



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

**KONSTRUKCE VÝHYBEK PRO
VYSOKORYCHLOSTNÍ TRATI**

SWITCH AND CROSSING DESIGN FOR HIGH SPEED LINES

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Lukáš Raif

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. OTTO PLÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2022

ABSTRAKT

V souvislosti s připravovanou stavbou vysokorychlostních tratí v České republice se dostávají stále častěji do popředí odlišné požadavky na konstrukci koleje i výhybek a výhybkových konstrukcí, než byly standardem v minulosti. Výhybka určená pro vysokorychlostní trati musí splňovat mnoho kritérií, jelikož se rychlosti v přímém směru předpokládají běžně 250 až 350 km/h. Hlavním požadavkem, ke kterému v poslední době směřuje většina konstrukčních úprav a vylepšení výhybek, je omezení dynamického namáhání. Cílem disertační práce je výzkum možností snížení dynamického namáhání výhybek při průjezdu, a to především pomocí sjednocení tuhosti kolejové jízdní dráhy prostřednictvím systémů upevnění kolejnic na pražci. Práce vychází ze sledování zkušebního úseku s výhybkami se zpružněním v žst. Ústí nad Orlicí, na základě něhož navrhuje úpravu konstrukce vysokorychlostní výhybky s cílem snížení dynamického namáhání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výhybky a výhybkové konstrukce, železniční svršek, systémy upevnění kolejnic, tuhost kolejové jízdní dráhy, dynamické namáhání.

ABSTRACT

Different requirements for track structures, switches and crossings have recently gained prominence, in part, due to preparations of high-speed lines across the Czech Republic. High-speed turnouts must fulfil many criteria, because the speeds on main line turnouts normally reach between 250 and 350 km/h. The main requirement, which most structural modifications and turnout improvements deal with, is to reduce dynamic load. The PhD thesis aims to research in particular possibilities for reducing dynamic load caused by passing vehicles; primarily by track stiffness optimization by fastening system modifications. The work is based on the observation of a test section in Ústí nad Orlicí railway station, where switches and crossings with modified fastening systems were installed. The evaluation is then used as a basis for designing of a rail fastening system to optimize the track stiffness in high-speed switches and crossings to reduce the dynamic effects.

KEYWORDS

Switches and crossings, railway superstructure, rail fastening systems, track stiffness, dynamic loading.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RAIF, Lukáš. *Konstrukce výhybek pro vysokorychlostní trati*. Brno, 2022. 254 s., 149 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Konstrukce výhybek pro vysokorychlostní trati zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 31. 1. 2022

Ing. Lukáš Raif
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na prvním místě je nezbytné poděkovat mému školiteli doc. Ing. Ottu Pláškoví, Ph.D. za odborné vedení po celou dobu doktorského studia. Jsem přesvědčen, že veškeré nabyté znalosti jak z problematiky týkající se přímo předmětu disertační práce, tak obecně z hlediska celého oboru železničních konstrukcí a staveb, budu dále ve své odborné činnosti používat a dále rozvíjet. Budu vždy velmi potěšen, naskytne-li se kdykoliv v budoucnu příležitost s doc. Pláškem opět spolupracovat. Rovněž také děkuji všem dalším zástupcům Ústavu železničních konstrukcí a staveb, kteří se podíleli na měřeních a vyhodnoceních, která jsou zmíněna v této práci.

Dále bych chtěl poděkovat zástupcům firmy DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. za umožnění pracovat v oddělení Výzkum a vývoj, díky čemuž bylo možno výzkum z oblasti výhybek a výhybkových konstrukcí dále rozvíjet a spolupracovat na zajímavých projektech. Jmenovitě bych rád poděkoval Ing. Marku Smolkovi, MBA, Ing. Jiřímu Havlíkovi a Ing. Bohuslavu Pudovi za předání dalších nezbytných praktických a odborných informací z této oblasti a odborné vedení v průběhu mého působení v DT. Potřeba je také poděkovat všem zástupcům oddělení Výzkumu a vývoje, kteří se mnou spolupracovali na prováděných měřeních, a to zejména Ing. Antonínu Vévodovi, Bc. Miloslavu Klementovi, Ing. Petru Havlíčkovi, Ph.D. a dalším.

Rád bych vyjádřil vděk také zástupcům všech dalších spolupracujících institucí, kteří se podíleli na výzkumu, který je zmíněn v této disertační práci a který významně pomohl dokreslit celkový obraz o sledovaných výhybkách v žst. Ústí nad Orlicí. Jedná se zejména o Univerzitu Pardubice a České vysoké učení technické v Praze. Za spolupráci v oblasti výpočtového modelování děkuji Ústavu stavební mechaniky Fakulty stavební VUT v Brně.

Za gramatickou a stylistickou kontrolu děkuji kolegyním Mgr. Ditě Uhrové a Mgr. Kateřině Bačíkové a za pomoc při tisku a vazbě děkuji kolegyni Ing. Renatě Neumanové.

OBSAH

Obsah	9
1 Úvod	13
2 Přehled současného stavu	15
2.1 Teoretická východiska	15
2.1.1 Dynamické chování koleje	15
2.1.2 Průhyb jako vyjádření tuhosti kolejové jízdní dráhy	17
2.1.3 Výpočet průhybu dle Timošenka na Winklerově modelu podloží	18
2.1.4 Vztahy související s tuhostí	25
2.1.5 Statická soustava pro Pasternakův model podloží	33
2.1.6 Dynamická soustava pro Winklerovo podloží (vč. úpravy dle Frýby) ...	36
2.1.7 Změna tuhosti kolejové jízdní dráhy a vliv na dynamické namáhání	45
2.1.8 Průběh tuhosti kolejové jízdní dráhy podél výhybky	46
2.1.9 Zavedení dynamického vlivu do statického výpočtu	48
2.1.10 Rázové síly při průjezdu srdcovkou	50
2.1.11 Přenos zatížení do pražcového podloží	52
2.1.12 Tuhost klasické konstrukce koleje a pevné jízdní dráhy	54
2.1.13 Tuhost prutu	55
2.2 Současný stav v oblasti technických řešení – zkušenosti z České republiky	57
2.2.1 Zpružněné výhybky výrobce BWG	57
2.2.2 Dosavadní vývoj zpružněných výhybek v DT	59
2.2.3 Zpružněné systémy upevnění používané v pražském metru	62
2.2.4 Zpružněné systémy upevnění běžné koleje – Vossloh E14	64
2.2.5 Podpražcové podložky	65
2.3 Současný stav v oblasti technických řešení – zahraniční aplikace	66
2.3.1 Vossloh	66
2.3.2 Pandrol	69
2.3.3 Delkor	70
2.3.4 Schwiag	72
2.3.5 Pružné uložení pražců v konstrukci PJD	72

2.3.6	Příklad reálné vysokorychlostní výhybky	73
2.4	Materiály pružných prvků.....	74
2.4.1	Pryž	75
2.4.2	Vossloh Cellentic®.....	75
2.4.3	Getzner Sylodyn®.....	76
2.4.4	P+S Diepolast®	77
2.5	Současné požadavky na systémy upevnění kolejnice na podpoře.....	78
2.5.1	Požadavky vycházející z TSI	78
2.5.2	Požadavky vycházející z evropských norem.....	79
2.5.3	Požadavky Správy železnic.....	80
3	Cíle dizertační práce.....	81
3.1	Globální pohled na výzkum a vývoj výhybek vedoucí ke stanovení dílčích cílů	81
3.2	Dílčí cíle disertační práce	84
3.2.1	Zhodnocení zkušebním úseku se zpružněnými výhybkami	84
3.2.2	Určení statické a dynamické odezvy VR výhybky	84
3.2.3	Návrh konstrukčního řešení zpružnění VR výhybky	84
3.2.4	Laboratorní zkoušky prvku systému upevnění zpružněné výhybky	85
4	Sledování stávajícího zkušebního úseku.....	86
4.1	Popis zkušebního úseku.....	86
4.1.1	Výhybky zkušebního úseku.....	86
4.1.2	Stav zkušebního úseku a údržbové zásahy	89
4.1.3	Výsledky měření deformačních charakteristik železničního spodku.....	90
4.2	Metodika zpracování.....	93
4.2.1	Vlastní měření a vyhodnocení	95
4.2.2	Metodiky měření spolupracujících institucí	108
4.3	Dosažené výsledky	127
4.3.1	Výsledky vlastního měření.....	127
4.3.2	Výsledky měření spolupracujících institucí.....	139
4.3.3	Celkové hodnocení zkušebního úseku	161
5	Návrh konstrukčního řešení na základě zjištěné statické a dynamické odezvy	165

5.1	Metodika zpracování	166
5.1.1	Vytvoření podkladu pro výpočtový model	166
5.1.2	Vytvoření konečně prvkového modelu pro analýzu.....	171
5.1.3	Postup určení statické a dynamické odezvy	173
5.1.4	Předběžný variantní návrh konstrukčního řešení zpružnění	178
5.1.5	Úpravy na výpočtovém modelu se zahrnutím zpružnění	183
5.2	Dosažené výsledky	183
5.2.1	Výsledky výpočtu na výhybce se stávajícími systémy upevnění.....	184
5.2.2	Výsledky výpočtu na výhybce se zpruženými systémy upevnění	192
5.2.3	Výsledný návrh úprav do stávajících systémů upevnění vysokorychlostní výhybky	198
5.2.4	Závěr a doporučení pro uvedení do praxe	202
6	Laboratorní zkoušení systémů upevnění	203
6.1	Metodika zpracování	204
6.1.1	Předpisy stanovující metodiku zkoušení	205
6.1.2	Základní rozdíly mezi jednotlivými metodikami zkoušení	205
6.1.3	Metodika dle ČSN EN 13 146-9.....	208
6.2	Dosažené výsledky	212
6.2.1	Zkoušky nových podložek systému upevnění KSN 20	212
6.2.2	Zkoušky užitých podložek systému upevnění KSN 20	216
6.2.3	Diskuze výsledků laboratorního zkoušení	221
6.2.4	Výhled laboratorního zkoušení systémů upevnění vysokorychlostní výhybky.....	221
7	Souhrn výsledků	222
7.1	Stanovení zásad pro konstrukci výhybek vedoucích ke snížení dynamického namáhání.....	223
7.2	Přínos pro praxi	225
7.3	Přínos pro vědní obor	226
8	Závěr	227
9	Použitá literatura.....	228
10	Seznam zkratk	237
11	Seznam symbolů	239

12	Seznam obrázků.....	242
13	Seznam tabulek	249
14	Seznam příloh.....	251
15	Představení autora.....	253

1 ÚVOD

V současné době se čím dál více jak na odborných konferencích, tak v tisku zmiňuje výstavba vysokorychlostních tratí (dále i jako VRT) v České republice. V této souvislosti se dostávají stále častěji do popředí odlišné požadavky na konstrukci koleje i výhybek a výhybkových konstrukcí, než bývalo zvykem v minulosti. Vysokorychlostní výhybka musí splňovat mnoho kritérií, jelikož rychlosti v přímém směru se při vložení do vysokorychlostní trati předpokládají běžně 250 až 350 km.h⁻¹. [1-3]

Řešení problematiky konstrukce výhybek pro vysoké rychlosti je velmi obsáhlé, a tedy je možno se obecně zabývat mnoha dílčími oblastmi, mezi které mimo jiné patří:

- návrh geometrického uspořádání koleje v odbočné větvi výhybky;
- zabezpečení a ovládání výhybek;
- řešení kontaktní geometrie na styku kolo/kolejnice;
- řešení interakce vozidlo/kolej a kinematika jízdy vozidel;
- materiálové požadavky a odolnost pojezdných ploch;
- konstrukční řešení prvků výhybky s ohledem na nové technologie výroby;
- omezení dynamického namáhání z pohledu mechaniky železničních tratí.

V návaznosti na výše zmíněné oblasti směřuje v současné době mnoho konstrukčních úprav výhybek právě k poslední jmenovanému omezení dynamického namáhání z pohledu mechaniky železničních tratí. **Z tohoto hlediska je hlavní oblastí zájmu, která je obsažena v této disertační práci, optimalizace podélné tuhosti výhybek, resp. homogenizace tuhosti kolejové jízdní dráhy.** Se zvyšujícími se rychlostmi znamená jakákoliv, a to především náhlá, nehomogenita v podélné tuhosti výrazné zvýšení dynamického namáhání, které následně přispívá jak k výraznější a rychlejší degradaci prvků výhybky, tak rozpadu geometrických parametrů koleje (dále i jako GPK). [4, 5]

Ze všech konstrukcí železničního svršku se právě výhybky ve srovnání s běžnou kolejí vyznačují vyšší podélnou tuhostí konstrukce, která se po délce skokově mění, což je zapříčiněno výskytem mnoha dalších prvků, které se v běžné koleji nevyskytují, a mají na ztužení velký vliv. Do těchto ztužujících prvků můžeme zařadit především způsob podepření jazyků výhybek, které jsou standardně uloženy na tuhé kluzné desce. Dále také velkou roli z hlediska ohybové tuhosti hraje konstrukce srdcovky a přídržnice jako dodatečné kolejnice. Nemalou roli hraje také instalace přestavných zařízení a závěrových systémů, resp. instalace ocelových žlabových pražců. Svislou tuhost jízdní dráhy do jisté míry zvyšuje (oproti běžné koleji) také použití výhybkových pražců, obzvláště betonových, které jsou ve výhybkových konstrukcích

použity delší a robustnější, a tedy těžší než v běžné koleji, a současně měnící svoji délku po délce výhybky. [6–9]

Problémy s nehomogenní tuhostí kolejové jízdní dráhy ve výhybkách lze řešit několika způsoby. Nejběžnější jsou dva způsoby sjednocení tuhosti po délce výhybky. Prvním způsobem je zpružnění ložné plochy pražce pomocí podpražcových podložek. [5, 10–14] Tímto způsobem jsou zároveň významným způsobem chráněna zrna šterku kolejového lože, příznivěji se roznáší zatížení do kolejového lože celkově, což vede ke snižování napětí v kolejovém loži. Druhým způsobem úpravy tuhosti je zpružnění v systémech upevnění. [15–17] Od tohoto způsobu zpružnění se na naopak očekává v důsledku příznivějšího roznášení sil snížení opotřebení pojížděných ploch kolejnic, tedy jistá ochrana ocelových prvků. Oba způsoby zpružnění je možné použít i mimo výhybky, a to do míst v běžné koleji, kde je z nějakého důvodu nutné snížit tuhost jízdní dráhy.

V současné době je velmi aktuální řešení problematiky sjednocení tuhosti kolejové jízdní dráhy po délce výhybek, především těch vysokorychlostních. [18] Velmi je dbáno ze strany správců infrastruktury na snižování nákladů za údržbu a na dlouhou životnost výrobků, proto tyto úpravy mohou být velmi pozitivně vnímány zejména ze strany uživatelů. Omezení dynamického namáhání vznikajícího při průjezdu výhybkami bude mít pozitivní vliv nejen na infrastrukturu, ale také na vozidla, což se projeví mimo snížení nároků na údržbu vozidel také zvýšením komfortu cestujících při průjezdu přes optimalizovaná kolejová spojení a rozvětvení. Z těchto důvodů jsou v předkládané disertační práci řešeny dílčí kroky vedoucí ke sjednocení tuhosti kolejové jízdní dráhy ve vysokorychlostní výhybce. Tato problematika je velmi významná i pro budoucí aplikace výhybek na pevnou jízdní dráhu, která bude s připravovanou stavbou VRT velmi úzce spojena. Dosud (tj. do roku 2021) nebyla do sítě Správy železnic¹ ani Železnic Slovenskej Republiky² vložena žádná výhybka na pevné jízdní dráze a dosavadní vývoj zpružnění ve výhybkách a optimalizace tuhosti tak bude nedílnou součástí připravovaného vývoje výhybek určených pro aplikace na pevnou jízdní dráhu (dále i jako PJD). [19]

¹ Správa železnic, státní organizace – správce železniční infrastruktury v majetku ČR. V dokumentu dále i jako SŽ.

² Železnice Slovenskej republiky – správce železniční infrastruktury na Slovensku. Dále i pod oficiální zkratkou ŽSR.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

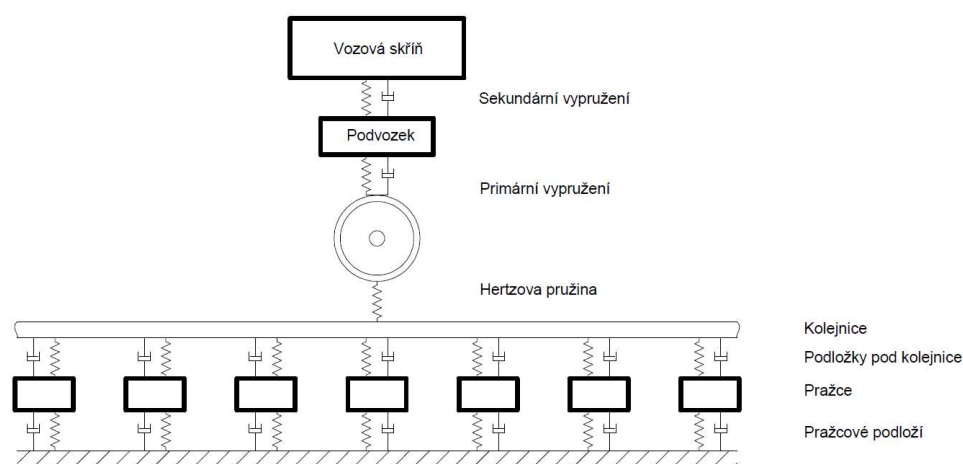
Dříve se při konstruování výhybek vůbec nebraly v potaz rozdíly v tuhosti kolejové jízdní dráhy po délce výhybky. Konstrukce uzlů upevnění vycházela především z vhodného upevnění kolejnice na pražec, funkce přestavování apod. [20–22] Je nutno ale říci, že dříve nebylo ani příliš potřeba detailně řešit problematiku sjednocení tuhosti po délce výhybky, jelikož rychlosti byly nízké, a tedy dynamické účinky vyplývající z nehomogenní tuhosti kolejové jízdní dráhy byly často zanedbatelné, resp. akceptovatelné. Před započítáním modernizace tranzitních železničních koridorů v ČR byly maximální provozní rychlosti, které umožňovala běžně pojížděná infrastruktura i vozidla, do 140 km.h⁻¹. Teprve až při zvyšování rychlostí v poslední době se dostává tato problematika do popředí zájmu i v České republice. [17]

Do přehledu současného stavu byly zahrnuty tři stěžejní kapitoly. První obsáhlou uvedenou kapitolou jsou teoretická východiska, kde jsou uvedeny poznatky související s řešenou problematikou. Zejména se jedná o matematický popis tuhosti kolejové jízdní dráhy a související základní principy mechaniky železničních tratí. Druhou a třetí navazující kapitolou je stav techniky v České republice, resp. v zahraničí, který shrnuje praktické poznatky z rešerší o aktuálních používaných systémech upevnění ve výhybkách, které mají modifikovanou tuhost kolejové jízdní dráhy, a také o konstrukcích železničního svršku, které umožňují modifikaci tuhosti jízdní dráhy. Kratší doplňkové kapitoly jsou následně věnovány materiálům pružných prvků používaných v konstrukci koleje a přehledu předpisových a normových požadavků na systémy upevnění.

2.1 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

2.1.1 Dynamické chování koleje

V souvislosti s uvažovaným budováním vysokorychlostních tratí v České republice se čím dál více dostává do popředí zájmu vliv dynamického namáhání konstrukce koleje. Se zvyšujícími rychlostmi se zvětšují dynamické účinky, které mají neblahý vliv jak na vozidla, tak na prvky konstrukce trati. [23, 24] Při zkoumání dynamického namáhání v železničním stavitelství je nutno uvažovat dynamickou soustavu včetně vozidel, jelikož vozidlo i kolej působí jako jeden celek. Můžeme tedy často při bližším zkoumání uvažovat dynamickou soustavu, která je uvedena na obrázku níže (obr. 1).

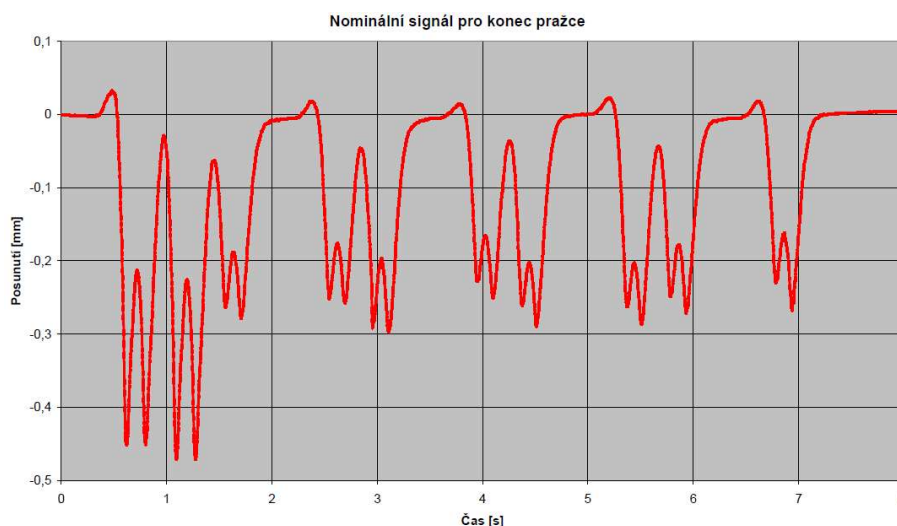


Obr. 1 Dynamická soustava vozidlo-kolej. [23]

V uvedeném schématu (obr. 1) je v horní části zjednodušený dynamický model vozidla a v dolní části zjednodušený dynamický model koleje. Obě části se stýkají na kontaktu kolo/kolejnice, kde uvažujeme Hertzovu pružinu. Charakteristika pružiny vychází z Hertzovy teorie o kontaktu dvou válcových ploch. [23] Kontaktní plocha mezi kolem a kolejnicí je velmi malá, obvykle jen málo přesahující 1 cm², a přenáší z vozidel do konstrukce koleje kolové zatížení (kolová síla). Rozložení normálového napětí je na kontaktu dle Hertzovy teorie ve tvaru poloviny elipsoidu. [23] Na vozidlech se zpravidla nacházejí 2 stupně vypružení. Primární vypružení je přímo mezi kolem a podvozkem, přičemž toto vypružení tlumí především vysoké frekvence vibrací vzniklé z nerovností a diskontinuit na pojížděné ploše kolejnic, tj. např. při průjezdu přes kolejnicové styky nebo pevné srdcovky výhybek. Sekundární vypružení vozidel následně tlumí nižší frekvence vznikající na větších vlnových délkách např. v důsledku zhoršeného stavu geometrických parametrů koleje (směr, podélná výška). [23, 25] Pod kolejnicemi se dále v modelu vyskytuje idealizovaná pružina a tlumič, které zastupují charakteristiky pružných prvků v systému upevnění. Jedná se nejčastěji o podložky pod patu kolejnice, případně o speciální podložky ve zpružených systémech upevnění, což může být např. pružná podložka pod podkladnici. Pod pražcem se následně nachází prostor označovaný jako pražcové podloží, který má rovněž své dynamické charakteristiky a který se skládá z několika vrstev. Bezprostředně pod pražci se vyskytuje štěrk kolejového lože (uvažujeme-li klasickou konstrukce koleje); pod kolejovým ložem může být zřízena konstrukční vrstva a pod konstrukční vrstvou je samotné zemní těleso. Zemní těleso může být nahrazeno i stavbou železničního spodku (např. mostem). Všechny části modelu mají své charakteristiky, které se mohou lišit. Z hlediska dynamiky jsou nejdůležitějšími charakteristikami kolová síla, hmotnost, modul pružnosti a parametry tuhosti a tlumení jednotlivých prvků. Tyto parametry se mohou na různých typech železničního svršku výrazně lišit a rovněž se liší v běžné koleji a ve výhybkách a výhybkových konstrukcích. [23, 25]

2.1.2 Průhyb jako vyjádření tuhosti kolejové jízdní dráhy

Nejvhodnějším způsobem, jak zkoumat a navrhovat tuhost kolejové jízdní dráhy, je pomocí hodnoty svislého posunutí při zatížení. Tato veličina je relativně dobře měřitelná v trati, lze ji spočítat analyticky a je také možné ji zkoumat jako výstup výpočtového modelování. Svislé posunutí – průhyb koleje – lze v trati měřit na pražcích i na kolejnicích. Ukázka takového výstupu je uvedena na následujícím grafu (obr. 2). Z něj jsou patrné jednotlivé nápravy, které jsou charakterizovány extrémními poklesovými křivkami. Jsou tedy rozeznatelné jednotlivé vozy vlaku, první 4 výrazně větší špičky odpovídají lokomotivě (nejtěžší vozidlo soupravy) a následuje 16 lokálních extrémů o přibližně stejné hodnotě, které odpovídají nápravám jednotlivých osobních vozů (celkem 4 vozy). Z grafu je také vidět, že druhá náprava podvozku vykazuje obvykle větší průhyb, který je dán superpozicí dvou průhybových křivek v těsné blízkosti.



Obr. 2 Poklesová křivka měřená na konci pražce (hlavě pražce) při průjezdu vlaku. [26]

Existují dva základní přístupy, kterými se lze průhybu kolejnice dopočítat. V prvním případě lze použít tradiční analytické modely, které lépe nebo hůře (resp. jednodušeji nebo složitěji) popisují kolej. Dále je možno použít výpočtové modelování a numerické metody, např. software ANSYS pracující na principu metody konečných prvků, kterým lze v současné době velmi dobře dopočítat průhyby a tuhosti nejen běžné koleje, ale i konstrukčně složitějších výhybek, které mají oproti běžné koleji mnohem složitější chování z hlediska mechaniky železničních tratí. Softwarové výpočtové modelování je v současné době velmi vhodným nástrojem už z toho důvodu, že při konstrukčním zpracování se velmi často vytvářejí 3D modely (také dále viz kap. 5.1.1), a to jak jednotlivých konstrukčních součástí, tak celých výhybek. Tyto 3D modely lze následně snadno importovat do různých výpočetních softwarů, např. do sw. ANSYS, a podrobit konstrukční prvek požadované analýze.

