
90	Pole posunutí u_y pevné jízdní dráhy při statickém zatížení vozidlem	61
91	Pole posunutí u_y betonové desky	61
92	Pole posunutí u_y stabilizované roznášecí vrstvy	62
93	Předpínací síla ve svěrkách po statickém zatížení vozidlem	62
94	Vlastní tvar kmitu při frekvenci $f_5=77,190$ Hz	63
95	Vlastní tvar kmitu při frekvenci $f_{10}=87,207$ Hz	64
96	Vlastní tvar kmitu při frekvenci $f_{15}=105,49$ Hz	64
97	Posun u_y jednotlivých konstrukčních částí, $v = 176$ km/h	66
98	Pole posunutí u_y pevné jízdní dráhy v čase $t = 0,2035$ s	66
99	Pole posunutí u_y pod nápravou v čase $t = 0,2035$ s	67
100	Pole napětí σ_3 pod nápravou v čase $t = 0,2035$ s	67

101	Pole napětí σ_3 na betonové desce pod dvěma nápravami	68
102	Pole napětí σ_3 na spodní ploše roznášecí stabilizované vrstvy	68
103	Posunutí u_y vybraných uzlů na hlavní kolejnici v čase, $v = 176$ km/h	69
104	Posunutí u_y vybraných uzlů na hlavní kolejnici v čase, $v = 230$ km/h	69
105	Posunutí u_y vybraných uzlů na hlavní kolejnici v čase, $v = 253$ km/h	70
106	Relativní posunutí u_y kolejnici, $v = 176$ km/h	70
107	Porovnání dynamické odezvy modelů, $v = 176$ km/h	71