Při řešení chování výhybky pomocí výpočtového modelování, resp. řešení návrhu zpružnění ve výhybkách, je vhodné porovnat výsledky výpočtu pomocí analytických metod, kterými lze průhyb (resp. další nezbytné související veličiny vč. tuhosti) přibližně spočítat. Základní rozdělení známých analytických modelů je následující [23, 27–31]:

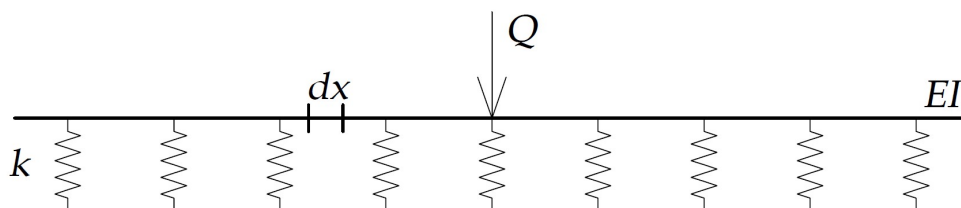
- Winklerovo podloží, výpočet dle Timošenka (resp. Zimmermanna) – statická soustava;
- Pasternakovo podloží, Pasternakův model – statická soustava;
- Dvouvrstvý systém – statická soustava;
- Winklerovo podloží, řešení dle Frýby – dynamická soustava.

Jeden z nejznámějších možných teoretických modelů, jakými lze spočítat průhyb koleje pod zatížením ve statickém případě, je řešení prutu na pružném podloží dle Timošenka (resp. aplikace na kolej dle Zimmermanna). V tomto případě je uvažován Winklerův model podloží (podrobně viz kap. 2.1.3). Druhým známým modelem, který o něco lépe vystihuje reálné chování koleje zavedením smykových sil do statické soustavy, je model podloží dle Pasternaka (kap. 2.1.5). Dalším stupněm je modelování dvouvrstvého systému, jehož řešení se stává již složitější. Vzhledem k obvyklejšímu zkoumání vlivu pohybujících se vozidel (nikoliv stojících) je nejvhodnější zkoumat dynamickou soustavu se zavedením pohybující se síly a se zahrnutím dynamického vlivu. [23, 25] Při řešení dynamické soustavy lze aplikovat postup výpočtu dle Frýby (kap. 2.1.6). [30, 31]

2.1.3 Výpočet průhybu dle Timošenka na Winklerově modelu podloží

2.1.3.1 Definice problému řešení

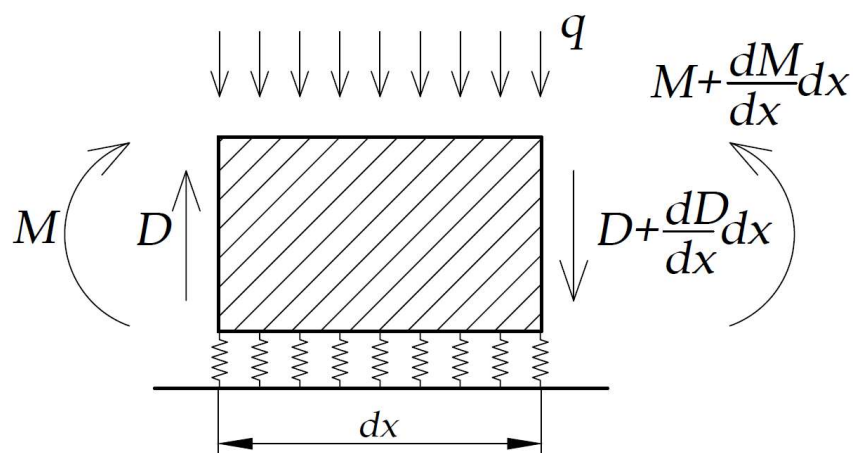
V této kapitole je popsán postup výpočtu průhybu obecně nejjednodušším způsobem. Model je v podstatě nosník uložený na pružném (Winklerově) poloprostoru. Tento model obsahuje dva nekonečně dlouhé rovnoběžné pruty (viz schéma na obr. 3), přičemž jeden zastupuje kolejnici a druhý tuhé podloží. Oba pruty jsou spojeny spojitou soustavou pružin, charakterizovanou spojitou tuhostí k . Každá z těchto pružin v tomto modelu působí samostatně (není zde uvažováno žádné spolupůsobení). V uvedeném modelu je rovněž zanedbán vliv vodorovných reakcí působících na kolejnici.



Obr. 3 Nekonečně dlouhý prut uložený spojitě na pružném podloží (Winkler).

2.1.3.2 Sestavení diferenciální rovnice

Pro odvození průhybu w [m] a ohybového momentu M [N.m] je zapotřebí vyjít z diferenciálního elementu o délce dx , na kterém jsou určeny veškeré síly působící na tento diferenciální element, viz obr. 4.



Obr. 4 Působení sil na element Timošenkova modelu.

Jak je ze schématu patrné, na element délky dx je uvažováno působení spojitěho zatížení q [N.m⁻¹]. Dále je zde uvažována spojitá tuhost k [N.m⁻²], resp. $k \cdot 10^{-6}$ [kN.mm⁻¹.m⁻¹], a kolejnice o ohybové tuhosti EI (E [Pa], I [m⁴]). Dále jsou v modelu vyjádřeny vnitřní síly působící na element zprava a zleva, tzn. posouvající síla D (zleva) a posouvající síla $D + \frac{dD}{dx} dx$ (zprava, tzn. posouvající síla zleva plus směrnice přímky a její derivace) a analogicky ohybový moment M . Jakmile máme určeny vnitřní síly, může se začít psát **základní silová podmínka rovnováhy**:

$$\begin{aligned}
 D - \left(D + \frac{dD}{dx} dx \right) + k \cdot w \cdot dx - q \cdot dx &= 0 \\
 -\frac{dD}{dx} dx + k \cdot w \cdot dx - q \cdot dx &= 0 \quad \left| \cdot \frac{1}{dx} \right. \\
 -\frac{dD}{dx} + k \cdot w - q &= 0 \quad \left| + \frac{dD}{dx} \right. \\
 \frac{dD}{dx} &= k \cdot w - q
 \end{aligned} \tag{1}$$

Výslednou silovou podmínku není možno v tomto stavu řešit, proto bude dále užita **momentová podmínka rovnováhy**:

$$\begin{aligned} M - \left(M + \frac{dM}{dx} dx \right) + D \cdot dx &= 0 \\ -\frac{dM}{dx} dx + D \cdot dx &= 0 \quad \Big| \cdot \frac{1}{dx} \\ -\frac{dM}{dx} + D &= 0 \quad \Big| + \frac{dM}{dx} \\ \frac{dM}{dx} &= D \end{aligned} \quad (2)$$

Vložením upraveného vztahu (2) do upraveného vztahu silové podmínky rovnováhy (1) vznikne vztah:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = k \cdot w - q \quad (3)$$

V dalším kroku je zapotřebí začít pracovat s ohybovou tuhostí a průhybem. Proto bude použit vztah vycházející z teorie pružnosti pro ohybový moment vyjádřený ohybovou tuhostí a křivostí (zakřivením) prutu. Následně lze dosadit za křivost prutu κ druhou derivaci průhybu:

$$M = -EI \cdot \kappa = -EI \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (4)$$

Nyní je tedy možno do výsledného vztahu (3) vložit vyjádření ohybového momentu z rovnice (4), tedy:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + k \cdot w = q \quad (5)$$

čímž vznikla **výsledná diferenciální rovnice**. Jedná se konkrétně o nehomogenní diferenciální rovnici lineární, kterou je třeba vhodným způsobem analyticky vyřešit a již výsledkem bude vyjádření průhybu a ohybového momentu.

2.1.3.3 Řešení diferenciální rovnice

V následující části je proveden rozbor řešení diferenciální rovnice. Jak již bylo výše uvedeno, jedná se o nehomogenní diferenciální rovnici 4. řádu. Aby bylo možno rovnici řešit, bude nezbytné v první řadě převést rovnici na homogenní diferenciální rovnici, a to definicí okrajových podmínek. Následnému snazšímu řešení také přispěje skutečnost, že se jedná o lineární rovnici. Výsledkem řešení, tedy řešenou neznámou, je průhyb w .

Nejprve bude zavedena okrajová podmínka hovořící o tom, že spojitě zatížení q bude rovno 0, což vychází ze skutečnosti, že diferenciální element není zatížen spojitou silou q , ale osamělým břemenem Q (kolová síla):

$$q = 0; Q \quad (6)$$

Tím bude získána zjednodušená homogenní diferenciální rovnice, kterou lze již jednodušeji řešit, a to ve tvaru:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + k \cdot w = 0 \quad (7)$$

Nyní je nutno převést diferenciální rovnici na algebraickou; předpokládá se řešení ve tvaru:

$$w = e^{\gamma x}, \quad (8)$$

čímž se dostane:

$$\begin{aligned} EI \cdot \gamma^4 e^{\gamma x} + k \cdot e^{\gamma x} &= 0 \quad \Big| \cdot \frac{1}{e^{\gamma x}} \\ EI \cdot \gamma^4 + k &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

V dalším kroku je potřeba vyjádřit γ^4 . Na pravé straně vznikne odmocnina ze záporného čísla, což zkomplikuje řešení:

$$\gamma^4 = -\frac{k}{EI} \quad (10)$$

proto se zavede substituce ve tvaru:

$$\lambda^4 = \frac{k}{4EI} \quad (11)$$

Vztah (9) lze nyní vydělit ohybovou tuhostí EI, aby bylo možno dosadit substituci (11):

$$\begin{aligned} EI \cdot \gamma^4 + k &= 0 \quad \Big| \cdot \frac{1}{EI} \\ \gamma^4 + \frac{k}{EI} &= 0 \\ \gamma^4 + 4\lambda^4 &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

přičemž substituce λ má názorné vyjádření v převrácené hodnotě, proto se používá pro běžné výpočty tzv. charakteristická délka kolejového roštu:

$$L = \frac{1}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \quad (13)$$

Řešení rovnice (12) je nutno hledat v oboru komplexních čísel $\gamma \in \mathbb{C}$. Z tohoto důvodu budou celkem 4 řešení neznámé γ . Vztah se v dalším kroku upraví a zavede se imaginární jednotka:

$$\gamma^4 + 4\lambda^4 = \gamma^4 + (2\lambda^2)^2 = \gamma^4 - i^2(2\lambda^2)^2 \quad (14)$$

Nyní bude výsledný vztah z předchozího kroku (14) upraven na polynom:

$$\begin{aligned}
 \gamma^4 - i^2(2\lambda^2)^2 &= (\gamma^2 - i \cdot 2\lambda^2)(\gamma^2 + i \cdot 2\lambda^2) = \\
 &= (\gamma^2 + \lambda^2 - i \cdot 2\lambda^2 - \lambda^2)(\gamma^2 + \lambda^2 + i \cdot 2\lambda^2 - \lambda^2) = \\
 &= (\gamma^2 + (\lambda - i \cdot \lambda)^2)(\gamma^2 + (\lambda + i \cdot \lambda)^2) = \\
 &= (\gamma^2 - i^2(\lambda - i \cdot \lambda^2))(\gamma^2 - i^2(\lambda + i \cdot \lambda^2)) = \\
 &= (\gamma + i(\lambda - i \cdot \lambda))(\gamma - i(\lambda - i \cdot \lambda))(\gamma - i(\lambda + i \cdot \lambda))(\gamma + i(\lambda + i \cdot \lambda))
 \end{aligned} \tag{15}$$

Jelikož je potřeba, aby se výsledný vztah rovnal 0, každý z členů součinu může být roven 0 a vzniknou tedy celkem 4 řešení:

$$\begin{aligned}
 \gamma_1 &= \lambda + i \cdot \lambda \\
 \gamma_2 &= \lambda - i \cdot \lambda \\
 \gamma_3 &= -\lambda - i \cdot \lambda \\
 \gamma_4 &= -\lambda + i \cdot \lambda
 \end{aligned} \tag{16}$$

Vzhledem k tomu, že hledané řešení je ve tvaru rovnice (8) a kořeny obsahují imaginární jednotku, je nutné vyjádřit obecné řešení, které bude lineární kombinací s konstantami A_i , tedy:

$$w = A_1 \cdot e^{\gamma_1 x} + A_2 \cdot e^{\gamma_2 x} + A_3 \cdot e^{\gamma_3 x} + A_4 \cdot e^{\gamma_4 x} \tag{17}$$

Za neznámé γ se může v dalším kroku dosadit dle výsledku (16) a následně provést úpravu, tedy:

$$\begin{aligned}
 w &= A_1 \cdot e^{(\lambda+i\cdot\lambda)x} + A_2 \cdot e^{(\lambda-i\cdot\lambda)x} + A_3 \cdot e^{(-\lambda-i\cdot\lambda)x} + A_4 \cdot e^{(-\lambda+i\cdot\lambda)x} \\
 w &= A_1 \cdot e^{\lambda x} \cdot e^{i\lambda x} + A_2 \cdot e^{\lambda x} \cdot e^{-i\lambda x} + A_3 \cdot e^{-\lambda x} \cdot e^{-i\lambda x} + A_4 \cdot e^{-\lambda x} \cdot e^{i\lambda x}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Nyní je možno s využitím Eulerova vzorce $e^{ix} = \cos x + i \cdot \sin x$, což umožní převést mocniny s imaginární jednotkou na goniometrické funkce. Cílem je sloučit dohromady členy, ve kterých se vyskytuje konstanta A :

$$\begin{aligned}
 w &= A_1 \cdot e^{\lambda x} \cdot (\cos \lambda x + i \cdot \sin \lambda x) + A_2 \cdot e^{\lambda x} \cdot (\cos \lambda x - i \cdot \sin \lambda x) + A_3 \cdot e^{-\lambda x} \cdot (\cos \lambda x - i \cdot \sin \lambda x) + A_4 \cdot e^{-\lambda x} \cdot (\cos \lambda x + i \cdot \sin \lambda x) \\
 w &= e^{\lambda x} \cdot (A_1 \cdot \cos \lambda x + A_1 \cdot i \cdot \sin \lambda x + A_2 \cdot \cos \lambda x - A_2 \cdot i \cdot \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} \cdot (A_3 \cdot \cos \lambda x - A_3 \cdot i \cdot \sin \lambda x + A_4 \cdot \cos \lambda x + A_4 \cdot i \cdot \sin \lambda x)
 \end{aligned} \tag{19}$$

V dalším kroku se zavedou nové konstanty B_i , konkrétně:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= A_1 + A_2 \\
 B_2 &= (A_1 + A_2) \cdot i \\
 B_3 &= A_3 + A_4 \\
 B_4 &= (A_4 - A_3) \cdot i
 \end{aligned} \tag{20}$$

a dosadí se do vztahu (19), čímž se dostane:

$$w = e^{\lambda x} \cdot (B_1 \cdot \cos \lambda x + B_2 \cdot \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} \cdot (B_3 \cdot \cos \lambda x + B_4 \cdot \sin \lambda x) \quad (21)$$

Tímto byly eliminovány imaginární jednotky. Vzhledem k tomu, že je ale tato úprava pouze formální bez pokroku v řešení, lze si dále pomoci zavedením okrajových podmínek, aby bylo možné určit konstanty B_i .

Při zavádění okrajových podmínek se vyjde ze znalosti tvaru funkce průhybové křivky. Je tedy známo, že:

1. funkce je symetrická;

2. průhyb v nekonečnu je roven 0, tedy:

$$w(\infty) = 0; \quad (22)$$

3. lokální extrém bude pod působišťem kolové síly:

$$\frac{dw}{dx}(0) = 0; \quad (23)$$

4. zavedení kolové síly Q (vychází z teorie pružnosti):

$$\frac{d^3w}{dx^3}(0) = \frac{Q}{2EI}. \quad (24)$$

Nejprve se bude řešit okrajová podmínka dle vztahu (22). Když se posoudí problém dle vztahu (21), lze dojít k závěru, že je problém možno zredukovat velmi rychle. Vzhledem k tomu, že člen $e^{-\lambda x}$ je vždy roven 0, je pak zapotřebí, aby konstanty B_1 a B_2 byly také rovny 0, tedy:

$$B_1 = B_2 = 0; \quad (25)$$

po dosazení se tedy dostane vztah:

$$w = e^{-\lambda x} \cdot (B_3 \cdot \cos \lambda x + B_4 \cdot \sin \lambda x) \quad (26)$$

V dalším kroku bude řešena okrajová podmínka dle vztahu (23). První derivace průhybu podle x v bodě 0 je rovna 0. Bude tedy pro dosazení potřeba první derivace funkce (21), tedy:

$$\frac{dw}{dx} = \lambda \cdot e^{-\lambda x} \cdot (B_3 \cdot \cos \lambda x + B_4 \cdot \sin \lambda x) + \lambda \cdot e^{-\lambda x} \cdot (-B_3 \cdot \sin \lambda x + B_4 \cdot \cos \lambda x) \quad (27)$$

a po dosazení za $x = 0$ je možno psát vztah:

$$\frac{dw}{dx}(0) = -\lambda \cdot (B_3) + \lambda \cdot B_4 \quad (28)$$

a z toho vyplývá:

$$B_3 = B_4 \quad (29)$$

a tedy v dalších derivacích lze uvažovat pro zjednodušení pouze konstantu B_3 .

Pro aplikaci okrajové podmínky podle vztahu (24) bude potřeba zjistit 3. derivaci. Začne se výpočtem druhé derivace, tedy:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 w}{dx^2} &= +\lambda^2 \cdot e^{-\lambda x} \cdot (B_3 \cdot \cos \lambda x + B_4 \cdot \sin \lambda x) - \lambda^2 \cdot e^{-\lambda x} \\ &\quad \cdot (-B_3 \cdot \sin \lambda x + B_4 \cdot \cos \lambda x) - \lambda^2 \cdot e^{-\lambda x} \\ &\quad \cdot (-B_3 \cdot \sin \lambda x + B_4 \cdot \cos \lambda x) + \lambda^2 \cdot e^{-\lambda x} \\ &\quad \cdot (-B_3 \cdot \cos \lambda x - B_4 \cdot \sin \lambda x) \\ &= -2 \cdot \lambda^2 \cdot e^{-\lambda x} (-B_3 \cdot \sin \lambda x + B_4 \cdot \cos \lambda x) \end{aligned} \quad (30)$$

Po obdržení druhé derivace lze přistoupit k výpočtu třetí derivace:

$$\begin{aligned} \frac{d^3 w}{dx^3} &= 2 \cdot \lambda^3 \cdot e^{-\lambda x} (-B_3 \cdot \sin \lambda x + B_4 \cdot \cos \lambda x) - 2 \\ &\quad \cdot \lambda^3 \cdot e^{-\lambda x} (-B_3 \cdot \cos \lambda x - B_4 \cdot \sin \lambda x) \end{aligned} \quad (31)$$

Nyní lze dosadit dle okrajové podmínky:

$$\frac{d^3 w}{dx^3}(0) = 2 \cdot \lambda^3 \cdot B_4 + 2 \cdot \lambda^3 \cdot B_3 = \frac{Q}{2EI} \quad (32)$$

V dalším kroku se vyjádří konstanta B_3 při znalosti vztahu (25) a (29):

$$\begin{aligned} 4 \cdot \lambda^3 \cdot B_3 &= \frac{Q}{2EI} \\ B_3 &= \frac{Q}{8 \cdot EI \cdot \lambda^3} \end{aligned} \quad (33)$$

čímž byly dopočítány všechny neznámé konstanty B_i a lze dosadit zpět do rovnice pro průhyb (21):

$$w = \frac{Q}{8 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot e^{-\lambda x} \cdot (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (34)$$

Po zavedení relativní souřadnice ξ :

$$\xi = \frac{x}{L} = x \cdot \lambda; L = \frac{1}{\lambda}; \quad \eta = e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi) \quad (35)$$

se může zjednodušeně vyjádřit průhyb jako:

$$w(x) = \frac{Q \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot I} \cdot e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi) = \frac{Q \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot I} \cdot \eta(\xi) \quad (36)$$

což je výsledná rovnice pro průhyb.

2.1.3.4 Ohybový moment

Podle vztahu (4) se lze dopočítat ohybového momentu. Pro dosazení je potřeba znát druhou derivaci průhybu, která byla dopočítána v průběhu předchozího řešení, tj. vztah (30). Do tohoto vztahu se pouze dosadí za neznámé koeficienty B_3 a B_4 při známosti vztahu (29) a (33).

Dostane se tedy vztah:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -2 \cdot \lambda^2 \cdot e^{-\lambda x} \cdot \frac{Q}{8 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot (-\sin \lambda x + \cos \lambda x) \quad (37)$$

po dosazení do vztahu (4):

$$M = \frac{(-EI) \cdot (-2) \cdot \lambda^2 \cdot e^{-\lambda x} \cdot Q}{8 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot (-\sin \lambda x + \cos \lambda x) \quad (38)$$

$$M = \frac{Q}{4 \cdot \lambda} \cdot e^{-\lambda x} \cdot (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$$

a po zavedení relativní souřadnice ξ :

$$\xi = \frac{x}{L} = x \cdot \lambda; L = \frac{1}{\lambda}; \mu = e^{-\xi}(\cos \xi - \sin \xi) \quad (39)$$

lze psát výsledný vzorec pro **ohybový moment**:

$$M = \frac{Q \cdot L}{4} \cdot e^{-\xi} \cdot (\cos \xi - \sin \xi) = \frac{Q \cdot L}{4} \cdot \mu(\xi) \quad (40)$$

2.1.4 Vztahy související s tuhostí

V této kapitole je rozveden vliv tuhosti na namáhání žel. svršku. Níže jsou odvozeny průhyb koleje, tuhost koleje, spojitá svislá tuhost koleje, tuhost připadající na uzel upevnění, reakce na uzel upevnění, ohybový moment a tuhost podloží a tuhost na pražec. Tato odvození vycházejí z literatury [32].

Vyjde se z předchozího odvození rovnic v modelu podle Timošenka. Pro další odvození bude použita rovnice pro charakteristickou délku L , která bude umocněna na čtvrtou mocninu, což je tvar připravený pro další použití:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} [\text{m}] \quad \left| L^4 = \frac{4EI}{k} = \frac{1}{\lambda^4} \right. \quad (41)$$

dále bude potřeba rovnice pro průhyb:

$$w(x) = \frac{Q \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot I} \cdot e^{-\xi}(\cos \xi + \sin \xi) = \frac{Q \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot I} \cdot \eta(\xi) \quad (42)$$

kde:

$$\xi = \frac{x}{L}, \eta = e^{-\xi}(\cos \xi + \sin \xi) \quad (43)$$

Dále je nutné vyjádřit souvislost mezi koeficienty λ a ω . Pro dodržení označení vycházející z dokumentů [33, 34], bude dále pro označení koeficientu λ použito koeficientu ω , tedy:

$$\omega^4 = \frac{k}{4EI}, \lambda^4 = \frac{4}{4EI}, \omega = \lambda\sqrt{2} = \frac{\sqrt{2}}{L} \quad (44)$$

V dalším kroku se upraví rovnice pro průhyb (42), do které se nejprve dosadí za L^3 upravený vztah z rovnice (41) a dále upravený vztah za L z rovnice (44), tedy:

$$w(x) = \frac{Q \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot I} \cdot \eta(\xi) = \frac{Q}{2 \cdot k \cdot L} \cdot \eta(\xi) = \frac{Q \cdot \omega}{2\sqrt{2} \cdot k} \cdot \eta(\xi) \quad (45)$$

Nyní se bude uvažovat rovnice pro maximální průhyb, který nastane při $\eta(0) = 1$, může se tedy psát rovnice pro **maximální průhyb** ve tvaru:

$$w_{max} = \frac{Q \cdot \omega}{2\sqrt{2} \cdot k} \quad (46)$$

2.1.4.1 Výpočet svislé tuhosti koleje na kolejnici

Svislá tuhost koleje na kolejnici je označována jako c_T a je vyjadřována v jednotkách $[N \cdot m^{-1}]$, popřípadě častěji jako $[kN \cdot mm^{-1}]$. Tuto veličinu je nutno chápat jako abstraktní – nikde ji nelze v modelu použít jako reálnou hodnotu tuhosti pružiny. Tato veličina slouží pouze jako prostředek umožňující přepočet jednotlivých veličin. Tuhost koleje na kolejnici je tedy elementárně definována jako:

$$c_T = \frac{Q}{w_{max}} [N \cdot m^{-1}], [kN \cdot mm^{-1}] \quad (47)$$

Vztah (47) lze dále upravit použitím vztahu (46), tedy:

$$c_T = \frac{Q \cdot 2\sqrt{2} \cdot k}{Q \cdot \omega} = \frac{2\sqrt{2} \cdot k}{\omega} \quad (48)$$

Dále je do vztahu (47) dosazen upravený vztah pro koeficient ω tak, aby byla ve výsledném vzorci obdržena ohybová tuhost.

$$c_T = \frac{2\sqrt{2} \cdot k}{\omega} = \frac{2\sqrt{2} \cdot k \cdot (EI)^{1/4}}{k^{1/4}} = 2\sqrt{2} \cdot k^{3/4} \cdot (EI)^{1/4} \quad (49)$$

Vztah (49) umožňuje přepočet přímé ohybové tuhosti na svislou tuhost koleje. Jak je vidět z rovnice, závislost ohybové tuhosti na svislé tuhosti koleje je silně nelineární. Podle vztahu (47) je možné ihned spočítat průhyb, je-li známa tuhost koleje. Vztahy lze uplatnit i opačným způsobem. Může se spočítat konstanta tuhosti k , je-li znám průhyb, svislá tuhost koleje a ohybová tuhost, tedy:

$$\begin{aligned}
c_T &= 2\sqrt{2} \cdot k^{\frac{3}{4}} \cdot (EI)^{\frac{1}{4}} \quad |^{4/3} \\
c_T^{4/3} &= 2^{4/3} \cdot 2^{4/12} \cdot k \cdot (EI)^{1/3} \quad | /k \cdot c_T^{4/3} \\
k &= \frac{c_T^{4/3}}{4 (EI)^{1/3}}
\end{aligned} \tag{50}$$

čímž je k dispozici vztah, kterým se lze dopočítat konstanty k , bude-li známa kolová síla a průhyb. [33, 34]

2.1.4.2 Tuhost připadající na uzel upevnění

Pokud se bude počítat tuhost na uzel upevnění c_{tot} (totální), jedná se již, oproti svislé globální tuhosti koleje c_T , o konkrétní tuhost, kterou si lze představit v modelu jako tuhost pružiny nahrazující tuhost podložky pod patu kolejnice. Vyjde se tedy ze vztahu:

$$c_{tot} = \frac{R_s}{w_{max}} [N \cdot m^{-1}], \tag{51}$$

kde R_s je reakce připadající na konkrétní uzel upevnění (rail seat force). Rozdíl oproti předchozím případům je v tom, že zde zatím není známa síla R_s . Bude se tedy ve výpočtu pokračovat vztahem:

$$k = \frac{c_{tot}}{a} [N \cdot m^{-2}]; c_{tot} = k \cdot a, \tag{52}$$

kde a je hodnota osové vzdálenosti pražců (rozdělení pražců). V dalším korku se vezme vyjádření spojitě tuhosti k ze vztahu (50) a je položena rovno vztahu (52), čímž se dostaneme:

$$\frac{c_{tot}}{a} = \frac{c_T^{\frac{4}{3}}}{4 (EI)^{\frac{1}{3}}}; c_{tot} = \frac{c_T^{\frac{4}{3}} \cdot a}{4 (EI)^{\frac{1}{3}}} \tag{53}$$

Předchozí vztah (53) lze používat i pomocí vyjádření globální svislé tuhosti c_T , tedy:

$$\begin{aligned}
\frac{c_{tot}}{a} &= \frac{c_T^{\frac{4}{3}}}{4 (EI)^{\frac{1}{3}}}; c_T^{\frac{4}{3}} = \frac{c_{tot} \cdot 4 (EI)^{\frac{1}{3}}}{a} \\
c_T &= \frac{c_{tot}^{3/4} \cdot 4^{3/4} (EI)^{\frac{3}{12}}}{a^{3/4}} = 2\sqrt{2} \cdot a^{-3/4} \cdot (EI)^{\frac{1}{4}}
\end{aligned} \tag{54}$$

Globální svislá tuhost se tedy dá spočítat jen ze znalosti vzdálenosti pražců a ohybové tuhosti. Z toho lze následně spočítat i tuhost připadající na uzel upevnění. [33, 34]

2.1.4.3 Reakce na uzel upevnění

Je-li uvažována spojitá tuhost k , lze vyjádřit spojitou reakci jako:

$$r = k \cdot w [N \cdot m^{-1}] \quad (55)$$

Pokud se bude uvažovat tuhost připadající na uzel upevnění c_{tot} , lze analogicky ze vztahu (51) vyjádřit reakci na uzel upevnění:

$$R_s = c_{tot} \cdot w_{max} \quad (56)$$

Je-li následně dosazen za c_{tot} vztah (52), může se předchozí vztah rozepsat jako:

$$R_s = k \cdot a \cdot w_{max} [N] \quad (57)$$

Po dosazení maximálního průhybu je nakonec obdržén vztah:

$$R_s = k \cdot a \cdot \frac{Q}{2 \cdot k \cdot L} = \frac{Q \cdot a}{2L} [N] \quad (58)$$

Pokud by bylo potřeba vzorec rozepsat dosazením ohybové tuhosti a globální svislé tuhosti, i to je možné jako:

$$R_s = a \cdot \frac{c_T^{4/3}}{4(EI)^{1/3}} \cdot \frac{Q}{c_T} = \frac{Q \cdot a \cdot c_T^{1/3}}{4(EI)^{1/3}} \quad (59)$$

přičemž u tohoto vyjádření je výhodou, že lze reakci spočítat ze znalosti globální svislé tuhosti a ohybové tuhosti. Motivací pro použití tohoto vztahu mohou být výstupy z měření. Obvykle je možné změřit kolovou sílu a průhyb na hlavě kolejnice. Dále lze psát následující vztah:

$$R_s = a \cdot k \cdot \frac{Q \cdot k^{\frac{1}{4}}}{k \cdot 2\sqrt{2} \cdot (EI)^{\frac{1}{4}}} = \frac{Q \cdot a \cdot \left(\frac{c_{tot}}{a}\right)^{1/4}}{2\sqrt{2} \cdot (EI)^{\frac{1}{4}}} \quad (60)$$
$$R_s = \frac{Q \cdot a^{3/4} \cdot c_{tot}^{1/4}}{2\sqrt{2} \cdot (EI)^{\frac{1}{4}}}$$

který je použitelný, jestliže je znám tvar použité kolejnice a jestliže je cílem dopočítat sílu působící na uzel upevnění, která při měření není známa. [33, 34]

2.1.4.4 Ohybový moment

Při odvozování ohybového momentu přes svislé tuhosti se vyjde z odvození ohybového momentu dle Timošenska:

$$M(x) = \frac{Q \cdot L}{4} \cdot e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi) = \frac{Q \cdot L}{4} \cdot \mu(x) \quad (61)$$

Analogicky jako pro maximální průhyb, nastane maximální ohybový moment, když pořadnice příčinkové čáry $\mu(0) = 1$, tedy:

$$M_{max} = \frac{Q \cdot L}{4} = \frac{Q}{2\sqrt{2} \cdot \omega} \quad (62)$$

Dále je možno vztah rozepsat dosazením za ω ze vztahu (44), je tedy získán ekvivalentní vzorec jako pro reakci na uzel upevnění (59):

$$\begin{aligned} M_{max} &= \frac{Q \cdot (EI)^{\frac{1}{4}}}{2\sqrt{2} \cdot k^{\frac{1}{4}}} = \frac{Q \cdot (EI)^{\frac{1}{4}} \cdot 4^{\frac{1}{4}} \cdot (EI)^{\frac{1}{4}}}{2 \cdot 2^{\frac{1}{2}} \cdot c_T^{\frac{4}{3}}} = \\ &= \frac{Q \cdot (EI)^{\frac{1}{3}}}{2 \cdot c_T^{\frac{1}{3}}} \end{aligned} \quad (63)$$

Nakonec lze dosazením do předchozí rovnice získat ekvivalentní rovnici ke vztahu (60) s použitím celkové tuhosti:

$$M_{max} = \frac{Q \cdot (EI)^{\frac{1}{4}}}{2\sqrt{2} \cdot k^{\frac{1}{4}}} = \frac{Q \cdot a^{\frac{1}{4}} \cdot (EI)^{\frac{1}{4}}}{2\sqrt{2} \cdot c_{TOT}^{\frac{1}{4}}} \quad (64)$$

2.1.4.5 Tuhost podloží a tuhost na pražec

Celková tuhost c_{tot} je velmi často k dispozici, proto je výše uvedený vztah (64) dobře použitelný pro výpočet ohybového momentu. Pokud se vezme v potaz model vč. systému upevnění, je vidět, že jsou v něm dvě pružiny nad sebou. Nahoře zobrazená pružina zastupuje tuhost podložky pod patu kolejnice c_t [N.mm⁻¹] (první tuhost), která se obvykle pohybuje v hodnotě kolem 200 kN.mm⁻¹. Pružina zakreslená v modelu dole je pak tuhost c_u [N.m⁻¹] (druhá tuhost), která zastupuje tuhost podloží. Tuhost podloží je počítána obvykle ze součinitele ložnosti (nebo plošné tuhosti) C [N.mm⁻³], tedy:

$$c_u = C \cdot F, \quad (65)$$

kde F je plocha ložné plochy pražce, která připadá na příslušnou kolejnici; obvykle plocha vymezená půlkou délky pražce a šířkou pražce, tzn.:

$$F = 1,10 \cdot (\text{š. pražce}) = 0,35 \text{ až } 0,45 \text{ m}^2. \quad (66)$$

Součinitel ložnosti C je parametr, který se obvykle udává v jednotce $[\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}]$, což odpovídá jednotce $[\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1}]$, která je lépe představitelná. Modul ložnosti lze pak vyjádřit rovněž následujícím vztahem za pomoci napětí P a posunutí w :

$$C[\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1}][\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}] = \frac{P[\text{MPa}][\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]}{w[\text{mm}]} \quad (67)$$

Celkovou tuhost lze pak spočítat i součtem paralelně zapojených pružin, tedy součtem převrácených hodnot tuhostí:

$$\frac{1}{c_{tot}} = \frac{1}{c_t} + \frac{1}{c_u} \Rightarrow c_{tot} = \frac{c_t \cdot c_u}{c_t + c_u} \quad (68)$$

Zajímavý je i případ, v němž by bylo uvažováno použití podpražcové podložky, potom by v dynamickém systému přibyla ještě jedna paralelně vložená pružina o tuhosti c_{usp} , tedy:

$$\frac{1}{c_{tot}} = \frac{1}{c_t} + \frac{1}{c_u} + \frac{1}{c_{usp}} \quad (69)$$

Tuhost podpražcové podložky se pohybuje v rozmezí $c_{usp} = 0,05$ až $0,5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$ dle typu, což znamená, že některé podpražcové podložky jsou tužší než železniční spodek. [33, 34]

2.1.4.6 Grafické vyjádření závislosti tuhosti a optimální hodnoty

V žádném předpise či normě není hodnota maximálního, minimálního ani optimálního průhybu ukotvena. Obvykle se počítá s tím, že by se měl průhyb na hlavě kolejnice pohybovat v rozmezí od jednoho do dvou milimetrů, tedy:

$$w_{opt} \in \langle 1,0; 2,0 \rangle \text{ mm}. \quad (70)$$

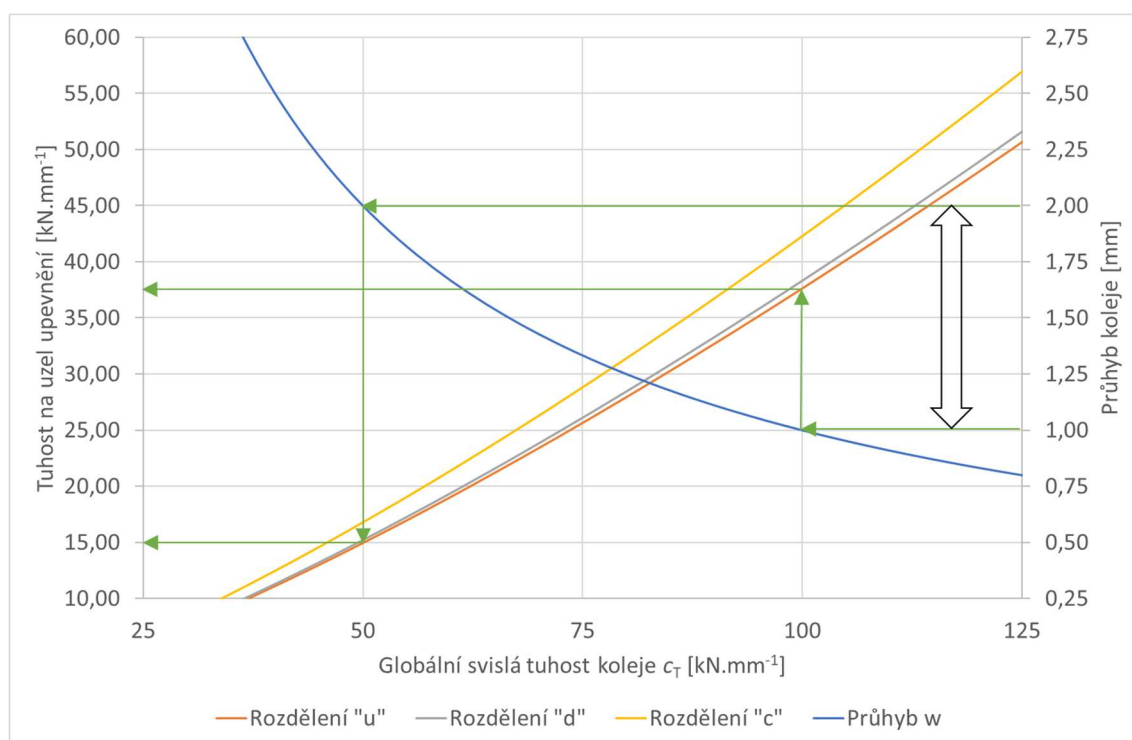
Nelze jednoznačně říci, bude-li z hlediska mechaniky horší nebo lepší, pokud bude průhyb mimo tuto oblast, což by muselo být prověřeno dynamickým výpočtem. Obecně se lze domnívat, že pokud bude průhyb větší, např. v hodnotě 3 mm, z hlediska statického to bude lepší vzhledem k delšímu roznosu zatížení na více pražců.

Oproti globální svislé tuhosti koleje c_T , která má přímou interpretaci, je spojitá svislá tuhost koleje k především základním parametrem uvažovaným v modelu koleje. Hodnota obvyklé spojitě svislé tuhosti koleje k je potom v rozmezí:

$$k_{opt} \in \langle 24,8; 62,4 \rangle \cdot 10^6 [N \cdot m^{-2}] = [kN \cdot mm^{-1} \cdot m^{-1}], \quad (71)$$

přičemž hodnoty k_{opt} vycházejí z výpočtu pro běžné kolové síly od 100 do 125 kN.

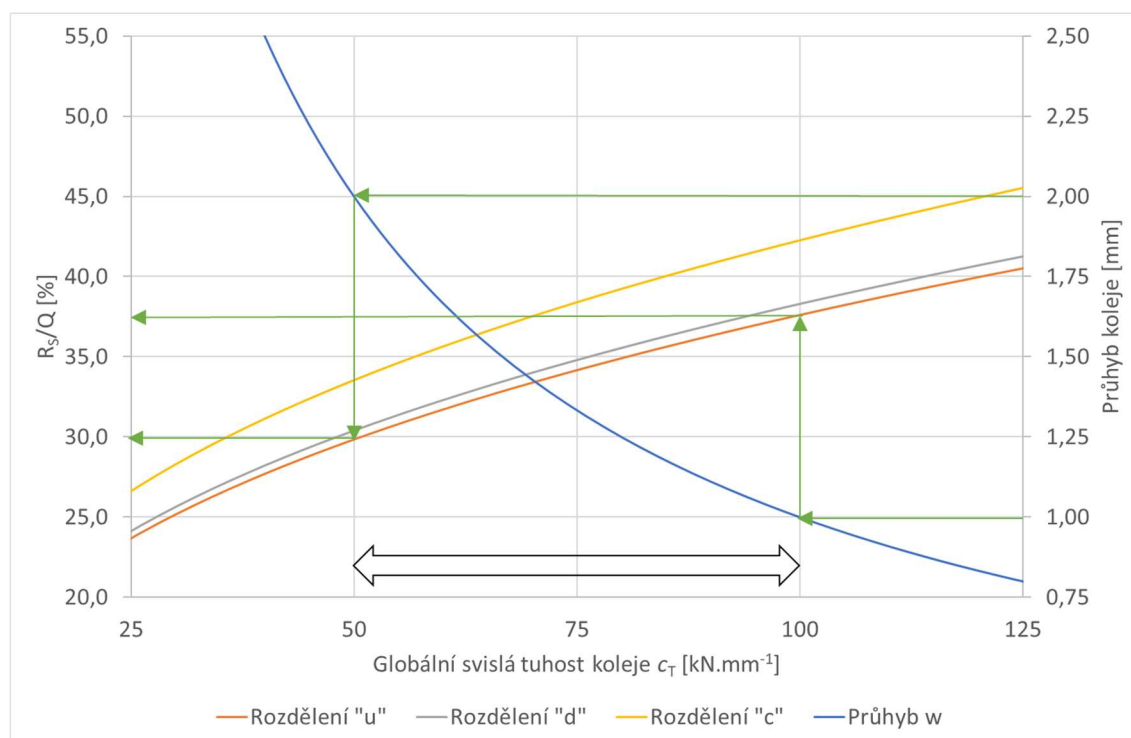
V následujícím grafu (obr. 5) je vidět závislost globální svislé tuhosti koleje na průhybu koleje a na tuhosti uzlu upevnění (výpočet viz dále). Na pravé svislé ose je patrné rozmezí optimálních průhybů dle vztahu (70). Půjde-li se po vykreslené modré křivce závislosti svislé tuhosti koleje (Q/w_{max}), je vidět, že pro rozdělení pražců „u“ je potřeba optimální tuhost na uzel upevnění v rozmezí od 15 do 38 kN.mm⁻¹. Bude-li se uvažovat větší vzdálenost pražců, např. rozdělení „c“, je hned vidět, že pro dosažení optimálního průhybu bude potřeba větší tuhost na uzel upevnění, tedy v rozmezí 17 až 43 kN.mm⁻¹.



Obr. 5 Graf závislosti globální svislé tuhosti koleje na průhybu koleje a tuhosti uzlu upevnění.

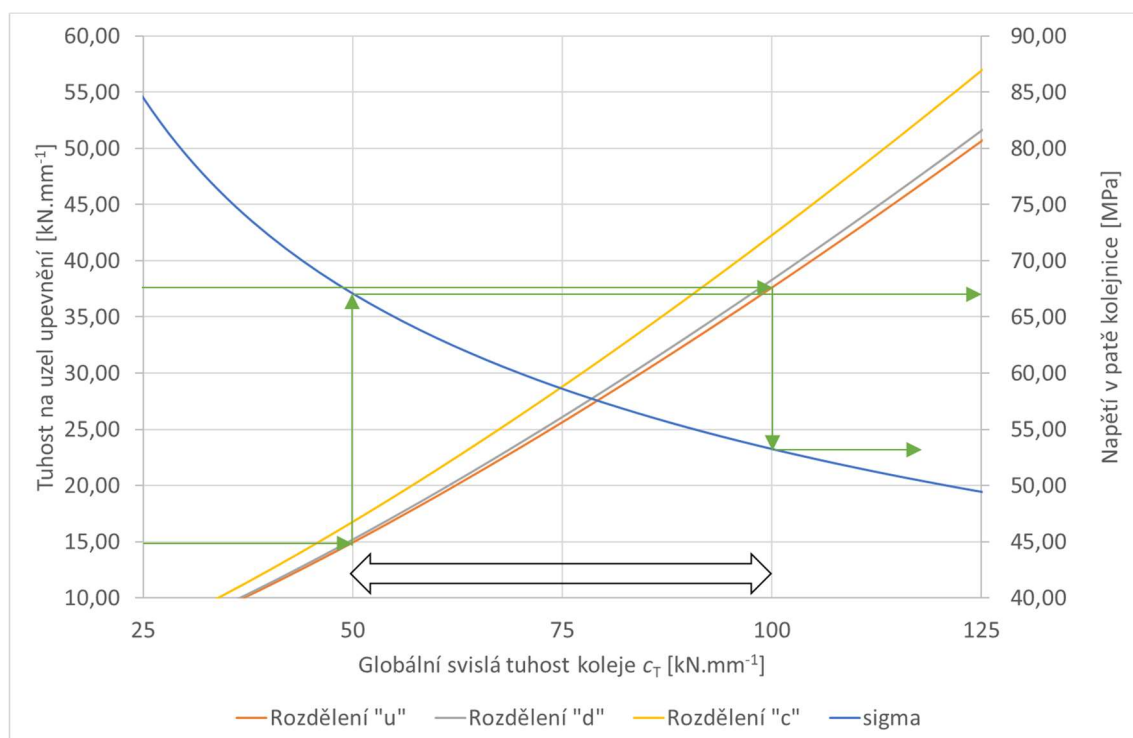
Následující graf (obr. 6) ukazuje, jaký bude mít vliv průhyb koleje na roznos kolové síly na okolní pražce. Na levé svislé ose je vyjádření procenta kolové síly, kterou bude při dané globální tuhosti koleje přenášet pražec pod působící kolovou silou. Budou-li se uvažovat opět krajní hodnoty průhybu koleje 1,00 a 2,00 mm, kterým odpovídá globální svislá tuhost koleje c_T 50 a 100 kN.mm⁻¹, vidíme, že krajní hodnoty procenta roznosu jsou 30 % pro uvažovaný průhyb 2 mm a 37 % pro uvažovaný

průhyb 1 mm. Z toho je patrné, že při větší globální svislé tuhosti je reakce kolové síly pod působištem kolové síly větší. Tento výpočet je proveden pro osamělou kolovou sílu. Pokud by byl uvažován podvozek o více nápravách, bude reakce přenášena kolové síly vzhledem k superpozici větší. Při nejméně příznivém případě, kdy je pak uvažován třínápravový podvozek, se lze dopočítat maximální hodnoty procenta roznosu cca 41 %. Je-li tedy v literatuře běžně k nalezení hodnota přenosu 50 % kolové síly na pražec pod kolovou silou, jedná se o hodnotu zcela jistě na stranu bezpečnou.



Obr. 6 Graf závislosti globální svislé tuhosti koleje na průhybu koleje a roznosu na okolní pražce.

Z dalšího grafu (obr. 7) je vidět závislost globální svislé tuhosti koleje na tuhosti připadající na uzel upevnění a na napětí v patě kolejnice. Půjde-li se od známého rozmezí tuhosti připadající na uzel upevnění v rozmezí cca 15 až 35 kN.mm⁻¹, kde se odečte globální svislá tuhost opět 50 až 100 kN.mm⁻¹, lze dále odečíst napětí v patě kolejnice v rozmezí 53 až 67 MPa. Pokud je globální tuhost koleje menší (tedy průhyb bude větší), bude logicky napětí v patě kolejnice větší. [33, 34]



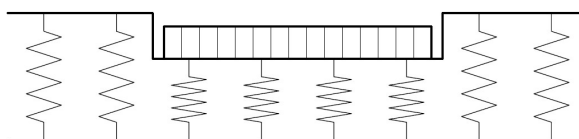
Obr. 7 Graf závislosti globální svislé tuhosti koleje na tuhosti připadající na uzel upevnění a na napětí v patě kolejnice.

2.1.5 Statická soustava pro Pasternakův model podloží

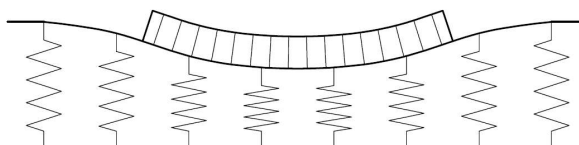
2.1.5.1 Rozdíl mezi Winklerovým a Pasternakovým modelem

V případě Winklerova modelu podloží jsou uvažovány pružiny jako samostatné prvky, které nerespektují vliv okolního zatížení. V případě Pasternakova modelu je do něj vneseno spolupůsobení mezi „jednotlivými pružinami“, jak zjednodušeně demonstruje následující obrázek (obr. 8).

A) Winkler



B) Pasternak



Obr. 8 Elementární rozdíl mezi Winklerovým a Pasternakovým modelem podloží.

Na rozdíl od Winklerova modelu podloží, kde je pouze jedna tuhostní konstanta C (modul ložnosti) a může se tedy vyjádřit síla P v závislosti na posunutí jako:

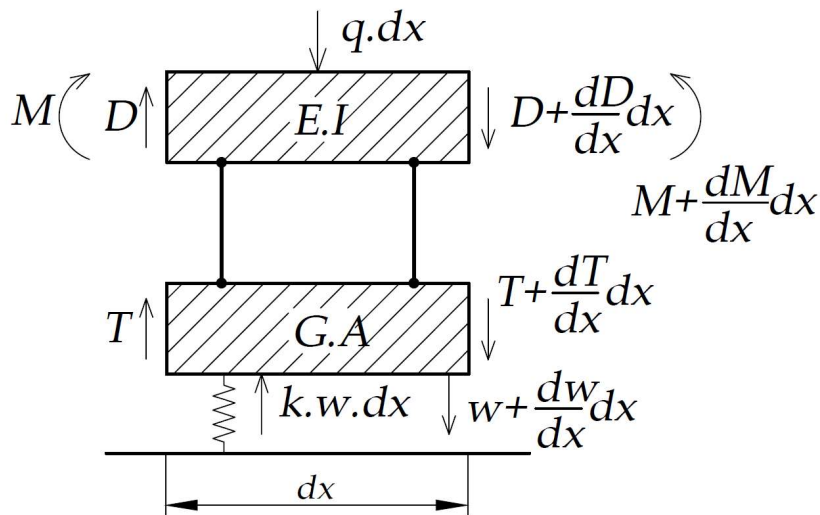
$$P = C \cdot w, \quad (72)$$

u Pasternakova modelu jsou k dispozici již 2 konstanty C_1 a C_2 , čímž dostáváme vliv pootočení (člen za konstantou C_2), tedy:

$$P = C_1 \cdot w + C_2 \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w}{\partial y \partial x} \right). \quad (73)$$

2.1.5.2 Definice problému řešení

Na následujícím obrázku (obr. 9) je uveden element silové a momentové podmínky rovnováhy vycházející z Pasternakova modelu. Jedná se o rozšířený Timošenkův model s přidaným elementem vyjadřující souvislost mezi pružinami navzájem, tzn. smykový modul. Navíc se zde tedy vyskytují smykové síly T v podloží.



Obr. 9 Element silové a momentové podmínky rovnováhy Pasternakova modelu.

Podle předchozího obrázku se může psát diferenciální rovnice vycházející ze silové podmínky rovnováhy v následujícím tvaru:

$$D = (D + dD) + T - (T + Td) - kw \, dx - q \, dx = 0, \quad (74)$$

přičemž rovnici můžeme dále vydělit členem dx a tím dostaneme rovnici ve tvaru:

$$-\frac{dD}{dx} - \frac{dT}{dx} + kw - q = 0. \quad (75)$$

Dále je možné opět pokračovat analogickým způsobem jako u Winklerova podloží s tím rozdílem, že se řešení rozšíří o smykový element:

$$T = GA \frac{dw}{dx}, \quad (76)$$

kde člen (dw/dx) vyjadřuje míru změny natočení. S využitím dříve odvozeného vztahu (2) je možno psát diferenciální rovnici ve tvaru:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + GA \frac{d^2 w}{dx^2} = kw - q. \quad (77)$$

Pokud je potřeba do rovnice dostat rovněž ohybovou tuhost EI , lze využít vztahu (4) pro ohybový moment a okrajovou podmínku $q = 0$. Poté lze psát základní diferenciální rovnici popisující řešený problém dle obr. 9, tedy:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - GA \frac{d^2 w}{dx^2} + kw = 0. \quad (78)$$

2.1.5.3 Výsledek řešení diferenciální rovnice

Řešení diferenciální rovnice je obdobné jako u Winklerova modelu, rovněž využití okrajových podmínek je stejné. Výsledkem diferenciální rovnice je průhyb w , který lze psát ve tvaru:

$$w(x) = \frac{Q}{8 \cdot EI \cdot ab \cdot \lambda^2} \cdot e^{-bx} (a \cdot \cos ax + b \cdot \sin ax). \quad (79)$$

Dále je možno spočítat maximální průhyb ve tvaru:

$$w_{max} = w(0) = \frac{Q \cdot a}{8 \cdot EI \cdot ab \cdot \lambda^2} = \frac{Q}{8 \cdot EI \cdot b \cdot \lambda^2}. \quad (80)$$

Pro výpočet ohybového momentu je nutné do vztahu pro ohybový moment (4) dosadit druhou derivaci průhybu (79). Po druhé derivaci a dosazení vyjde:

$$\begin{aligned} M(x) &= \frac{-EI \cdot Q \cdot \lambda^2 \cdot 2}{8 \cdot EI \cdot ab \cdot \lambda^2} \cdot e^{-bx} (a \cdot \cos ax - b \cdot \sin ax) \\ &= \frac{Q}{4 \cdot ab} \cdot e^{-b} (a \cdot \cos ax - b \cdot \sin ax). \end{aligned} \quad (81)$$

Maximální ohybový moment potom nastane v souřadnici $x = 0$, potom tedy lze psát maximální ohybový moment ve tvaru:

$$M_{max} = \frac{Q}{4 \cdot ab} \cdot 1 \cdot a = \frac{Q}{4 \cdot b}. \quad (82)$$

Ve výsledném vztahu je oproti Winklerově modelu navíc konstanta b , která se spočítá jako:

$$b = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4\lambda^2 + \delta^2}. \quad (83)$$

Jak je vidět při porovnání s řešením dle Winklera, pokud by koeficient δ vyjadřující poměr smykové tuhosti k ohybové tuhosti byl roven 0 (tzn. z problému by byl vyjmut smyk), konstanta b by se rovnala λ , čímž by řešení zkolabovalo do následujícího vztahu:

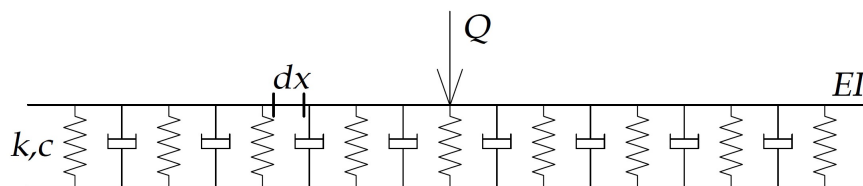
$$M = \frac{Q}{4 \cdot \lambda} = \frac{Q \cdot L}{4}, \quad (84)$$

což je případ řešení dle Winklera.

Pasternakův model lépe vystihuje skutečnost oproti Winklerově modelu podloží. Problém tohoto modelu ovšem je, že se jedná o kolejnici uloženou na podloží a nelze v tomto modelu rozlišit podložky pod patu kolejnice. Obdobným způsobem jako u výpočtu dle Timošenka se lze také dopočítat řešení pro kolejnicový styk při uvažování odpovídajících okrajových podmínek. [23, 27]

2.1.6 Dynamická soustava pro Winklerovo podloží (vč. úpravy dle Frýby)

Na rozdíl od předchozích kapitol, ve kterých byla popsána soustava statická, v této kapitole je představen model soustavy dynamické. Jedná se opět o Winklerovo podloží, které je určeno dvěma nekonečně dlouhými pruty. Ty jsou spojitě propojeny soustavou pružin (spojitá tuhost k [N.m⁻²]) a tlumičů (spojité tlumení vyjádřené součinitelem tlumení c [N.m⁻¹.s]). Dále vstupuje do modelu ohybová tuhost kolejnic EI a zatížení kolovou silou Q . Elementární schéma modelu je uvedeno na následujícím obr. 10.



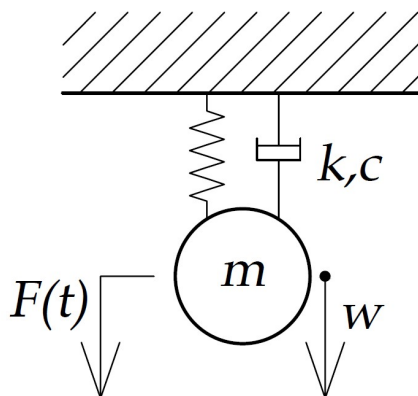
Obr. 10 Model Winklerova podloží pro dynamickou soustavu.

Předtím, než bude řešen model pro výsek prutu, je vhodné si připomenout dynamickou soustavu o jednom stupni volnosti, která je schematicky znázorněna na obr. 11. Na tento vztah bude následně navazovat odvození základní diferenciální rovnice popisující řešený problém. Jedná se soustředěnou hmotu o hmotnosti m zavěšenou na pružině o tuhosti k při tlumení c . Pro tuto jednoduchou soustavu lze ze základní teorie dynamiky psát následující podmínku rovnováhy:

$$m \cdot \frac{d^2 w}{dt^2} + c \cdot \frac{dw}{dt} + k \cdot w = F(t) \quad (85)$$

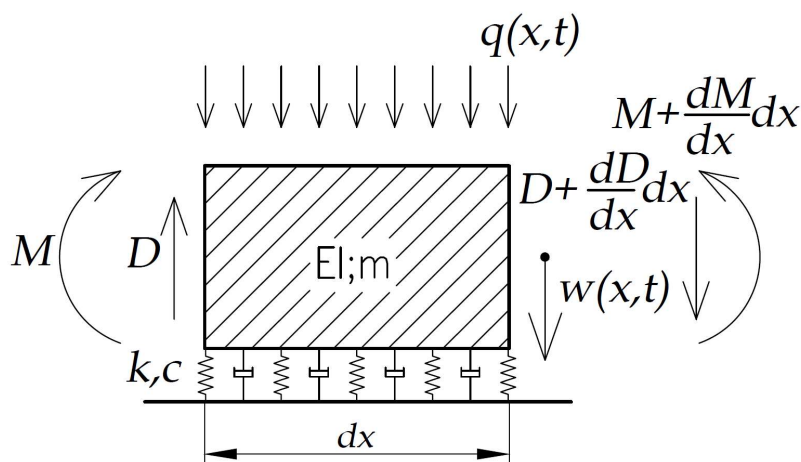
resp. často uváděnou ve zjednodušeném zápisu derivací:

$$m\ddot{w} + c\dot{w} + kw = F(t)$$



Obr. 11 Dynamická soustava o jednom stupni volnosti.

Diferenciální rovnici (85) ale nelze aplikovat na problematiku nekonečně dlouhého prutu, jelikož v modelu ještě vystupuje ohyb kolejnice. Aby mohl být problém popsán diferenciální rovnicí, je potřeba popsat silové působení na infinitně malém elementu prutu (obr. 12).

Obr. 12 Silové působení na element prutu o nekonečně malé délce dx .

Nyní lze na základě uvedeného schématu sestavit silovou podmínku rovnováhy. Ta bude obsahovat jednak členy z hlediska působení vnitřních sil a tuhosti, které budou derivací podle délky, a rovněž také člen tlumení a člen hmotnosti, které jsou derivací podle času. Lze tedy psát následující vztah:

$$D - D - \frac{dD}{dx} dx + kw \cdot dx + c \cdot \frac{dw}{dt} dx + m \cdot \frac{d^2 w}{dt^2} dx = q, \quad (86)$$

Na pravé straně rovnice se vyskytuje zatížení q , které se mění po délce koleje a může být různé v čase. Aby bylo možno s rovnicí dále pracovat, užije se momentová podmínka rovnováhy:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dx} dx &= D \cdot dx \\ D &= \frac{dM}{dx} \\ \frac{dD}{dx} &= \frac{d^2 M}{dx^2} \end{aligned}$$

z pružnosti:

$$M = -EI \cdot \frac{d^2 w}{dx^2},$$

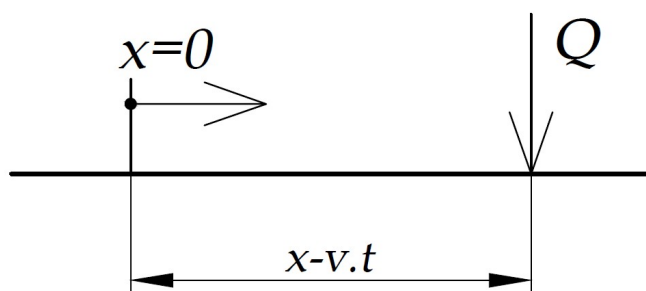
po dosazení:

$$\frac{dD}{dx} = -EI \frac{d^4 w}{dx^4}. \quad (87)$$

Dosadí-li se výsledný vztah (87) zpět do rovnice (86), vznikne po úpravě **základní diferenciální rovnice řešeného problému**, ze které lze vysledovat jistou návaznost na základní rovnici podmínky rovnováhy pro jeden stupeň volnosti (85).

$$EI \cdot \frac{d^4 w}{dx^4} + m \cdot \frac{d^2 w}{dt^2} + c \cdot \frac{dw}{dt} + k \cdot w = 0 \quad (88)$$

Problém pro řešení diferenciální rovnice je oproti předcházejícím případům vyskytující se derivace jak podle délky, tak i podle času. Vzniklý problém lze v tomto případě obejít pomocí zavedení relativní souřadnice přístupem dle Frýby [30, 31], který vychází z následující myšlenky (schematicky viz obr. 13).



Obr. 13 Schématické znázornění základní myšlenky transformace dle Frýby. [31]

U Frýbova přístupu se uvažuje, že časová změna t se pohybuje rychlostí v , což je vlastně transformace. Pro další práci jsou zavedeny veličiny λ a L , a to stejně jako u Timošenkova modelu. Jejich vzájemné souvislosti jsou následující:

$$L = \frac{1}{\lambda}; L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}}. \quad (89)$$

Dále se zavede transformovaná souřadnice s , která zjednodušeně vyjadřuje, že v okamžiku, kdy se zastaví kolová síla, se dostane časový záznam:

$$s = \lambda \cdot (x - v \cdot t). \quad (90)$$

Pomocí transformované souřadnice s se upraví derivace podle délky:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= \frac{dw}{ds} \cdot \frac{ds}{dx} = \lambda \cdot \frac{dw}{ds} \\ \frac{d^2 w}{dx^2} &= \lambda^4 \cdot \frac{dw}{ds} \end{aligned} \quad (91)$$

a také podle času:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= \frac{dw}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = -\lambda \cdot v \cdot \frac{d^2 w}{ds^2} \\ \frac{d^2 w}{dt^2} &= \lambda^2 \cdot v^2 \cdot \frac{d^2 w}{ds^2} \end{aligned} \quad (92)$$

Upravené derivace se dosadí do původní diferenciální rovnice (88), čímž se dostane následující vztah:

$$EI \cdot \lambda^4 \cdot \frac{d^4 w}{ds^4} + m \cdot \lambda^2 \cdot v^2 \cdot \frac{d^2 w}{ds^2} - c \cdot \lambda \cdot v \cdot \frac{dw}{ds} + k \cdot w = 0 \quad (93)$$

V této rovnici již tedy není průhyb w funkcí polohy a času, ale funkcí smíšené souřadnice s . Tato souřadnice není dvourozměrná, ale pouze jednorozměrná, což znamená, že ve skutečnosti se touto transformací může ztratit nějaká informace popisující řešený problém. Rovnice může být v dalším kroku řešena opět obdobným způsobem jako v předcházejících případech. Rovnice se v následujícím řešení s výhodou zjednoduší pomocí jistých koeficientů, které mají dokonce fyzikální význam. Rovnici se v dalším kroku vydělí členem $(EI \cdot \lambda^4)$ a člen s tuhostí k ve zlomku se rozšíří hodnotou 4, tedy:

$$\frac{d^4 w}{ds^4} + \frac{m \cdot v^2}{EI \cdot \lambda^2} \cdot \frac{d^2 w}{ds^2} - \frac{c \cdot v}{EI \cdot \lambda^3} \cdot \frac{dw}{ds} + \frac{4 \cdot k \cdot w}{4 \cdot EI \cdot \lambda^4} = 0, \quad (94)$$

a v dalším kroku se zavedou koeficienty α a β následujícím způsobem:

$$\frac{d^4 w}{ds^4} + 4\alpha^2 \cdot \frac{d^2 w}{ds^2} - 8\alpha\beta \cdot \frac{dw}{ds} + 4 \cdot w = 0 \quad (95)$$

přičemž koeficient α :

$$\begin{aligned} 4\alpha^2 &= \frac{m \cdot v^2}{EI \cdot \lambda^2} \\ \alpha^2 &= \frac{m \cdot v^2}{4 \cdot EI \cdot \lambda^2} \\ \alpha &= \frac{v}{2\lambda} \sqrt{\frac{m}{EI}} \end{aligned} \quad (96)$$

a koeficient β vznikne následující úpravou:

$$\begin{aligned} 8\alpha\beta &= \frac{c \cdot v}{EI \cdot \lambda^3}, \\ \beta &= \frac{c \cdot v}{8 \cdot EI \cdot \lambda^3} \cdot \frac{2\lambda}{v} \sqrt{\frac{EI}{m}} = \frac{c}{4 \cdot EI \cdot \lambda^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}. \end{aligned} \quad (97)$$

Aby se dostal fyzikální význam koeficientu, je nutné provést ještě následující úpravu, tedy dosadí se za λ^2 dle vztahu (89) a provede se zkrácení:

$$\begin{aligned} \lambda^2 &= \sqrt{\frac{k}{4EI}}, \\ \beta &= \frac{c}{4 \cdot EI} \sqrt{\frac{4EI}{k}} \sqrt{\frac{EI}{m}} = \frac{c \cdot m}{2 \cdot m} \sqrt{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{1}{m}} = \frac{c}{2 \cdot m} \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \end{aligned} \quad (98)$$

čímž byl odvozen koeficient α , který udává poměr ke kritické rychlosti a koeficient β , který udává poměr ke kritickému tlumení.

Pomocí koeficientu α se může tedy odvodit vztah pro kritickou rychlost, tzn. pro rychlost, při které dojde k rezonanci. Vyjde se z poměru:

$$\alpha = \frac{v}{v_{cr}} \quad (99)$$

a dosadí se do vzorce pro koeficient α :

$$\begin{aligned} \frac{v}{v_{cr}} &= \frac{v}{2\lambda} \sqrt{\frac{m}{EI}} \\ v_{cr} &= 2\lambda \sqrt{\frac{EI}{m}} = 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} = 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{k \cdot EI}{4 \cdot m^2}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot k \cdot EI}{m^2}} \\ &= \sqrt[4]{\frac{4 \cdot EI}{k}} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = L \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}, \end{aligned} \quad (100)$$

čímž byl odvozen vzorec pro kritickou rychlost. Jak je vidět, čím bude tužší systém, tím bude kritická rychlost vyšší. Z toho vyplývá, že pro měkké zeminy je kritická rychlost nízká.

Kritické tlumení vyjadřuje, zda se frekvence kmitání rozvine nebo utlumí. Bude-li koeficient $\beta > 1$, bude se kmitání rozvíjet a analogicky, bude-li $\beta < 1$, bude se kmitání tlumit.

Dále bude naznačeno řešení diferenciální rovnice (95) se zavedenými koeficienty α a β . Jedná se o lineární diferenciální rovnici, u které je předpokládáno řešení ve tvaru:

$$w(s) = e^{\gamma s}, \quad (101)$$

potom lze odvodit první derivaci průhybu podle souřadnice s :

$$\frac{dw}{ds} = \gamma \cdot e^{\gamma s}, \quad (102)$$

dále druhou derivaci:

$$\frac{d^2w}{ds^2} = \gamma^2 \cdot e^{\gamma s}, \quad (103)$$

a také čtvrtou derivaci, přičemž tyto derivace budou potřeba v dalším řešení:

$$\frac{d^4w}{ds^4} = \gamma^4 \cdot e^{\gamma s}. \quad (104)$$

Charakteristická rovnice řešení bude potom vypadat po dosazení derivací, tj. rov. (102), (103), (104), do vztahu (95) následujícím způsobem:

$$\gamma^4 + 4\alpha^2 \cdot \gamma^2 - 8\alpha\beta \cdot \gamma + 4 = 0 \quad (105)$$

Jedná se o diferenciální rovnici 4. řádu, přičemž ji nelze řešit substitucí. Výsledkem budou 4 komplexní čísla: $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$. Tato komplexní čísla je možné vyřešit softwarově (MATLAB, MS Excel). Obecné řešení samotného průhybu je potom lineární kombinací těchto komplexních čísel:

$$w(s) = A_1 \cdot e^{\gamma_1 s} + A_2 \cdot e^{\gamma_2 s} + A_3 \cdot e^{\gamma_3 s} + A_4 \cdot e^{\gamma_4 s} \quad (106)$$

Rovnici (106) lze potom vyřešit pomocí **okrajových podmínek** (pozn. jelikož je souřadnice s složena i z času t , máme zároveň i počáteční podmínky). Řešení bude nesymetrické – na rozdíl od předchozích případů, kdy bylo řešení symetrické a díky tomu stačilo řešit pouze symetrickou polovinu (srov. kap. 2.1.3.3). Řešení je tedy nutno rozdělit na funkci vlevo $w_L(s)$, která bude mít definiční obor od $-\infty$ do 0, a funkci vpravo $w_P(s)$, která bude mít definiční obor od 0 do $+\infty$.

Pro **levou část** funkce platí:

$$\begin{aligned} w_L(s) &= -\infty; 0 \\ w_L(-\infty) &= 0 \end{aligned} \quad (107)$$

a použije se pro γ_3, γ_4 s kladnou reálnou částí, potom:

$$w_L = A_3 \cdot e^{\gamma_3 s} + A_4 \cdot e^{\gamma_4 s}. \quad (108)$$

Pro **pravou část** funkce platí:

$$\begin{aligned} w_P(s) &= 0; -\infty \\ w_P(\infty) &= 0 \end{aligned} \quad (109)$$

a použije se pro γ_1, γ_2 se zápornou reálnou částí, potom:

$$w_P = A_1 \cdot e^{\gamma_1 s} + A_2 \cdot e^{\gamma_2 s}. \quad (110)$$

První okrajová podmínka vychází z návaznosti funkce v bodě pod působící kolovou silou (bod 0), hodnota funkce průhybu zleva se musí rovnat hodnotě funkce průhybu zprava, tedy:

$$\begin{aligned} w_P(0) &= w_L(0) \\ A_3 \cdot e^0 + A_4 \cdot e^0 &= A_1 \cdot e^0 + A_2 \cdot e^0 \\ A_3 + A_4 &= A_1 + A_2 \end{aligned} \quad (111)$$

Druhá okrajová podmínka uvažujeme souřadnici s rovnu 0, tedy:

$$s = 0, \quad (112)$$

a při porovnání derivací průhybu zleva a zprava se dostane:

$$\frac{dw_L}{ds} = \frac{dw_P}{ds}, \quad (113)$$

a následně po dosazení:

$$A_3\gamma_3 + A_4\gamma_4 = A_1\gamma_1 + A_2\gamma_2. \quad (114)$$

Celkově byly odvozeny čtyři konstanty, přičemž dvě jsou již vyjádřeny. Proto se zavede **třetí okrajová podmínka** taková, že ohybový moment zleva se rovná ohybovému momentu zprava, tedy:

$$M_L = M_P; M = -EI \cdot \frac{d^2w}{dx^2}. \quad (115)$$

a po dosazení:

$$A_3\gamma_3^2 + A_4\gamma_4^2 = A_1\gamma_1^2 + A_2\gamma_2^2 \quad (116)$$

Poslední potřebná **čtvrtá okrajová podmínka** se pak zavede taková, že posouvající síla zleva se bude rovnat součtu zatížení (kolové síly) a posouvající síly zprava, tedy ve tvaru:

$$D_L = D_P + Q, \quad (117)$$

po dosazení:

$$A_3\gamma_3^3 + A_4\gamma_4^3 = A_1\gamma_1^3 + A_2\gamma_2^3 + \frac{Q}{EI \cdot \lambda^3}. \quad (118)$$

Všechny čtyři okrajové podmínky je možné potom přepsat pro přehlednost do maticového zápisu:

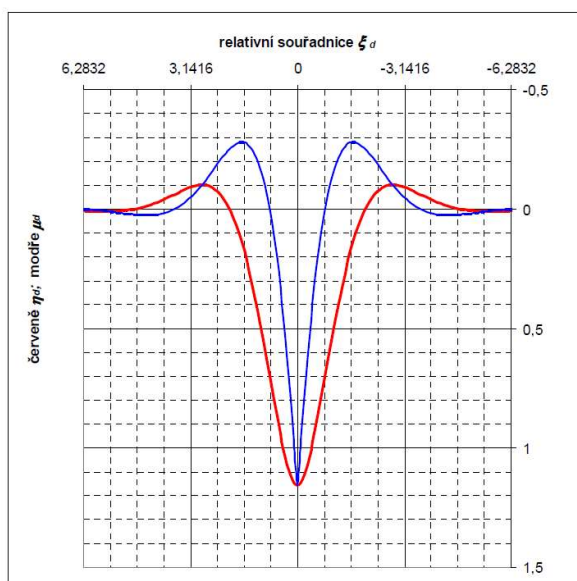
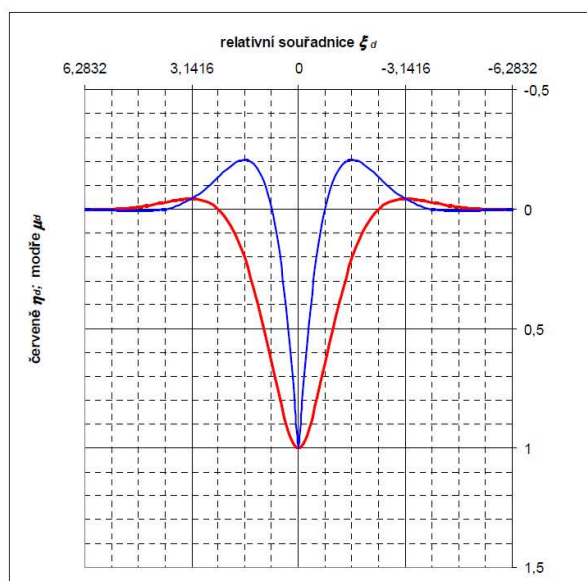
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & -\gamma_3 & -\gamma_4 \\ \gamma_1^2 & \gamma_2^2 & -\gamma_3^2 & -\gamma_4^2 \\ \gamma_1^3 & \gamma_2^3 & -\gamma_3^3 & -\gamma_4^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = w_0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 8 \end{bmatrix} \quad (119)$$

přičemž nyní je nutné vyřešit konstanty A_1 až A_4 . Pro řešení je nejlepší využít vhodný softwarový nástroj pro výpočty, např. MATLAB.

Nejběžnější výsledky výpočtu jsou uvedeny v závislosti na uvažovaných koeficientech α a β v následujících reprezentativních grafech. Červeně je uvedena křivka pro průhyb a modře křivka pro ohybový moment. [25]

Statický případ: $\alpha = 0$; bez tlumení tj. $\beta = 0$

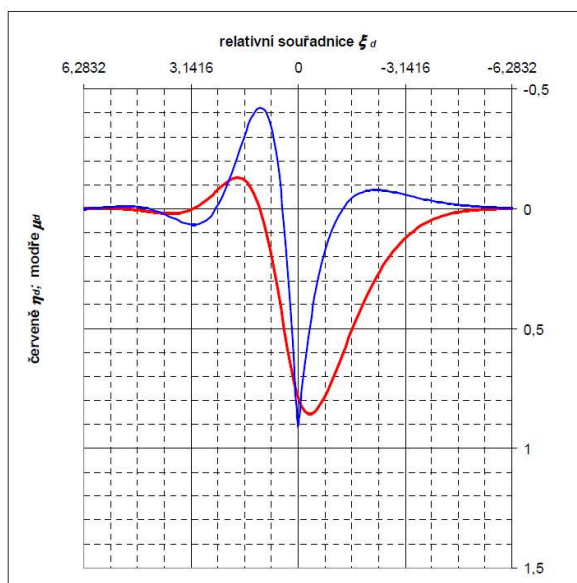
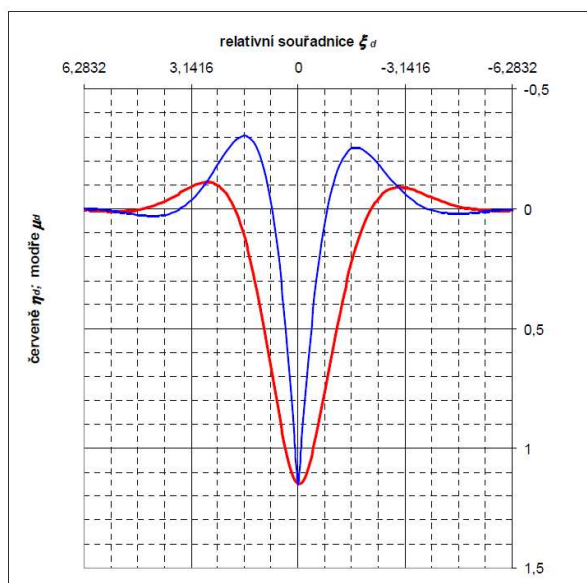
$\alpha = 0,5$; bez tlumení tj. $\beta = 0$



Obr. 14 Obvyklé výsledky výpočtu při různých koeficientech a a β – vlevo statický případ ($a = 0$ a $\beta = 0$), vpravo bez tlumení ($a = 0,5$ a $\beta = 0$). [23]

$\alpha = 0,5$; $\beta = 0,1$

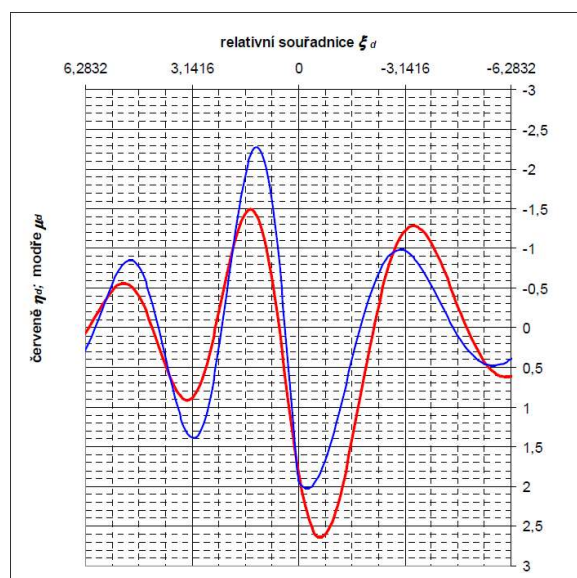
$\alpha = 0,5$; $\beta = 1,1$



Obr. 15 Obvyklé výsledky výpočtu při různých koeficientech a a β – vlevo $a = 0,5$ a $\beta = 0,1$, vpravo $a = 0,5$ a $\beta = 1,1$. [23]

$\alpha = 1,0$; bez tlumení tj. $\beta = 0$
 $\alpha = 1,0$; $\beta = 0,1$

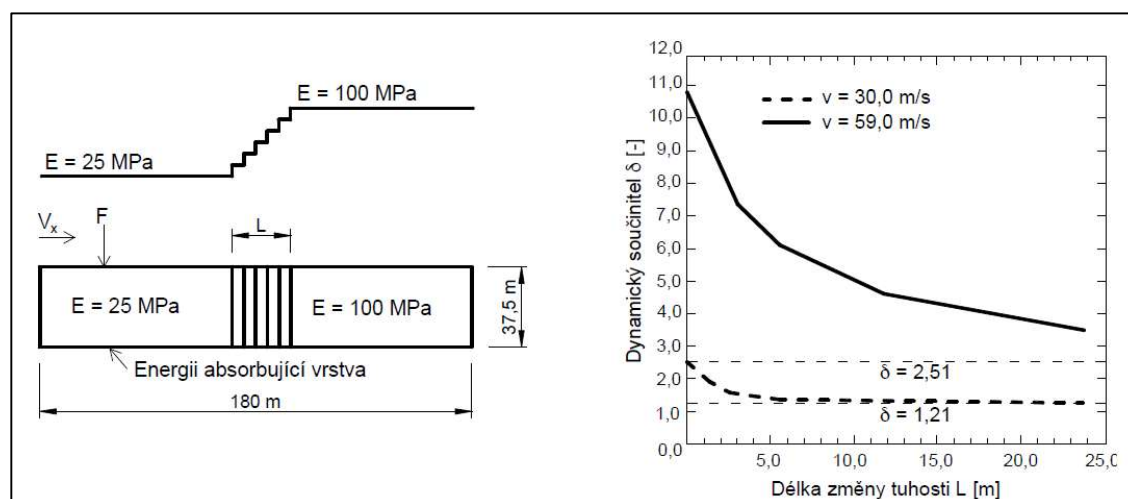
Netlumená rezonance



Obr. 16 Obvyklé výsledky výpočtu při různých koeficientech α a β - stav při kritické rychlosti vlevo netlumená rezonance ($\alpha = 1$ a $\beta = 0$), vpravo $\alpha = 1,0$ a $\beta = 0,1$. [23]

2.1.7 Změna tuhosti kolejové jízdní dráhy a vliv na dynamické namáhání

Změny ve svislé tuhosti kolejové jízdní dráhy se dostávají čím dál více do popředí zájmu. Z hlediska nehomogenit v tuhosti kolejové jízdní dráhy jsou kritickými místy na trati nejen výhybky, ale např. i místa v běžné koleji, kde dochází ke změně v konstrukci pražcového podloží, změně v konstrukci železničního svršku (např. přechod z úseku s dřevěnými pražci do úseku s betonovými pražci nebo kde je přechod z klasické konstrukce koleje na pevnou jízdní dráhu) nebo přechod na mostní konstrukci. Obzvláště s náhlými změnami tuhosti, což mohou být místa bez dostatečně dlouhého přechodového úseku s plynulou změnou tuhosti, jsou kritickými místy, což je patrné i z následujícího grafu (obr. 17), viz [35].



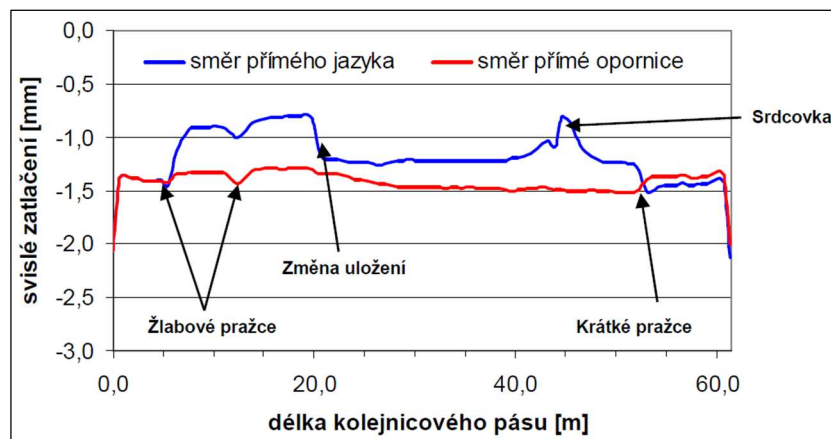
Obr. 17 Závislost délky změny v tuhosti na dynamickém účinku. [35]

Z uvedeného obrázku je patrné, že se zvyšující se rychlostí dynamické účinky rostou (přerušovaná čára – rychlost cca 100 km.h^{-1} , plná čára rychlost cca 200 km.h^{-1}). Je tedy vidět, že při náhlé změně tuhosti (délka přechodu 0 m) z modulu pružnosti 25 MPa na 100 MPa bude kolová síla díky dynamickým účinkům při rychlosti 100 km.h^{-1} cca 2,5krát větší a při rychlosti 200 km.h^{-1} dokonce cca 11krát větší. Dále je z grafu rovněž patrné, že i při nereálně dlouhém přechodovém úseku bude při změně dané tuhosti při rychlosti 200 km.h^{-1} dynamický součinitel minimálně 3,0, tedy kolová síla bude 3krát větší. Toto jsou hlavní důvody, kvůli kterým je velmi důležité především v souvislosti se zaváděním vyšších rychlostí na železnici hledat problematická místa z hlediska změn v tuhosti kolejové jízdní dráhy a snažit se je eliminovat nebo optimalizovat.

2.1.8 Průběh tuhosti kolejové jízdní dráhy podél výhybky

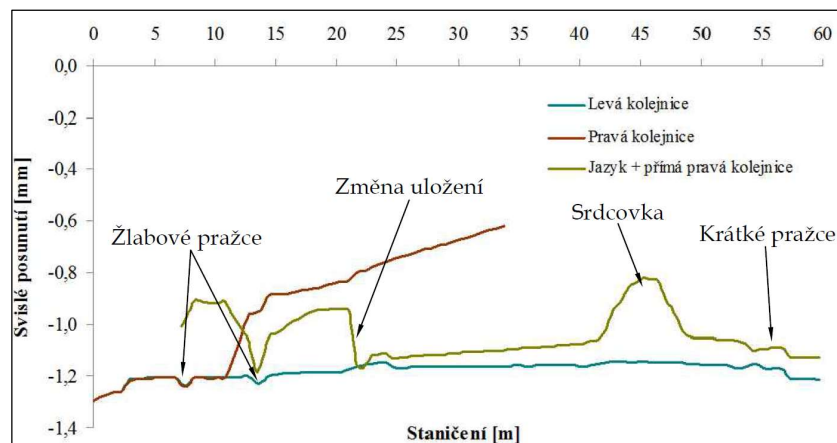
Z předpokladu, že výhybka obsahuje diskontinuity v tuhosti kolejové jízdní dráhy, vycházelo už mnoho výzkumných prací. Snahou výzkumné činnosti bylo najít ve výhybce místa, která jsou tužší, resp. najít průběh tuhosti ve svislém i příčném směru. V souvislosti s návrhem zpružnění pomocí podpražcových podložek (USP) se problematikou tuhosti kolejové jízdní dráhy zabýval Ústav železničních konstrukcí a staveb Fakulty stavební VUT v Brně (dále v textu také jako ÚŽKS nebo jen VUT) [36–42]. Zde byl výpočtovým modelováním zjištěn průběh tuhosti patrný z následujícího grafu (obr. 18). V grafu jsou zobrazeny 2 křivky; červeně je zobrazen kolejnicový pás jdoucí přes přímou opornici a kolejnici k přídržnici; modře je znázorněn kolejnicový pás protilehlý, tedy jdoucí přes přímý jazyk a srdcovku. Z grafu je patrné snížení poklesu až o 0,5 mm (z původních cca 2 mm) při vjezdu vozidla do výhybky a další výrazné snížení je patrné po přechodu kola z opornice na tuze uložený jazyk, a to na pokles méně než poloviční ve srovnání s poklesem před výhybkou. Dále je patrný

průjezd tuhou srdcovkou a poloha žlabových pražců, které se chovají pružněji než okolní kolej.



Obr. 18 Průběh tuhosti ve výhybce dle VUT v Brně. [5]

K obdobnému průběhu tuhosti dospěla také společnost DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. (dále jen jako DT), která v letech 2010 až 2015 zkoumala rovněž průběh tuhosti ve výhybce za účelem optimálního návrhu zpružněného upevnění. Byl vymodelován 3D detailní model výhybky typu J60-1:12-500-I, který byl načten do softwaru ANSYS a ve spolupráci s Ústavem stavební mechaniky Fakulty stavební VUT v Brně (dále i jako STM) proběhlo výpočtové modelování. Výsledkem byl graf průběhu poklesů po délce výhybky, který koresponduje s výsledky zjištěnými na ÚŽKS. [5, 14]



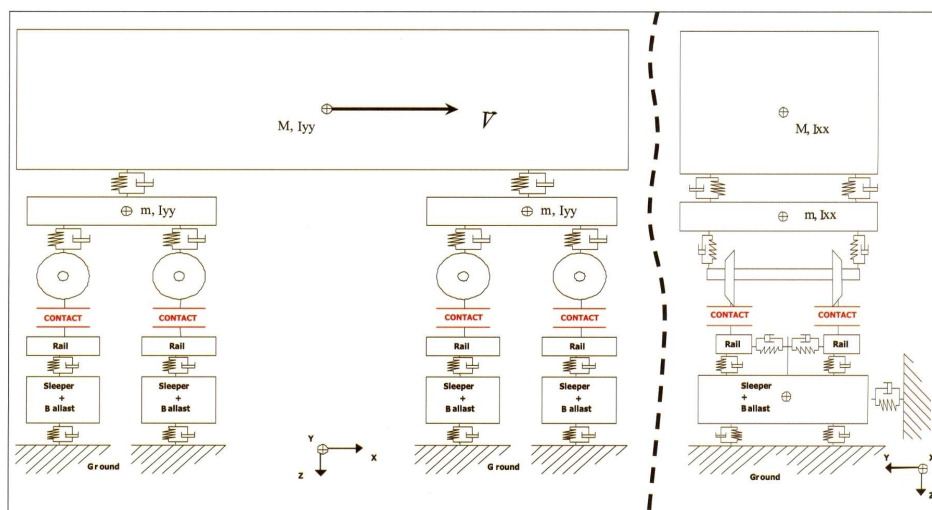
Obr. 19 Průběh tuhosti ve výhybce dle DT. [17, 43, 44]

Z grafů (obr. 18 a obr. 19) lze jednoduše vizuálně porovnat výsledky. Z grafu ÚŽKS je patrné, že byl uvažován přechod kola z opornice na jazyk přibližně v úrovni prvního žlabového pražce, zatímco DT uvažovalo přechod kola dále, přibližně mezi žlabovými pražci, což v grafu patrné z místa, kde se protnou křivky představující opornici a jazyk. Oblast přechodu kola z opornice na jazyk je proměnná, kdy záleží na tvaru jízdního obrysu kola každého vozidla a konkrétním tvaru ojetí pojezdových

ploch kolejnic ve výhybce. Toto místo se může také v průběhu životnosti výhybky posouvat. Srovnatelná je také poloha tuhé pevné srdcovky. Grafy se od sebe liší především hodnotou absolutních poklesů, které mohou být dány jinými charakteristikami pražcového podloží, které byly uvažovány do výpočtu.

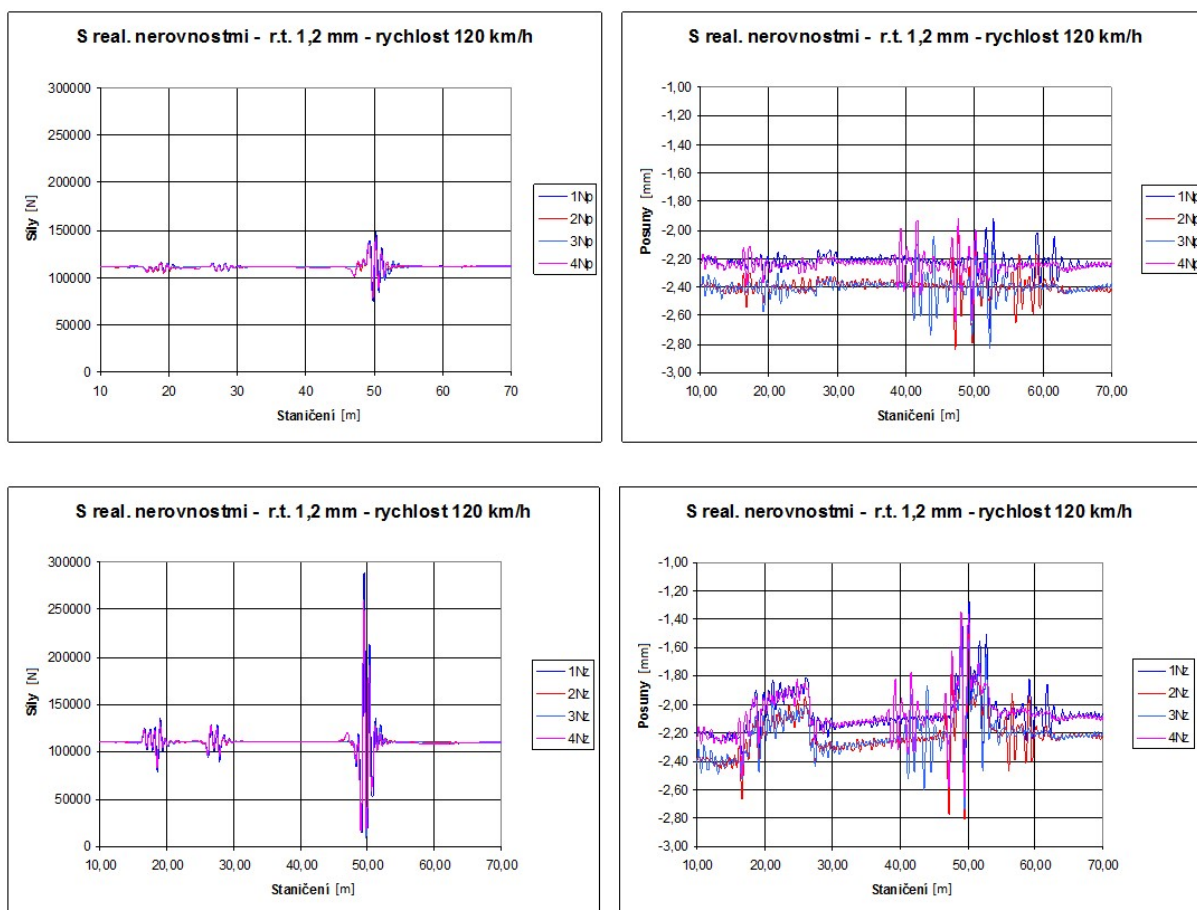
2.1.9 Zavedení dynamického vlivu do statického výpočtu

Při průjezdu vozidla přes diskontinuity jak v pojížděné ploše nebo geometrii koleje, tak v tuhosti jízdní dráhy vzniká dynamické namáhání. Toto dynamické namáhání vyskytující se na straně vozidla a působící na kolej je možno v dnešní době pomocí softwarových výpočtových nástrojů spočítat a také změřit. Této problematice se věnuje v ČR zejména Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzity Pardubice³ (dále i jako UPCE). Rovněž zahraniční univerzity a výzkumné organizace se této problematice intenzivně věnují, jelikož z hlediska vzájemného působení je nutné vnímat trať a vozidlo jako jeden neoddělitelný systém. Simulační výpočty jsou založeny na tzv. multibody system (MBS) modelech vozidla a koleje (viz obr. 20). Výsledkem výpočtových simulací je, mimo jiné, dynamická odezva (síly a deformace) v interakci vozidla a koleje, která může být vstupem do dalších analýz a hodnocení (např. dynamické odezva vozidla na tuhostní diskontinuity při průjezdu výhybkou, kdy je do simulace použit průběh tuhosti koleje po délce výhybky jako výstup z FEM modelu výhybky a podloží [45]. Tohoto postupu bylo využito také v projektu [46–49]. Na následujícím ilustračním obrázku (obr. 21) je příklad výstupů z výpočtového modelování výhybky při zohlednění dynamického chování vozidla během průjezdu. Je patrný nárůst kolové síly v oblasti srdcovky a výměny při uvažování nehomogenit v tuhosti a reálných geometrických nerovností.



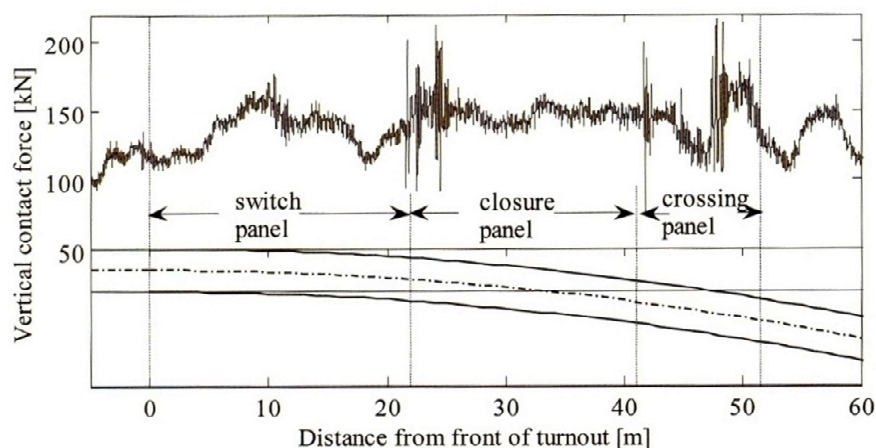
Obr. 20 Ukázka MBS modelu zahrnující jak vozidlo, tak kolej a kontakt mezi oběma subsystémy. [50]

³ Oddělení kolejových vozidel Katedry dopravních prostředků a diagnostiky Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice, dislokované pracoviště v České Třebové



Obr. 21 Kolové síly Q a odpovídající posuny v kolejnicovém páse jdoucím v přímé větvi výhybky kolem přídržnice (nahore) a jdoucím srdcovkou (dole) a odpovídající posuny (vpravo). Výsledek výpočtového modelování, viz [17, 44].

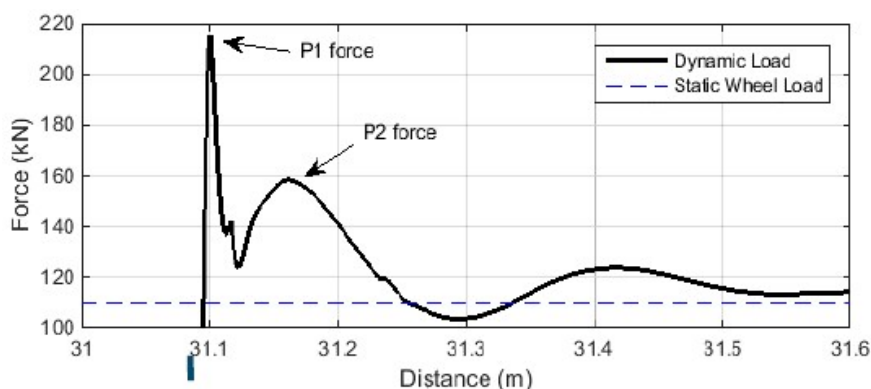
Podobné výsledky lze dostat i z měření na vozidlech (např. na ložiskových skříních lokomotivy), čehož bylo využito i při sledování zkušebního úseku (podrobně viz kap. 4.2.2.2). Rovněž u zahraničních univerzit lze nalézt podobné výsledky ze simulačních výpočtů nebo z měření [50] (viz obr. 22). Křivka představuje průběh svislé kolové síly Q na vnějším kole (při průjezdu obloukem odbočné větve) nabíhajícího/prvního dvojkolí na prvního podvozku při rychlosti 80 km.h^{-1} . Ze signálu je zřejmý nárůst dynamické odezvy při vjezdu do výhybky vyvolaného změnou tuhosti a změnou charakteristik kontaktu kolo/kolejnice ve výměnové části, dále jsou patrné špičky při průjezdu kolejnicovými styky mezi jednotlivými částmi výhybky. Největších hodnot nabývá kolová síla zpravidla při průjezdu pevnou srdcovkou, což je také z grafu patrné.



Obr. 22 Kolová síla Q měřená na nabíhajícího dvojkolí prvního podvozku při průjezdu odbočnou větví výhybky rychlostí 80 km.h^{-1} . [50]

2.1.10 Rázové síly při průjezdu srdcovkou

Průjezd pevnou srdcovkou má z hlediska silového působení specifický průběh. Ten se pak promítá jak do měřeného signálu, tak do výstupů ze simulačního výpočtu průjezdu vozidla přes výhybku. Tvar průběhu silového působení je charakterizován dvěma špičkami/vrcholy vyskytujícími se v těsné blízkosti za sebou, přičemž první trvá velmi krátkou dobu a dosahuje vyšších hodnot a druhý trvá delší dobu a dosahuje nižších hodnot. Tyto lokální extrémů jsou popisovány jako rázové síly P_1 a P_2 . Původně bylo tímto způsobem popsáno silové působení na kolejnicový styk, stejný princip lze ale aplikovat jak na svar kolejnic (nedokonalý, projetý), tak na průjezd pevnou srdcovkou [23]. Charakteristický průběh demonstruje následující obrázek (obr. 23).

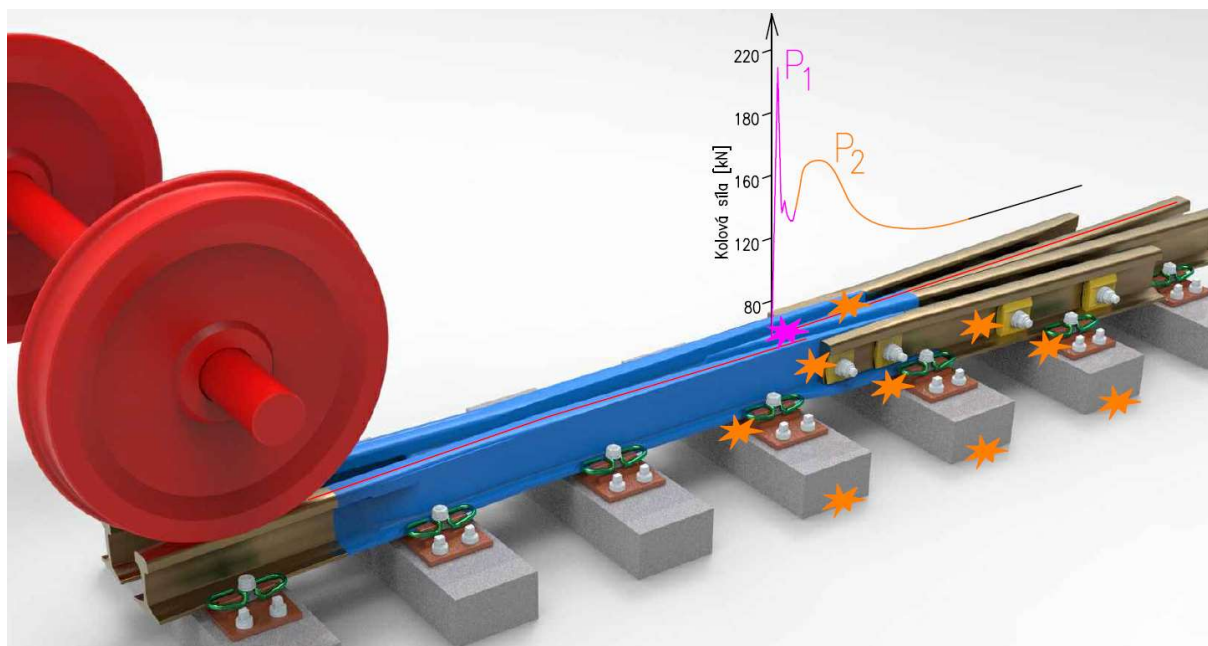


Obr. 23 Charakteristický průběh sil P_1 a P_2 . [51]

První odezva, resp. rázová síla P_1 , se odehraje jako vysokofrekvenční děj (tzv. tvrdý ráz v kontaktu). Tento ráz je způsoben nárazem kola při přejezdu srdcovky na druhou kolejnici, podle směru jízdy na hrot srdcovky, nebo křídlovou kolejnici. Ten je charakterizován velmi krátkou dobou trvání a vysokými hodnotami, které mohou dosahovat i více než dvojnásobku statické kolové síly. Tento tvrdý ráz zpravidla

ovlivňuje pouze místo kontaktu, ve kterém velmi často mohou nastat kontaktní poruchy (kontaktně únavové vady, např. únavová trhлина nebo vydrolování materiálu) [52].

Druhá odezva, resp. rázová síla P_2 , se odehraje spíše jako nízkofrekvenční děj (tzv. měkký ráz při ohybu). Vzniká v důsledku snížení a následně zvýšení těžiště kola způsobené změnou průměru styčné kružnice vlivem kuželovitosti kola. Tento měkký ráz je charakterizován delší dobou trvání a menšími dosahovanými maximálními hodnotami než rázová síla P_1 . Při přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky dojde nejprve k tvrdému rázu a následně je změna hybnosti neodpružené hmotnosti přenesena na celý systém (na rozdíl od síly P_1 , která ovlivňuje pouze kontaktní plochu). Rázovou silou P_2 pak není ovlivněna pouze kontaktní plocha, ale také celá srdcovka, navazující kolejnice, podložky pod srdcovku, podkladnice, pražce a pražcové podložky. Ovlivněná místa jednotlivých sil jsou znázorněna na následujícím obrázku (obr. 24). Porovnání síly P_1 a P_2 pak přehledně vyjadřuje tab. 1.



Obr. 24 Působení rázových sil P_1 a P_2 při průjezdu kolem vozidla znázorněné na 3D modelu srdcovky ZMB 3. Hvězdičkami znázorněna místa, která jednotlivé síly ovlivňují.

Rázovou sílu P_1 a P_2 lze spočítat podle následujících vztahů (120) a (121). [4, 53] V těchto vztazích se vyskytují následující veličiny. Hodnota P_0 [N] je statická síla působící na kontakt kolo/kolejnice, jedná se tedy v zásadě o kolovou sílu Q [kN]. Úhel α představuje celkový úhel, pod kterým kolo narazí do hrotu srdcovky (lze rozepsat na $\alpha_1 + \alpha_2$ [rad]). Dalšími veličinami jsou v [m.s⁻¹], což je rychlost pohybujícího se vozidla, k_H Hertzova kontaktní tuhost [N.m⁻¹], m_{T1} [kg] spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje pro výpočet P_1 , m_U [kg] neodpružená hmotnost, k_{T2} [N.m⁻¹]

ekvivalentní tuhost koleje pro výpočet P_2 a c_T [N.m.s⁻¹] ekvivalentní tlumení koleje pro výpočet P_2 .

$$P_1 = P_0 + \alpha v \sqrt{\frac{k_H m_{T1}}{1 + \frac{m_{T1}}{m_u}}} \quad (120)$$

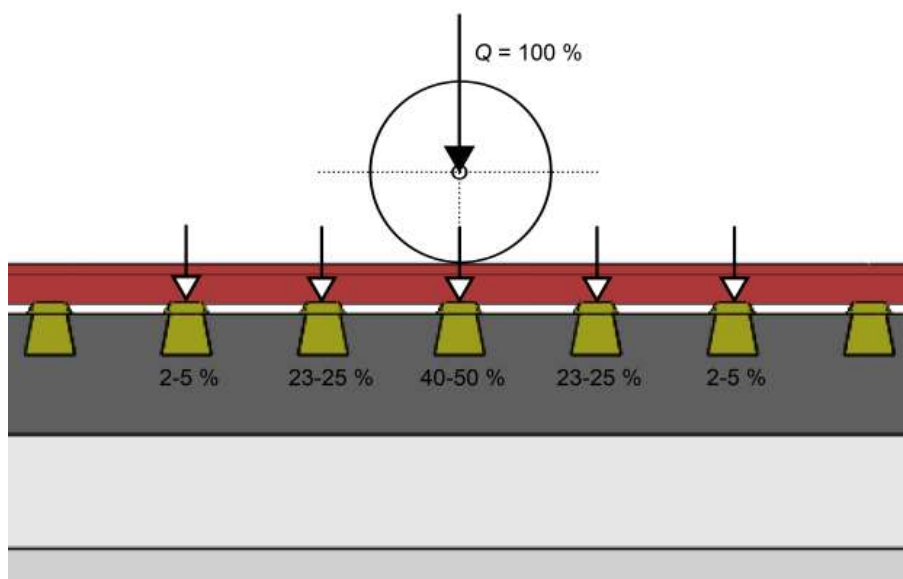
$$P_2 = P_0 + \alpha v \sqrt{\frac{m_U}{m_U + m_{T2}}} \left[1 - \frac{c_T \pi}{\sqrt{k_{T2}(m_U + m_{T2})}} \right] \sqrt{k_{T2} m_U} \quad (121)$$

Tab. 1 Porovnání rázových sil P_1 a P_2 .

	Rázová síla P_1	Rázová síla P_2
Doba trvání	< 1 ms	< 10 ~ 20 ms
Frekvence	$f_{cy} \approx 500 - 2000$ Hz	$f_{cy} \approx 50 - 120$ Hz
Ovlivňující prvky a veličiny	Hmotnost kola a koleje, kontaktní tuhost	Hmotnost kola a koleje, pružnost kolejnice, tuhost pražcového podloží
Důsledky působení	Opotřebení hrotu, resp. pojížděné plochy (plastické deformace, podpovrchové vady), kontaktně únavové vady	Opotřebení pojížděných ploch, degradace GPK, poškození pražců a kontaktně únavové vady na pojížděné ploše

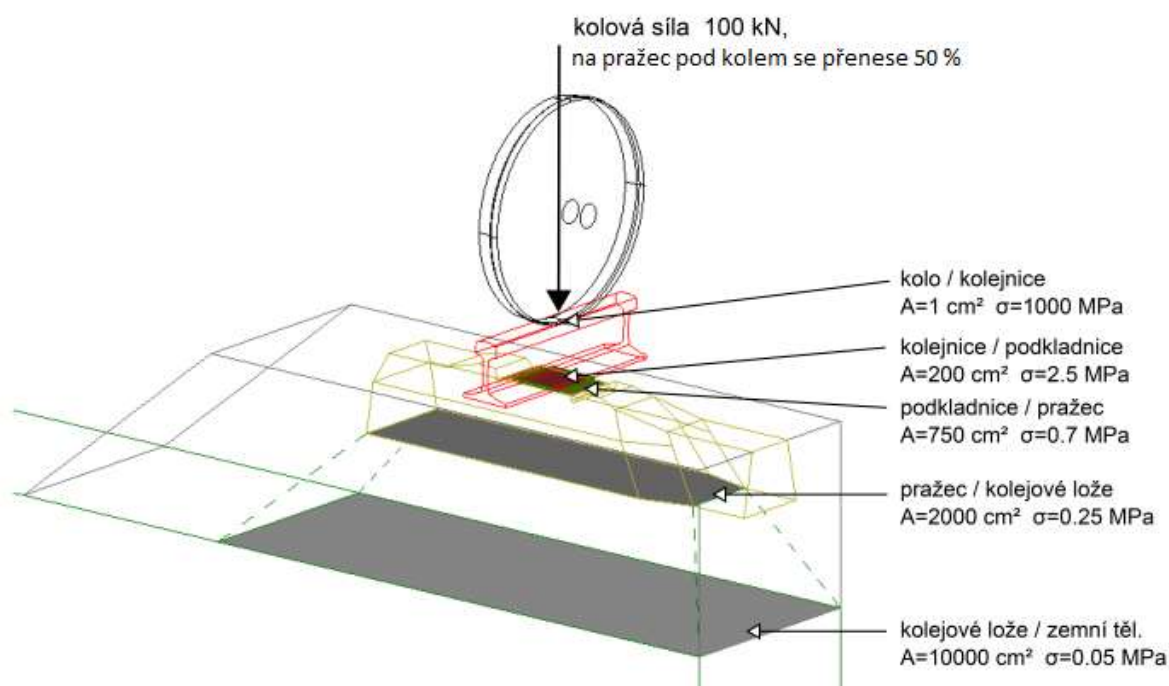
2.1.11 Přenos zatížení do pražcového podloží

Jednou z funkcí konstrukce koleje je přenášet zatížení železničního vozidla do pražcového podloží, resp. do železničního spodku a dále do zemního tělesa. Vzhledem k tomu, že kolejnice je uložena pružně na pražcích (díky pružnosti systému upevnění a pružnosti kolejového lože a pražcového podloží), jedná se v zásadě o spojitý nosník s pružným podepřením (viz teoreticky podrobně předchozí kap. 2.1.1 až 2.1.8). Při zatížení kolem stojícího nad pražcem (viz obr. 25) je zatížení od kolové síly Q redistribuováno následujícím způsobem. Pražec pod stojícím kolem přenáší cca 40 až 50 % kolové síly Q , sousední pražce přenášejí obvykle 23 až 25 % kolové síly a třetí pražce přenášejí cca 2 až 5 % kolové síly. [23, 25, 28] Hodnota roznosu se mění dle míry pružnosti daného úseku koleje. Při použití pružnější konstrukce koleje (např. zpružněním v systému upevnění použitému u pevné jízdní dráhy) je roznos realizován na delší vzdálenosti a pražec pod stojícím kolem přenáší pouze cca 35 % kolové síly, což bylo zjištěno např. výpočtovým modelováním výhybky uložené na PJD, viz [54–56].



Obr. 25 Roznos svislé kolové síly na pražce. [28, 56]

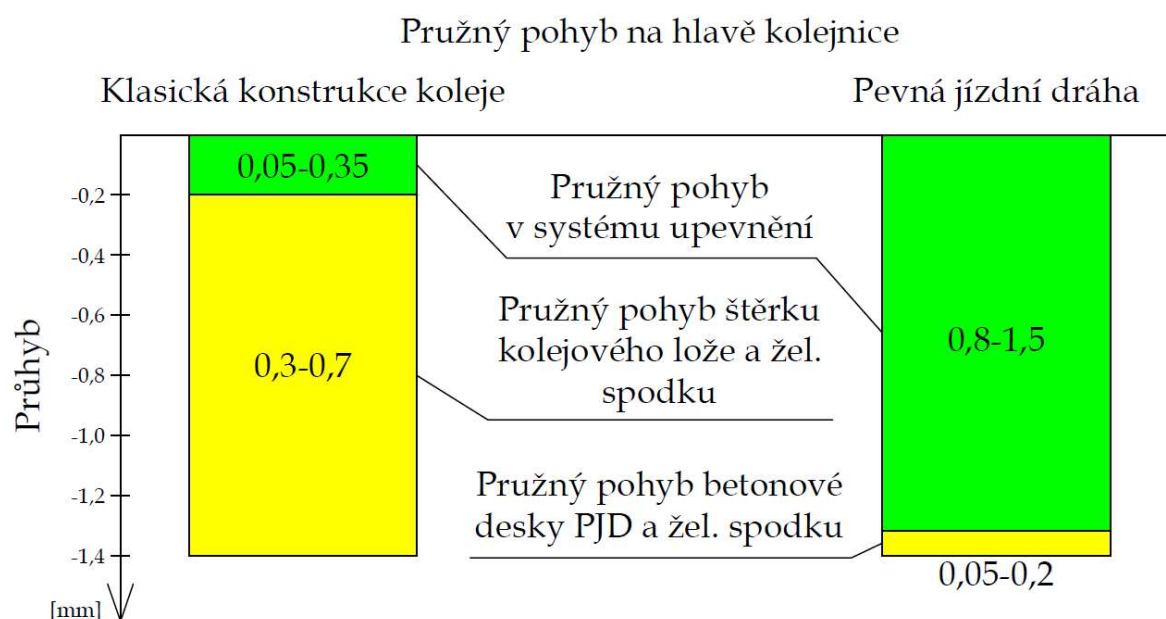
Roznos zatížení pod pražcem ukazuje následující obrázek (obr. 26), a to včetně příslušné kontaktní plochy a přenášeného napětí. Uvažujeme tedy kolovou sílu dle příkladu 100 kN (cca 10 t). Na kontaktu kolo/kolejnice je při uvažované kontaktní ploše 1 cm² napětí 1000 MPa. Kolejnice dále redistribuuje napětí dle principu popsaného výše na 50 % kolové síly. Na kontaktu kolejnice/podkladnice tedy připadá následně napětí již pouze 2,5 MPa. Napětí se následně roznáší postupně na čím dál větší ploše dle obr. 26 až v místě posledního významného rozhraní (kolejové lože/pláně tělesa žel. spodku) je napětí již pouze v hodnotě 0,05 MPa. [25, 33, 34, 56]



Obr. 26 Roznos svislé kolové síly do konstrukce koleje. [23, 25, 33, 56]

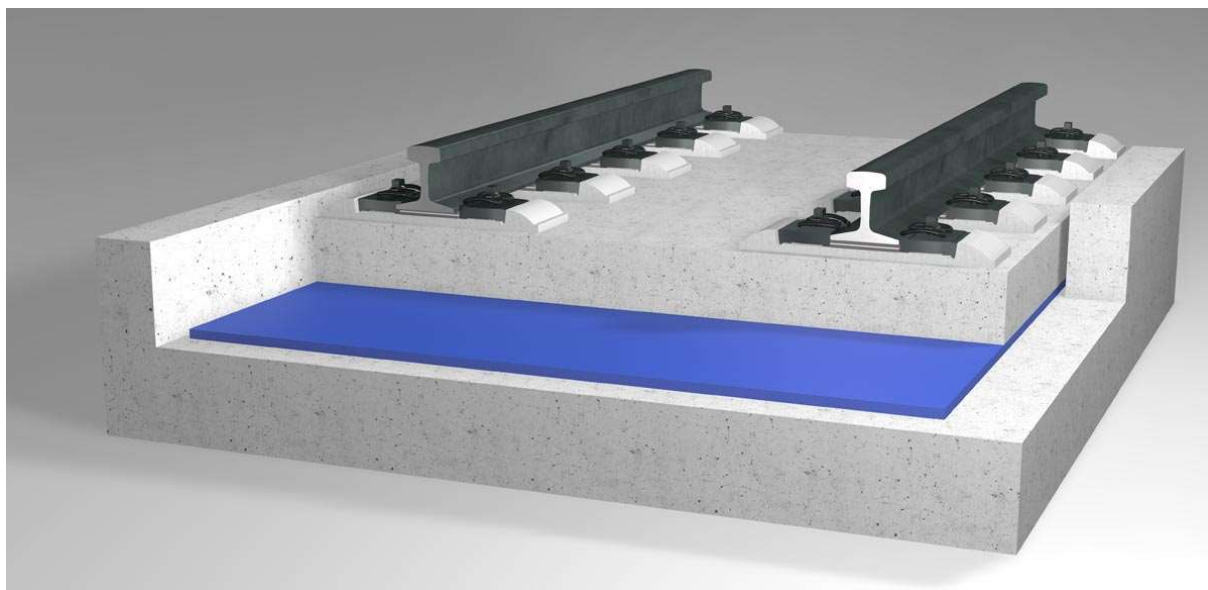
2.1.12 Tuhost klasické konstrukce koleje a pevné jízdní dráhy

V souvislosti s problematikou tuhosti kolejové jízdní dráhy, zpružněním a rovněž i v souvislosti s vysokorychlostním provozem je potřeba ještě zmínit alternativu, kdy běžná kolej či výhybka jsou umístěny na konstrukci pevné jízdní dráhy (PJD). Způsob, jakým se dosahuje požadovaného průhybu při průjezdu železničního vozidla (resp. pružnosti) při použití PJD je zcela odlišný. V případě klasické konstrukce koleje se šterkovým kolejovým ložem (viz obr. 27 vlevo) je stěžejní příspěvek v pružnosti realizován ve šterkovém loži a pouze malá část příspěvku pochází z pružnosti systému upevnění.



Obr. 27 Složky přispívající k požadované pružnosti koleje v případě klasické konstrukce koleje se šterkovým kolejovým ložem (vlevo) a v případě pevné jízdní dráhy (vpravo). [57]

Oproti tomu v případě realizace pevné jízdní dráhy, kde je použita tuhá železobetonová deska, je příspěvek této vrstvy k celkové pružnosti naprosto minimální (viz obr. 27 vpravo). Požadujeme-li tedy průhyb na hlavě kolejnice obdobný jako v případě klasické konstrukce koleje, tedy obvykle kolem 1,5 mm, musí být doplněna příslušná hodnota pružnosti do systému upevnění. Jak je tedy vidět z obrázku, v případě konstrukce PJD je tedy téměř veškerá pružnost realizována v systému upevnění, což vyžaduje speciální konstrukci zpružněných systémů upevnění. V některých konstrukcích PJD je k tomuto problému přistupováno i jiným způsobem než zpružněním v systému upevnění, a to např. ve vhodné vrstvě pod betonovou deskou (tzv. mass/spring system, resp. hmota/pružina systém [58, 59]), nebo zpružněním pod pražci ležícími na betonové desce (konkrétní příklad viz dále kap. 2.3.5).



Obr. 28 Příklad mass/spring systému pevné jízdní dráhy s pružným prokem pod železobetonovou deskou. [58]

2.1.13 Tuhost elementu

Při navrhování systémů upevnění se velmi často pracuje s veličinou tuhost podložky (pod patu kolejnice nebo pod podkladnici) a při hledání vhodného materiálu se používá její závislosti na kontaktní ploše A [mm²], tloušťce podložky h [mm] a modulu pružnosti E [Pa, N.m⁻², kg.m⁻¹.s⁻²]. Závislost mezi jednotlivými veličinami je popsána dále, přičemž odvození vychází ze základních zákonů pružnosti a pevnosti.

Uvažuje se rovnoměrně tažený nebo tlačенý prut. Pro odvození se nahradí dočasně tloušťku podložky h standardně délkou prutu l . Celkové protažení prutu pak se označí jako ΔL . Vyjde se z Hookeova zákona, který říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu, tedy:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}, \quad (122)$$

kde σ_x je mechanické napětí [Pa] a ε_x zastupuje poměrné přetvoření [-]. Poměrné přetvoření (protažení) ve směru x lze pak vyjádřit jako:

$$\varepsilon_x = \frac{dx' - dx}{dx} = \frac{\Delta dx}{dx}. \quad (123)$$

Celkové prodloužení prutu pak lze při uvažování konstantní normálové síly $N = F$ (a při shodném prodloužení všech délkových elementů $A = \text{konst.}$) napsat jako:

$$\Delta l = \int_0^l \Delta dx, \quad (124)$$

a při dosazení do uvedené rovnice (124) předchozích vztahů Hookeova zákona (122) a poměrného přetvoření (123) lze dále psát následující vztah:

$$\Delta l = \int_0^l \varepsilon_x dx = \int_0^l \frac{\sigma_x}{E} dx = \frac{N}{EA} \int_0^l dx = \frac{Nl}{EA}. \quad (125)$$

Tento vztah lze považovat za alternativní formulaci Hookeova zákona [60]. Inverzí ze vztahu (125) plyne následující vztah, kde je tahová síla vyjádřena pomocí prodloužení:

$$N = \frac{AE}{l} \Delta L = k \Delta l, \quad (126)$$

kde byla zavedena veličina charakterizující tuhost prutu (stálého průřezu) v tahu:

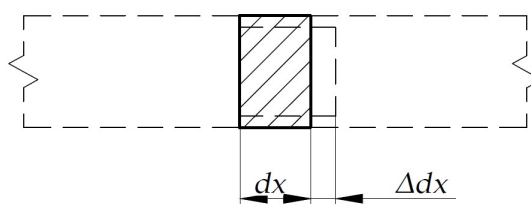
$$k = \frac{AE}{l}, \quad (127)$$

což je síla potřebná k protažení prutu o jednotkovou délku (kN.m^{-1} apod.). Její převrácená hodnota pak charakterizuje poddajnost prutu. [60]

Aplikuje-li se vztah na pružnou podložku v systému upevnění, nahradí se zpět délka prutu l tloušťkou podložky h , čímž vznikne vztah:

$$k = \frac{AE}{h}. \quad (128)$$

Pro další práci se vztahem (128) je potřeba si uvědomit jistá omezení. Jednak je zde uvažováno **významné zjednodušení**, kdy plošnou podložku uvažujeme jako prut, přičemž se nebere v úvahu příčná kontrakce a zjednodušuje se problém na jednoosou napjatost. Dále je potřeba vzít také v úvahu, že vztah je prvotně určen pro materiály, které mají při zatěžování lineární nárůst deformace (aspoň částečný, např. pracovní diagram oceli – platí zde Hookeův zákon). V okamžiku, kdy při laboratorním zkoušení je zjištěno (viz kap. 6), že materiál nemá lineární nárůst deformace, je pak modul pružnosti určen na základě předem definované sečny (sečný modul pružnosti) nebo eventuálně tečny (tečný modul pružnosti) a v oblastech dále od definované sečny nemusí tento vztah správně fungovat. Rovněž je nutno zohlednit skutečnost, že se jedná o normálově rovnoměrně namáhaný prut (resp. podložku). Při použití velkých kontaktních ploch dochází k deformaci zatěžovací plochy (zejména při působení bodové síly) a podložka není zatěžována rovnoměrně po celé ploše, což se týká zejména dlouhých podkladnic. V tomto okamžiku je pak nutné uvažovat tuto deformaci a zjistit efektivní zatěžovací plochu.



Obr. 29 Deformace taženého prutu stálého průřezu. [60]

2.2 SOUČASNÝ STAV V OBLASTI TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ – ZKUŠENOSTI Z ČESKÉ REPUBLIKY

Výše uvedený teoretický základ vstupuje do výzkumu a vývoje v oblasti systémů upevnění. S výše uvedenou problematikou se snažili vypořádat jak zahraniční, tak české organizace a výrobní podniky (např. optimalizace tuhosti, zpružnění v systému upevnění, podpražcová podložka apod.). V této kapitole je uveden přehled technických řešení vyvíjených nebo použitých v České republice. Z těchto řešení může být dále čerpána inspirace pro další výzkum a vývoj v oblasti optimalizace tuhosti v systému upevnění.

2.2.1 Zpružněné výhybky výrobce BWG

První zkušenosti v České republice s výhybkami zpružněnými v uzlu upevnění přišly na počátku 90. let, kdy bylo Českými drahami (tehdejším správcem infrastruktury) rozhodnuto o otestování výhybek zahraničních výrobců. Byla navázána komunikace s firmou WBG Weichenwerk Brandenburg GmbH (nyní Voestalpine BWG GmbH), která následně v roce 1995 dodala 2 výhybky J60-1:12-500-L vč. přechodových oblastí před a za výhybky (18 pražců) a oblasti mezi výhybkami (cca 15 m). Tyto výhybky mají všechny uzly upevnění zpružněny, a to tak, že podkladnice vč. abnormálních jsou opatřeny navulkanizovaným elastomerem. Další konstrukční odlišností bylo užití dělených dlouhých výhybkových pražců (pražce delší než 3 m) pro usnadnění instalace a rovněž užití konstrukčního rozšíření rozchodu koleje ve výměnové části, tzv. FAKOP⁴. Příslušné díly pražců jsou spojeny prvkem s tlumičem kmitání. Toto konstrukční uspořádání je u DB⁵ standardně používáno pro vysokorychlostní trati. Tyto výhybky byly vloženy do žst. Poříčeny jako výhybky č. 10 a č. 11 a po cca 20 letech provozu byly stále celkově ve velmi dobrém stavu až do vytěžení v souvislosti s rekonstrukcí stanice v roce 2021. Dle informace zástupců

⁴ FAKOP – Fahrkinematische Optimierung – kinematická optimalizace jízdy. Ochranná známka firmy Voestalpine BWG GmbH. Anglicky pak označováno jako KGO (Kinematic Gauge Optimisation).

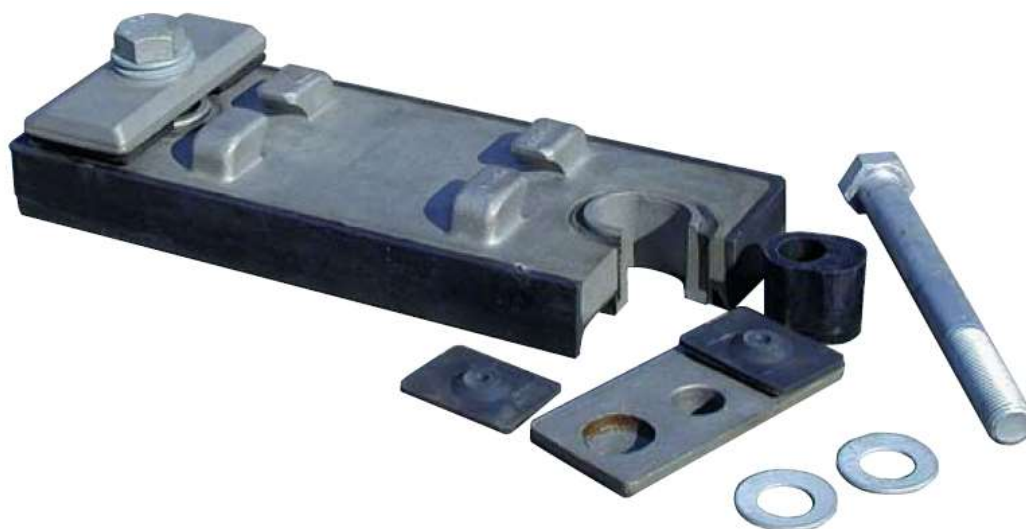
⁵ DB – Deutsche Bahn AG – národní správce infrastruktury v Německu (zároveň mj. rovněž provozovatel železniční dopravy).

správce infrastruktury nevyžadovaly výhybky za celou dobu provozu významnější údržbové zásahy, což svědčí mimo jiné o dobrém vlivu zpružněného upevnění i na opotřebení pojížděných ploch. Rovněž bylo provedeno měření dynamických účinků, jehož výsledkem bylo příznivé chování uzlů upevnění. Na následujících obrázcích (obr. 30, obr. 31) je ukázka jednoho z uzlů upevnění s patrným navulkanizovaným elastomerem. [61]



Obr. 30 Zpružněný systém upevnění ERL na výhybce BVG v žst. Poříčany.

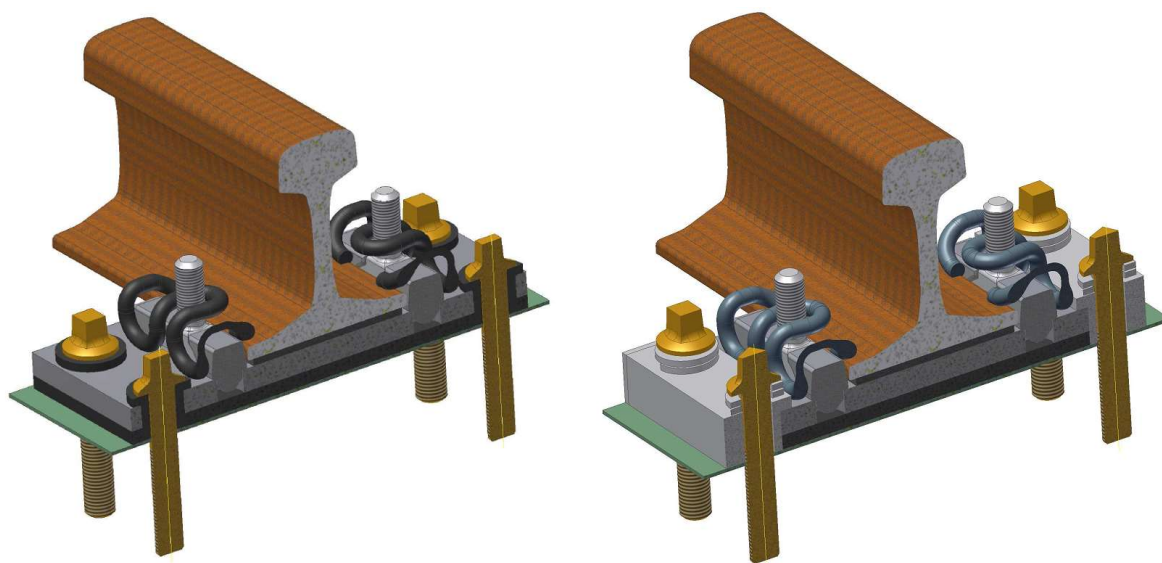
Systémy upevnění použité ve výhybkách v žst. Poříčany byly konkrétně typu ERL (Elastic Ribbed Plate). Tyto systémy upevnění jsou nadále vyráběny (nabízeny), a to ve dvou variantách; ERL 30 s přibližnou hodnotou tuhosti 30 kN.mm^{-1} doporučené pro rychlosti od 160 km.h^{-1} do 200 km.h^{-1} a ve variantě ERL 17,5 s přibližnou hodnotou tuhosti $17,5 \text{ kN.mm}^{-1}$ doporučené pro rychlosti vyšší než 200 km.h^{-1} . [62]



Obr. 31 Řez systémem upevnění ERL z produktového listu. [62]

2.2.2 Dosavadní vývoj zpružněných výhybek v DT

V souvislosti s vložením zahraničních výhybek zpružněných v uzlu upevnění bylo snahou českého dodavatele výhybek DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. (tč. DT – Výhybkárna a mostárna, s.r.o.) vyvinout obdobný způsob řešení zpružněného upevnění do výhybek. Za tímto účelem vznikl první výzkumně-vývojový projekt zaměřený na tuto problematiku, který byl od roku 2001 do roku 2003 v řešení. [63] Výsledné návrhy zpružněného upevnění vyvinuté během tohoto projektu nezahrnovaly diskontinuity v tuhosti po délce výhybky a bylo pouze dosaženo zpružnění o přibližně stejné tuhosti ve všech uzlech upevnění. Z hlediska konstrukčního řešení se jednalo v zásadě o několik variant zpružnění pomocí pružné pryžové podložky pod podkladnici obdobným způsobem jako byly provedeny zpružněné výhybky BWG. Jedna z variant vyvinutého uzlu upevnění je uvedena níže (obr. 32). Vyvinuté řešení ale z ekonomických důvodů zůstalo pouze u konstrukčního návrhu a nebyla vyrobena žádná výhybka obsahující tento typ uzlu upevnění k provoznímu ověření ani k laboratorním zkouškám. Řešení bylo odsunuto až do doby, než začne přicházet v úvahu aplikace zpružněného upevnění výhybek uložených na pevné jízdní dráze.



Obr. 32 Ukázka prvních možností návrhu zpružněného upevnění do výhybky z roku 2003 (dvě navržené varianty). [63]

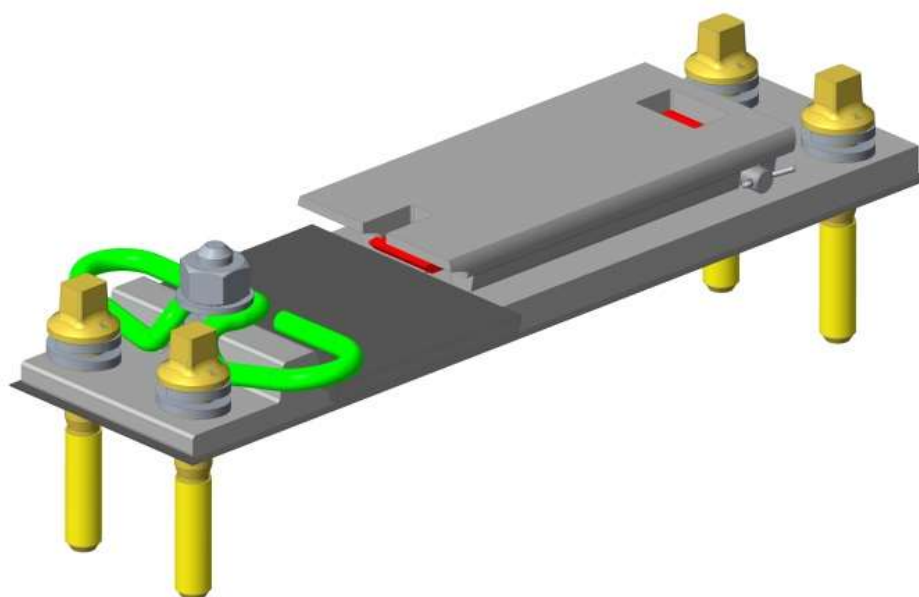
Potřeba vývoje výhybky se zpružněním v upevnění ale v DT přetrvávala dále, a proto bylo hned v roce 2003 započato s dalším navazujícím projektem, který ale problematiku neposunul v zásadě nikam dále, a následně v roce 2007 začal již třetí projekt [64–66] zabývající se touto problematikou, který myšlenky získané v předcházejících projektech dále rozvíjel. Během řešení tohoto projektu byl vyvinut systém upevnění PoRoP (viz obr. 33) a rovněž byly vyvinuty první varianty možnosti změny příčné polohy nainstalovaného systému upevnění, což vyžaduje aplikace

systemů upevnění na pevnou jízdní dráhu. Významným rozdílem oproti předchozím projektům DT bylo, že jako první již od začátku řešení uvažoval s potřebou výpočtového modelování pro zjištění tuhosti kolejové jízdní dráhy po délce standardní výhybky na betonových pražcích uložené ve šterkovém kolejovém loži a s potřebou systémů upevnění optimalizovaných na konkrétní hodnoty tuhostí.



Obr. 33 Systém upevnění PoRoP (*podkladnice s rozvinutelnou podložkou*). [66]

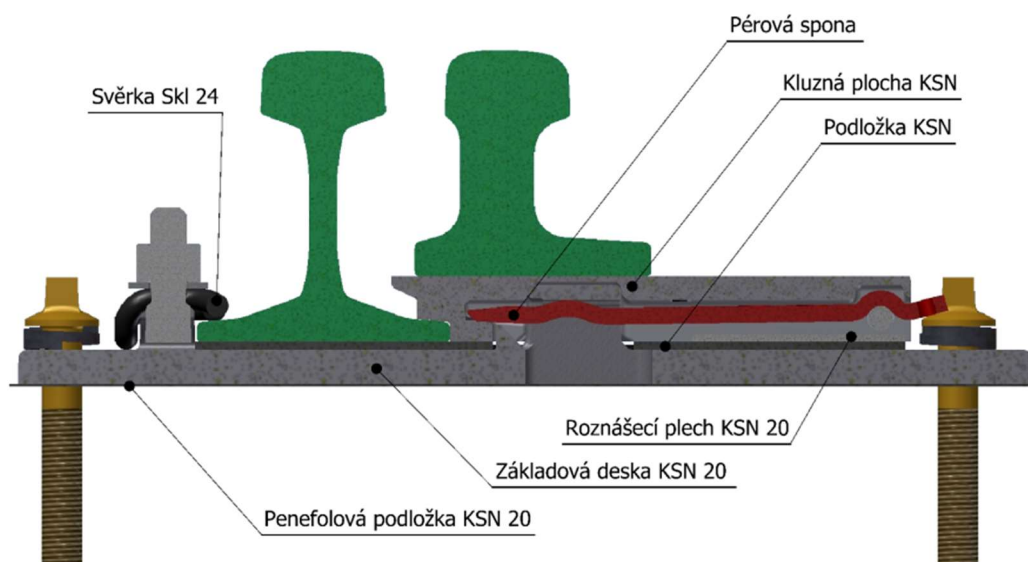
V roce 2011 byl řešen projekt, viz [46–49], díky kterému mohlo být toto řešení dotaženo do konce, a v roce 2014 byly vyrobeny první dvě výhybky se zpružněním v uzlu upevnění k provoznímu ověřování u SŽ (podrobně dále viz kap. 4.1).



Obr. 34 Standardní kluzná stolička s přivařenou kluznou plochou k základové desce a s pružnou podložkou pouze v místě paty opornice

Především z ekonomického hlediska, které je důležité pro uplatnění dalších výhybek na trhu, bylo zpružnění prvotně navrženo jen tam, kde byly zjištěny největší diskontinuity v tuhosti po délce výhybky. Jedná se tedy o část výměnovou (oblast kluzných stoliček) a část srdcovkovou (oblast pod odlitkem srdcovky a přípojnými kolejnicemi). Řešení nevylučuje následně aplikovat vyvinuté uzly upevnění po celé délce výhybky, resp. použít obdobný systém pro upevnění na pevnou jízdní dráhu.

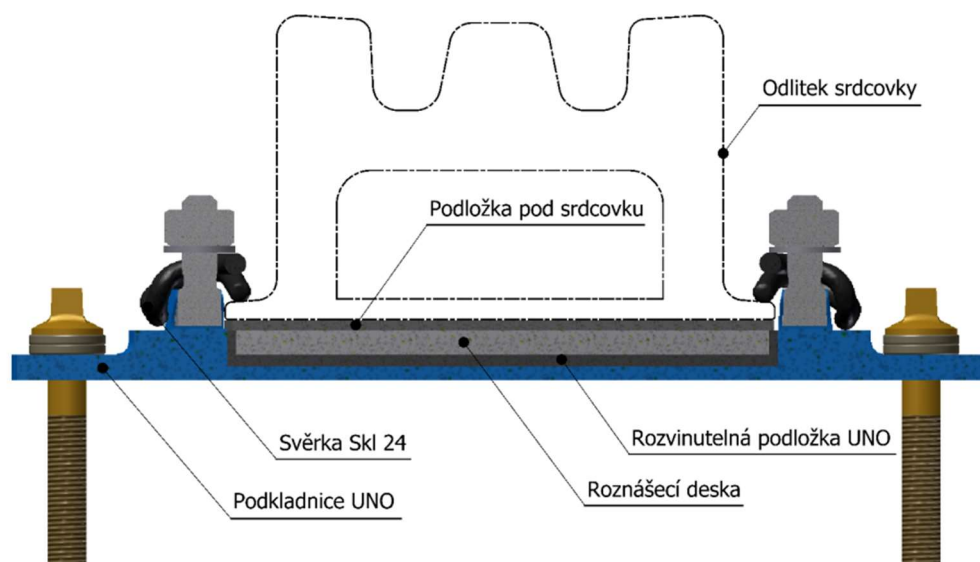
Standardně dodávaná kluzná stolička má kluznou plochu přivařenou k základové desce podkladnice (obr. 34), a tudíž je pohybující se jazyk uložen velmi tuze, jelikož se pod ním nenachází již žádný pružný prvek. Při přechodu kola z opornice (pod níž je pružná podložka pod patu kolejnice) na jazyk dojde tedy k výraznému téměř skokovému nárůstu tuhosti. Tento problém vyřešila vyvinutá kluzná stolička typu KSN 20 (viz obr. 35). Kluzná deska byla zkonstruována jako odnímatelná a pomocí perové spony pružně uchytitelná tak, aby bylo možno pod ni vložit pružný prvek, díky kterému je jazyk i s opornicí uložen nyní pružně.



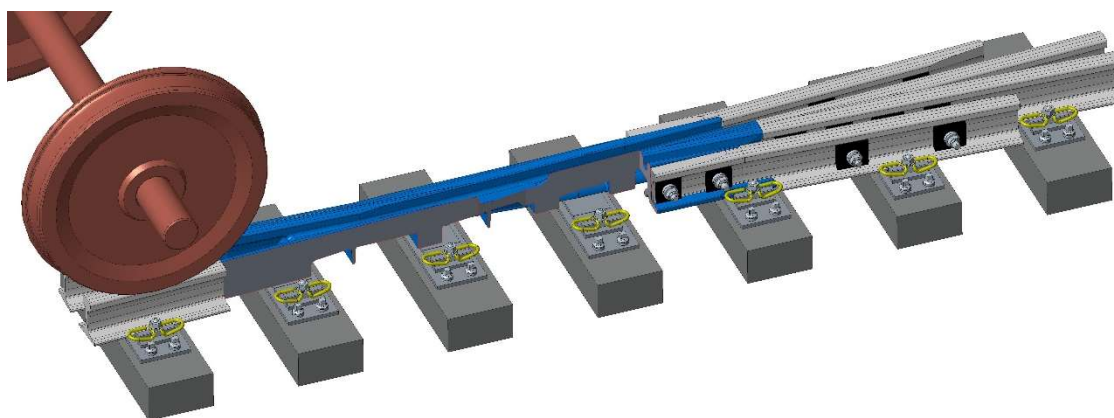
Obr. 35 Zpružněná kluzná stolička KSN 20 s odnímatelnou kluznou plochou umístěnou na pružné podložce, srov. s předchozím obrázkem (obr. 34). [7]

Druhým uzlem upevnění, který vyžadoval dle výsledků výpočtového modelování zpružnit, bylo upevnění odlitku srdcovky (viz obr. 36). Výsledkem byl zpružněný systém upevnění UNO 3718 (resp. UNO X; X nahrazuje číslo specifické podkladnice do konkrétního místa pod srdcovku lišící se pouze vzdáleností mezi žebry podkladnice, UNO – zkratka žel. stanice, kde byl uzel upevnění poprvé použit – Ústí nad Orlicí). V tomto systému upevnění bylo navrženo řešení s rozvinutelnou podložkou pod roznášecí desku. Ta plní důležitou funkci v případě, kdy odlitek srdcovky nemá nálitky v místě podkladnic (čemuž je tak např. u odlitků srdcovek ze

Slévaren Třinec, a.s.), viz obr. 37. V uvedeném případě roznášecí deska zajišťuje stále stejnou kontaktní plochu působící na pružnou rozvinutelnou podložku. Dále se zde vyskytuje také tuhá pryžová podložka, která má v tomto případě hlavně funkci separační, aby ocelový odlitek srdcovky neležel přímo na ocelové roznášecí desce.



Obr. 36 Zpružněný systém upevnění pod odlitek srdcovky UNO X. [7]



Obr. 37 3D řez odlitkem srdcovkou ZMB 3, kde je patrná poloha žeber a nálitků, která nekoresponduje s polohou podkladnic.

2.2.3 Zpružněné systémy upevnění používané v pražském metru

V pražském metru je velmi hojně rozšířena pevná jízdní dráha a všechny nově budované traťové úseky jsou stavěny výhradně s konstrukcí pevné jízdní dráhy včetně kolejových spojení a rozvětvení. Vzhledem k tomu, že pevná jízdní dráha vyžaduje zpružněné upevnění, byl vyvinut dvoupatrový systém (viz obr. 38) odvozený z konstrukce používané v budapeštském metru. Tento systém upevnění byl

primárně navrhnut a používán zejména ve výhybkách a v obloucích o malém poloměru (méně než 600 m) [67]. Vzhledem k jednoduché možnosti úpravy příčné polohy záměnou plastových vymezovacích vložek a k dobrým zkušenostem je v posledních letech užíván tento systém upevnění plošně ve všech traťových úsecích i mimo kolejová spojení a rozvětvení a oblouky o malém poloměru. DPP⁶ nazývá interně toto upevnění vzhledem ke své robustnosti jako „těžké“, zatímco jako „lehké“ upevnění je označován podkladnicový systém upevnění s vloženou pružnou podložkou pod žebrovou podkladnicí, který se podobá systému upevnění Vossloh 336 (viz kap. 2.3.1) a který byl původně používán do traťových úseků běžné koleje a oblouků o velkých poloměrech. Podložka používaná v pražském metru je buď pryžová (výrobce Gumárny Zubří) nebo v případě problémů s vibracemi je používána podložka z materiálu Sylodyn® NE (výrobce Getzner, podrobněji viz kap. 2.4.3). Tento systém upevnění je možno bez výraznějších problémů přizpůsobit jakémukoli podkladnici. Výhybky dodávané pro pražské metro jsou opatřeny běžným podkladnicovým upevněním KS⁷ a teprve při instalaci jsou podkladnice přizpůsobeny pro „obutí“ do tohoto systému upevnění (zkráceny a na horní ploše zfrézovány vnější okraje podkladnic).



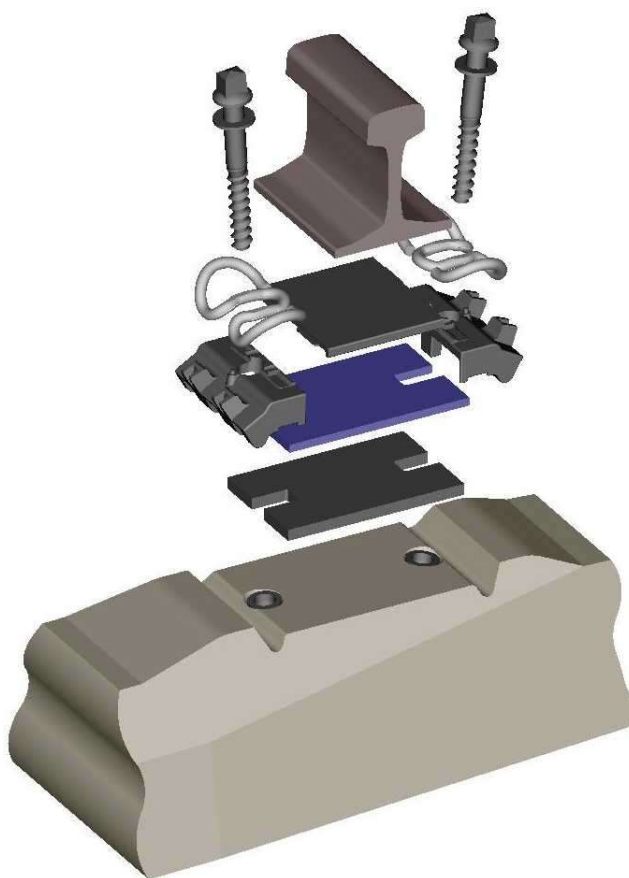
Obr. 38 Dvoupatrový zpružněný systém upevnění používaný v pražském metru. Pod žebrovou podkladnicí je patrná profilovaná pryžová pružná podložka, modrý plastový prvek pod ramínky vnější svěrky Skl Aekp má izolační funkci a pod touto svěrkou je ještě patrná bílá plastová vymezovací vložka sloužící pro úpravu příčné polohy kolejnice.

⁶ DPP – Dopravní podnik hl. města Prahy, a.s.

⁷ KS – označení standardního podkladnicového nepřímého upevnění s žebrovou podkladnicí a pružnou svěrkou Vossloh Skl12 nebo Skl24.

2.2.4 Zpružněné systémy upevnění běžné koleje – Vossloh E14

V běžné koleji se rovněž vyskytují místa, která je vhodné zpružnit. Jedná se často např. o oblasti s tužším pražcovým podložím např. v místech podchodů ve stanici, kde není dostatečná tloušťka kolejového lože (žst. Kolín), nebo v místech, kde je vhodné zpružnit kolej z jiného důvodu (např. oblouk o malém poloměru před okrouhlickým zhlavím v žst. Havlíčkův Brod v souvislosti s prevencí výskytu skluzových vln). Standardně používaný bezpodkladnicový systém upevnění Vossloh W14 lze pak nahradit systémem upevnění Vossloh E14 (viz obr. 39), který je plně kompatibilní s vyráběnými pražci B91S/1 i B91S/2 pro upevnění W14. Systém upevnění E14 má oproti systému upevnění W14 následující odlišnosti. Pod patou kolejnice je umístěna místo pružné podložky pod patu kolejnice zcela tuhá plastová podložka, která má pouze separační funkci. Ta spočívá na ocelové roznášecí desce, pod kterou je následně umístěna pružná podložka z materiálu Cellentic®, ve které se realizuje veškerá pružnost systému upevnění. Vzhledem k tomu, že je systém upevnění E14 vyšší než W14, je rovněž nutné použít odlišné úhlové vodicí vložky, které jsou adekvátně vyšší. Svěrky a ostatní komponenty jsou pak již zaměnitelné mezi oběma systémy upevnění. [57]



Obr. 39 Zpružněný bezpodkladnicový systém E14 pro běžnou kolej výrobce Vossloh. Modře obarvena ocelová roznášecí deska a pod ní je pružná podložka z materiálu EPDM Cellentic®. [57]

2.2.5 Podpražcové podložky

Další zcela odlišnou možností, jak globálně zpružnit výhybku či běžnou kolej a řídit či optimalizovat tuhost koleje jsou podpražcové podložky (USP⁸). Na rozdíl od zahraničního hojného používání podpražcových podložek se v tratích v České republice zatím vyskytují podpražcové podložky pouze ve zkušebních úsecích, ale postupem času dochází k postupnému rozšiřování. Zahraniční zkušenosti hovoří, že použití podpražcových podložek má mnoho pozitivních vlastností. Jednak zvyšují kontaktní plochu zrn kolejového lože s pražcem (z 5 až 8 % bez USP až na 30 až 35 % s USP), čímž dochází k dlouhodobějšímu udržení stálých GPK⁹. Dále je podpražcovými podložkami zvýšena pružnost kolejového roštu, což přispívá ke snížení vibrací a rovněž tato vlastnost potlačuje rozvoj skluzových vln v obloucích malých poloměrů. [11, 68–71] Právě možnost změny tuhosti kolejového roštu lze použít i v případě optimalizace tuhosti kolejové jízdní dráhy po délce výhybky jako alternativu zpružnění v uzlu upevnění. Současní výrobci podpražcových podložek (Getzer [72], Angst-Pfister [73, 74], Müller [75]) dodávají podpražcové podložky různých tuhostí, čímž je možné pohodlně navrhnout rozložení tuhostí po délce výhybky. Rozložení tuhostí po délce výhybek standardních geometrií bylo i výsledkem projektu Technologické agentury ČR „Pražce s pružnou ložnou plochou“. [36]

Podpražcová podložka je pružná deska, která je umístěna ze spodní, tedy ložné plochy pražce, se kterým je pevně spojena. Standardně používanými materiály je polyuretan, pryž či materiál EVA. Podpražcové podložky jsou zpravidla na pražce buď lepeny, nebo v lepším případě zavibrovávány do čerstvého betonu při výrobě pražce. Tloušťka podložky je obvykle 10 až 15 mm a podložka se skládá až ze 3 vrstev. První, horní vrstvou (dle orientace pražce instalovaného v trati) je mřížkovina, která je propojena s betonem pražce. Tato mřížkovina je použita v případě zavibrování podložky. Dále následuje samotná pružná deska. V případě měkčích podložek se pak ještě používá ochranná vrstva, se kterou přichází do kontaktu šterk kolejového lože. [5]

V České republice je několik zkušebních úseků s podpražcovými podložkami jak v běžné koleji, tak ve výhybkách. V běžné koleji se jedná např. o oblouk před okrouhlíckým zhlavím v žst. Havlíčkův Brod, kam tyto podložky byly instalovány z důvodu potlačení rozvoje skluzových vln a v důsledku toho za účelem snížení vibrací a hluku (porovnávány se zpružněným upevněním E14 ve vedlejší koleji, viz kap. 2.2.4). Ve výhybkách byla první aplikace v roce 2007 ve výhybce č. 12 v žst. Planá

⁸ USP – Under Sleeper Pad (běžně používaná zkratka pro podpražcovou podložku).

⁹ GPK – geometrické parametry koleje, viz ČSN 73 6360-1.

nad Lužnicí a následovala instalace do výhybek č. 7 a č. 8 do žst. Ústí nad Orlicí v roce 2014. Všechny zkušební úseky byly sledovány a proběhla zde mnohá měření a vyhodnocení. [76, 77]



Obr. 40 Podpražcové podložky instalované na ložnou plochu pražce. [78]

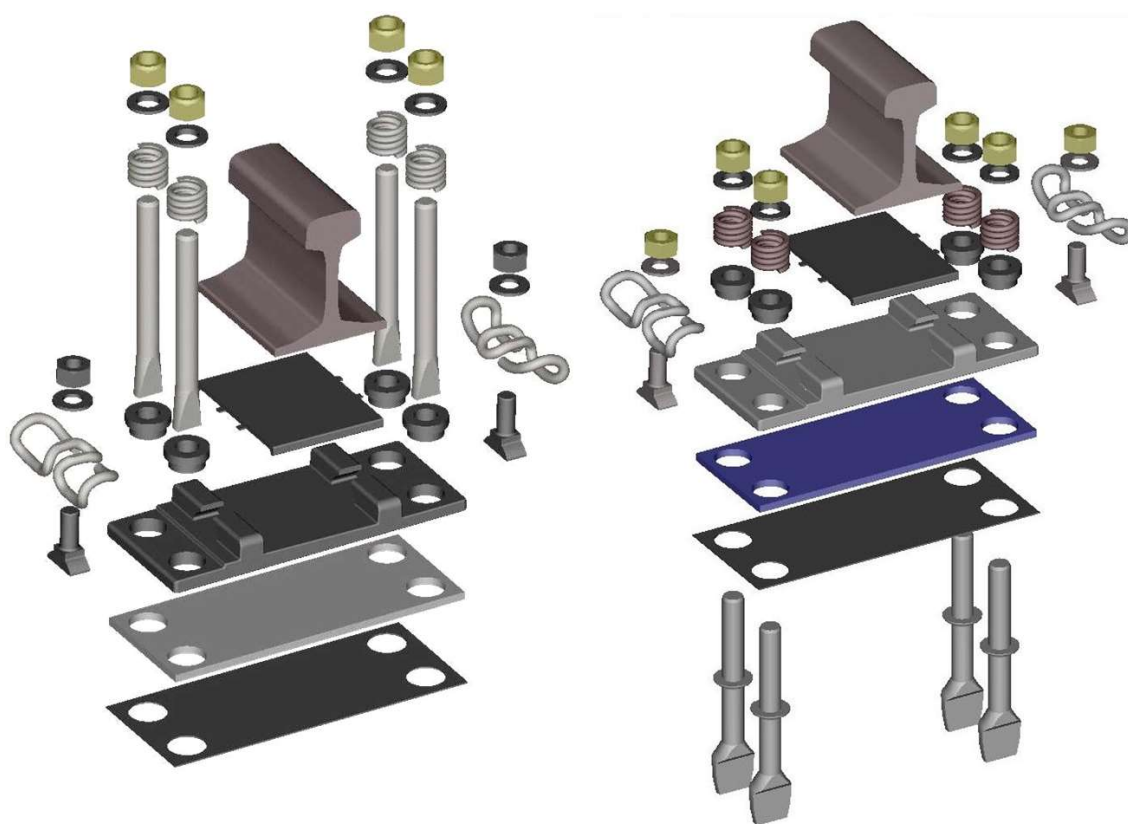
2.3 SOUČASNÝ STAV V OBLASTI TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ – ZAHRANIČNÍ APLIKACE

Existuje celá řada zahraničních výrobců, kteří vyrábějí systémy upevnění. V následujících podkapitolách jsou uvedeny jen nejzajímavější výrobky vzhledem k popisované problematice, tzn. systémy upevnění, které jsou zpružněné a které lze použít do výhybek.

2.3.1 Vossloh

Firma Vossloh Fastening Systems GmbH je jeden z nejznámějších dodavatelů komponentů systémů upevnění rovněž v České republice, což značí i mnohé zmínění této firmy již v předchozím textu. V dnešní době jsou naprostou samozřejmostí svěrky Vossloh používané do bezpodkladnicových systémů upevnění (Skl 14, vč. celého upevnění W 14) či svěrky do systémů upevnění s podkladnicemi (Skl 12, Skl 24, Skl Aekp atd.). Vossloh nicméně dodává mnoho dalších systémů upevnění, a to i zpružněných, které jsou většinou určeny pro aplikace na pevné jízdní dráhy, včetně systémů upevnění do výhybek.

Co se týče zpružněných podkladnicových systémů, nabízí firma Vossloh systém upevnění Vossloh 336. Jedná se v zásadě o systém upevnění, který vychází ze standardního systému upevnění KS s následujícími úpravami. Otvory pro vrtule jsou větší, aby se do nich vlezla centrická či excentrická vymezovací vložka (otáčením excentrické vložky je dosaženo směrové úpravy polohy kolejnice). Vzhledem k tomu, že se instalace očekává na PJD, není zde uvažováno použití pražcových šroubů či vrtulí, ale kotev. Zásadní změnou je umístění pružné podložky pod podkladnici, což vyžaduje použití spirálové pružiny pod maticí kotvy, aby při stlačování uzlu upevnění v okamžiku průjezdu vozidla byl zajištěn stálý přtlak na matici a nedocházelo k rázům a uvolňování matic. Vzhledem k tomu, že se jedná o podkladnicový systém, není v tomto případě žádný problém s aplikací do výhybek.



Obr. 41 Systém upevnění Vossloh 336 ve variantě pro PJD stavěnou systémem „bottom up“ (vlevo) a „top down“ (vpravo). U obou systémů upevnění je instalována pružná podložka pod podkladnici.

[57]

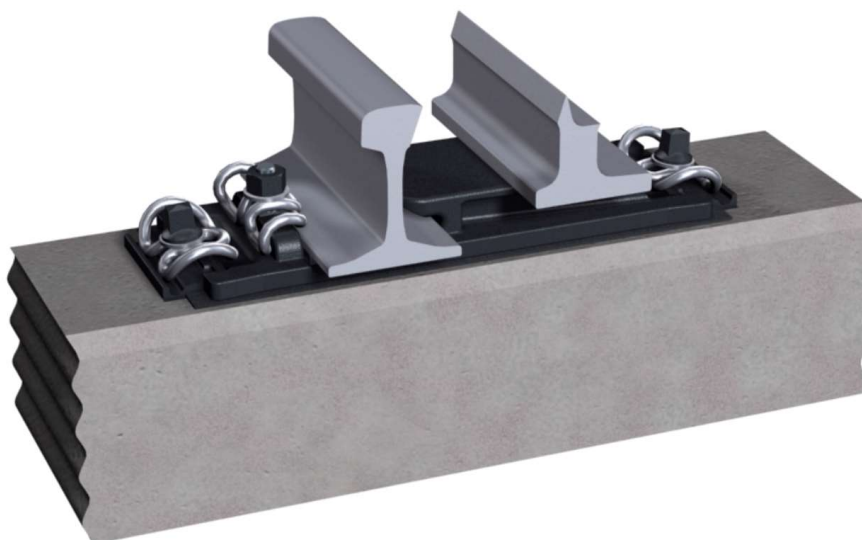
Vossloh vyrábí tento systém upevnění ve dvou mírně se lišících variantách – pro pevnou jízdní dráhu stavěnou systémem „bottom up“, tzn. zřizovanou odspodu směrem nahoru, tedy že nejprve je zhotovena nosná deska PJD a až následně probíhá instalace koleje a kolejových objektů. Do desky jsou pak zhotovovány vývrty pro vlepení kotev v místech otvorů podkladnic. Druhou možností je opačný způsob, a to

„top down“, tzn. zřizování shora směrem dolů. Nejprve je provedeno ustavení kolejí a kolejových objektů do správné výškové a směrové prostorové polohy i s předem nainstalovanými uzly upevnění a až následně dojde k vylití čerstvého betonu a zhotovení nosné desky PJD. [57]

Vossloh rovněž nabízí alternativu bezpodkladnicového upevnění W 14, u nás známé pouze z použití v běžné koleji, i v úpravě pro výhybky (viz obr. 42). Tento systém upevnění je označován jako W 21 T. Některé abnormální systémy upevnění (např. kluzná stolička) v tomto případě vyžadují stále použití podkladnice, což pak vede na dvoupatrové uchycení (viz obr. 43). V případě použití systému upevnění W 21 T do výhybek je potřeba, aby výhybkové pražce měly mimo zabudované hmoždinky i speciálně tvarované žlábkové pro vložení úhlových vodicích vložek.



Obr. 42 Upevnění W 21 T ve výhybce. [57]



Obr. 43 Kluzná stolička s upevněním Vossloh W 21 T. [57]

Vossloh nabízí také zpružněné upevnění do výhybek uložených na pevné jízdni dráze. Jedná se konkrétně o systém upevnění 300 W (viz obr. 44). Již podle názvu je patrné, že tento systém upevnění vychází ze systému upevnění Vossloh 300 používaný na pevné jízdni dráze. Vzhledem ke své modularitě je možné použití i ve výhybkách, a to jak na pevné jízdni dráze, tak na výhybkách instalovaných na pražcích ve šterkovém kolejovém loži.



Obr. 44 Zpružněný systém Vossloh 300 W pro výhybky [57]

2.3.2 Pandrol

Britská firma Pandrol je v České republice známa především bezpodkladnicovým pružným upevněním FastClip, které bylo použito jako alternativa upevnění Vossloh W 14 na pražcích B 91 S/P (dříve ozn. B 91 S/5), a rovněž díky sponě Pandrol „e“, která byla používána společně s adaptérem do podkladnicových systémů upevnění označovaných jako „Ke“ v rámci výhybek a do upevnění výhybkových pražců mezi výhybkami. V současné době se od těchto systémů upevnění u SŽ upouští a dává se přednost komponentům firmy Vossloh.

Tento výrobce vyvinul také zpružněné systémy upevnění aplikovatelné i do výhybek, které lze použít na pevnou jízdni dráhu i jako zpružněný uzel upevnění do koleje se šterkovým kolejovým ložem. Jedná se konkrétně o systém DFC (Double FastClip). Tento systém upevnění byl použit např. ve výhybce na šterkovém kolejovém loži instalované na vysokorychlostní trati v Norsku. Je možné vyrobit různé tuhosti tohoto systému upevnění (dle použité podložky). [79]



Obr. 45 Systém Pandrol DFC použitý jako kluzná stolička ve výhybce. [79]



Obr. 46 Systém Pandrol DFC se sponami FC i „e“ ve výhybce instalované na PJD. [79]

2.3.3 Delkor

Zcela odlišný způsob zpružnění, tzv. Delkor Egg, vyvinula firma Delkor (v licenci dnes vyrábí i jiné firmy, např. Vossloh, Ortec). Jedná se v zásadě o podkladnicový systém upevnění, který má speciální podkladnice ve tvaru elipsy s žebry a tato podkladnice je přes vulkanizovanou pryž upevněna do spodního nosného prvku (viz obr. 47 a obr. 48). Vzhledem k tomu, že horní díl je v podstatě žebrová podkladnice, je možné tento systém upevnění jednoduše aplikovat i do výhybek. Horní část může být vyrobena zcela bez problému jako kluzná stolička, podkladnice k přídržnici či jiný abnormální systém upevnění dle potřeby a spodní díl zůstává stále stejný. Firmy rovněž pro tyto účely nabízí několik různých délkových variant spodního nosného prvku. Obrovskou výhodou tohoto systému upevnění je jeho dokonalá elektrická izolace, jelikož horní deska je zcela obklopena pryží. Další

2.3.4 Schwihag

Zpružněná kluzná stolička typu ERL 30-P, kterou nabízí firma Schwihag, se konstrukčně velmi podobá v DT vyvinuté kluzné stoličce KSN 20 (viz kap. 2.2.2). Je zde rovněž odnímatelná kluzná plocha, pod kterou je umístěna pružná podložky, čímž je docíleno stejně tuhému přechodu kola z opornice na jazyk. Tato kluzná stolička navíc disponuje zpružněním podložkou pod podkladnicí. [81, 82]



Obr. 49 Zpružněná kluzná stolička od firmy Schwihag. [81, 82]

2.3.5 Pružné uložení pražců v konstrukci PJD

Alternativou k podpražcovým podložkám popsaným v kap. 2.2.5 v případě pevné jízdní dráhy je pružné uložení pražců do betonového podkladu. Tato konstrukce umožňuje použití standardních systémů upevnění běžně používaných pro konvenční výhybky určené pro konstrukci koleje se šterkovým kolejovým ložem. Požadovaného zpružnění se dosáhne vložením pružného prvku mezi pražec a podkladní betonové lože. V tomto případě je pak filosofie návrhu pružných prvků velmi podobná filosofii návrhu podpražcových podložek pro výhybky. Tato konstrukce je velmi hojně používána např. ve vídeňském metru, viz obr. 50. Výhodou této konstrukce je bezesporu použití standardního svrškového materiálu a jednoduchost.



Obr. 50 Konstrukce PJD ve vídeňském metru vč. patrného obvyklého upevnění „K“ a zpružnění pražců v uložení.¹⁰

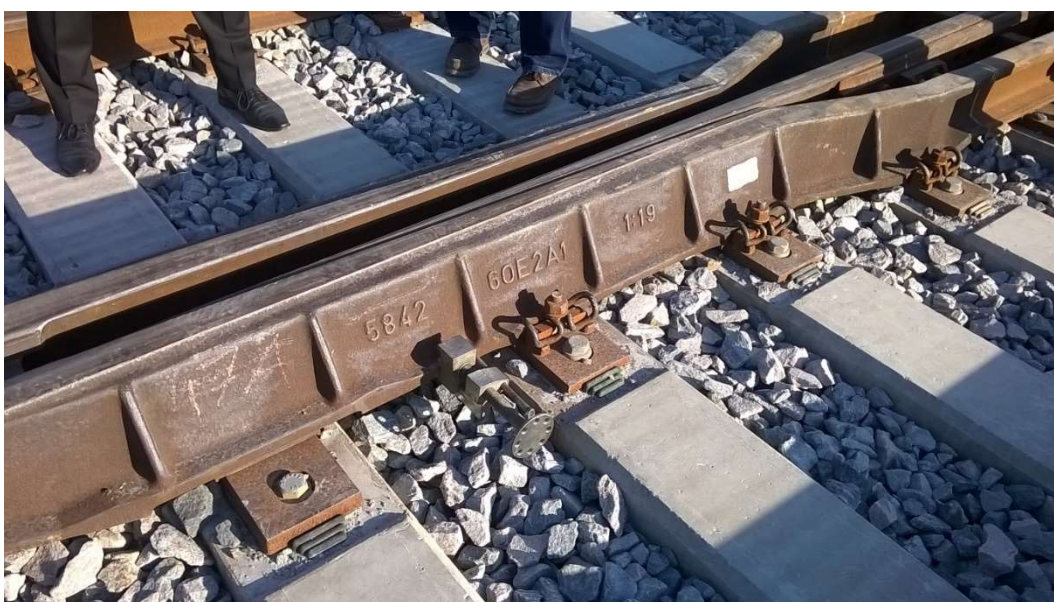
2.3.6 Příklad reálné vysokorychlostní výhybky

V září v roce 2017 byly v rámci sympózia Intelliswitch prohlédnuty vysokorychlostní výhybky vložené do nově stavěné vysokorychlostní trati v Dánsku (úsek Kodaň – Ringsted) v žst. Køge Nord Station. Prohlédnutá výhybka byla tvaru J60-1:19-1200-PHS a byla vyrobena v listopadu 2016 podnikem Voestalpine Weichensysteme GmbH Zeltweg. Výhybka byla vložena do koleje se štěrkovým kolejovým ložem a dle podaných informací byla dokonce vybavena podpražcovými podložkami i zpružněním v upevnění ve všech uzlech po délce výhybky, což je velkorysé a výjimečné řešení. Byly použity všechny systémy upevnění zpružněné podložkou pod podkladnicí. Zajímavá byla rovněž použitá kluzná stolička se zpružněnou kluznou plochou od firmy Schwiag (viz kap. 2.3.4). Na výhybce bylo jasně vidět, že zpružňování v uzlu upevnění je budoucností konstrukce výhybek pro vysoké rychlosti, a to i při použití výhybek ve štěrkovém kolejovém loži.

¹⁰ Zdroj ilustrativního obrázku: <http://www.theschwarzfahrer.com/3rd-man-tour/>



Obr. 51 Kluzná stolička firmy Schwing se zpružněnou kluznou plochou a se zpružněním ještě i pod podkladnicí.



Obr. 52 Zpružněné systémy upevnění v oblasti srdcovky s pohyblivými hroty.

2.4 MATERIÁLY PRUŽNÝCH PRVKŮ

Pružné prvky v konstrukci železničního svršku jsou v dnešní době zcela nepostradatelné. Lze ale podotknout, že pružné prvky se nevyskytovaly v konstrukci koleje historicky od začátku vzniku klasické konstrukce koleje. První snaha o zpružnění paty kolejnice byly přibližně na začátku 20. století, kdy se do systémů upevnění začaly vkládat dřevěné destičky. [83] Teprve až v souvislosti s pokrokem materiálů v oblasti gumárenství se přišlo s konstrukčním návrhem systému upevnění, v němž byly použity pryžové podložky pod patu kolejnice. Od vzniku moderních systémů upevnění s pružnými svěrkami (např. W14 firmy Vossloh) a jejich hojnějšího

pronikání do železničního svršku se začínají do popředí dostávat i jiné moderní pružné materiály než dříve hojně používaná pryž. V dnešní době se velice často používají různé zpěněné plasty, např. polyuretany. U těchto moderních prvků je nepostradatelnou výhodou možnost výroby tuhosti podložky téměř dle přání zákazníka, pokud není nalezen vhodný materiál z mnohých standardních materiálů. Stojí také za zmínku, že někteří výrobci dodávající pružné prvky pro železniční sektor se snaží o recyklaci pryže (např. z použitých pneumatik) a dodávají podpražcové podložky nebo podložky pod patu kolejnice nebo pod podkladnice, což lze z hlediska životního prostředí vnímat pozitivně.

2.4.1 Pryž

Pryž přichází v úvahu při vývoji systémů upevnění obvykle jako první tradiční alternativa. Jedná se o materiál, se kterým jsou v aplikacích pro systémy upevnění bohaté zkušenosti a jedná se rovněž o poměrně levný materiál. Výrobci pryžových podložek pro železniční sektor je v České republice celá řada, mezi tradiční bychom mohli zařadit např. Renogum (nyní QWERT, a.s.), Gumárny Zubří, Rubena. Proto byl i v rámci vývoje v prvních fázích zvolen pro podložky tento materiál. Výhodou pryže je jejich relativně jednoduchá výroba, jejíž podstatou je lisování pryžového granulátu pod tlakem do formy. Nevýhodou pryže je, že se hůře ovlivňuje tuhost výsledného materiálu (resp. modul pružnosti), což lze částečně obejít tvarovým návrhem. Nicméně je nutno zmínit hlavní nevýhodu pryže, a to je výrazné stárnutí vlivem času a rovněž ztráta pružných vlastností vlivem provozu (vlivem cyklického dynamického namáhání). Jako výhodu lze uvést poměrně dobrou recyklovatelnost, která se v posledních letech dostává do popředí.

2.4.2 Vossloh Cellentic®

Vzhledem k výše uvedeným nedostatkům se pro materiály pružných prvků do konstrukce koleje začínají dostávat materiály na jiné bázi než pryže. Jedním z nabízených novějších materiálů je zpěněný elastomer EPDM¹¹, který nabízí firma Vossloh pod obchodní značkou Cellentic®. Tento materiál byl zkušebně použit jak do kluzné stoličky KSN 20, tak jako rozvinutelná podložka do systému upevnění UNO pod srdcovky. Oproti pryži má tento materiál obrovskou výhodu v tvarovém i tuhostním přizpůsobení požadavku, tzn. že lze půdorysně vyrobit jakýkoliv tvar a tuhost je možno dle požadavku vyrobit v udávané toleranci 20 %. Velkou výhodou oproti pryži je také poměr statické a dynamické tuhosti, který je udáván hodnotou 1,1. Výrobce také deklaruje vysokou časovou stálost mechanických vlastností. Z hlediska údržby tedy lze jednoznačně doporučit tento materiál, nicméně, jak lze předpokládat,

¹¹ EPDM – etylen propylen dien monomer

podložka vyrobená z tohoto materiálu je poměrně dražší. V procesu výroby vznikají v tomto materiálu mikropóry, kterými je dána pružnost, a díky těmto mikropórům dochází při stlačení k minimální prostorové deformaci, jak dokazuje následující obr. 53. [57, 84]



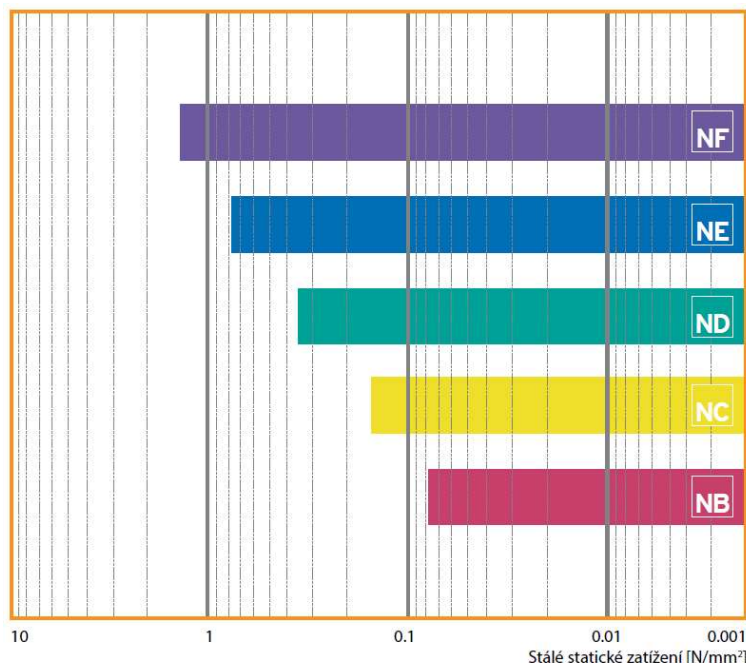
Obr. 53 Demonstrace rozdílu materiálu Cellentic® při stlačení oproti pryži. [57, 84]

2.4.3 Getzner Sylodyn®

Rakouská firma Getzner Werkstoffe GmbH se již dlouhou dobu zabývá vývojem pružných prvků v železničním sektoru. Z hlediska konstrukce koleje nabízí firma nejen podložky pod patu kolejnice, které mohou být alternativou ke standardním pryžovým podložkám, ale také podložky pod podkladnice, podložky do zpružněných systémů upevnění (např. viz systém upevnění pražského metra). Firma je dále velice známá jakožto dodavatel podpražcových podložek. Z hlediska pražcového podloží nabízí firma také řešení pro mass-spring systémy a podšterkové rohože. [72]

Pro výše uvedené aplikace má firma vyvinuty materiály označované jako Sylodyn®, případně také Sylomer®. Pro aplikace do systémů upevnění je použitelnější materiál Sylodyn®, který má lepší dynamické vlastnosti. Z hlediska materiálu samotného se jedná o elastomer s uzavřenými póry, který neabsorbuje vodu. Mimo železniční sektor se materiál také používá v pozemním stavitelství (izolace kročejového hluku), uložení pro stroje ve výrobních halách apod. Poměr mezi dynamickou a statickou tuhostí udává výrobce dle konkrétního typu od 1,15 do 1,40. [85] Výrobce má standardní řadu materiálů, které se liší svými materiálovými charakteristikami, především dlouhodobým statickým zatížením [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$] a moduly pružnosti (ve smyku/v tahu; statický/dynamický). Jednou z nejdůležitějších

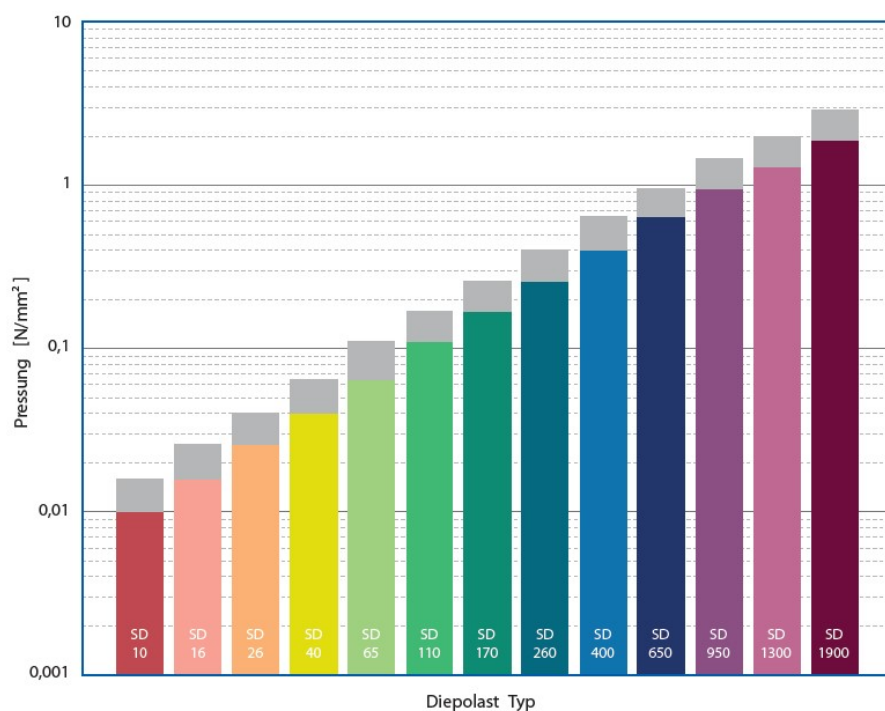
charakteristik pro návrh systémů upevnění je dynamický modul pružnosti v tahu, který se u standardních materiálů níže (tzv. NB až NF) pohybuje od 0,90 do 15,2 N.mm⁻². Základní rozdělení z hlediska stálého statického zatížení je uvedeno na obr. 54 a další informace jsou k nalezení v technických listech výrobce [86].



Obr. 54 Standardní typová řada materiálů Sylodyn®. [86]

2.4.4 P+S Diepolast®

Podobné výrobky jako výše uvedená firma Getzner má rovněž firma P+S Polyurethan Elastomere GmbH, která nabízí produkt Diepolast®. Jedná se o mixovaný buněčný elastomer založený na bázi polyetherů. Vlastnosti a oblast použití jsou velice podobné Sylodynu® firmy Getzner, tedy odhlučnění strojů, zvukotěsné podlahy apod. Tento materiál nemá dosud příliš mnoho aplikací v železničním sektoru, ale zdá se, že řada Diepolast® dyn HL určená pro vyšší zatížení by mohla být docela dobře použitelná pro pružné prvky používané v konstrukci koleje. Výrobce rovněž deklaruje možnost použití pod vodou, jelikož buněčná struktura eliminuje nasákavost kapalin. [87] Standardní řada materiálů řady Diepolast® je uvedena na následujícím obr. 55 (opět dle dlouhodobého statického zatížení). Moduly pružnosti v tahu se pak u jednotlivých typů (SD10 až SD1900) pohybují od 0,144 N.mm⁻² do 78,2 N.mm⁻². [88]



Obr. 55 Standardní typová řada materiálů Diepolast® [88]

2.5 SOUČASNÉ POŽADAVKY NA SYSTÉMY UPEVNĚNÍ KOLEJNICE NA PODPOŘE

Základní požadavky na systémy upevnění jsou dány vícero předpisy. Základním předpisem, který je i závazným, jsou *Technické specifikace pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii (TSI)*. [89] Dále jsou dány požadavky evropskými normami ČSN EN 13 481 *Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění* [90] a související normou ČSN EN 13 146 *Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění* [91], kde je uvedeno, jaké mají být použity metodiky pro laboratorní zkoušení systémů upevnění. Pokud se jedná o vložení nových systémů upevnění do sítě Správy železnic, je nutné přirozeně splnit i požadavky dané jejími předpisy. V této věci jsou nejvíce relevantními předpisy *SŽDC S3 Železniční svršek* [92] a *SŽDC S9 Pevná jízdní dráha* [93], budeme-li uvažovat použití zpružněných systémů upevnění v rámci pevných jízdních drah.

2.5.1 Požadavky vycházející z TSI

Systém upevnění kolejnic musí v laboratorních zkušebních podmínkách splňovat tyto požadavky:

- podélná síla potřebná k tomu, aby kolejnice začala prokluzovat (tj. nepružně se pohybovat) skrze jednotlivé uzly upevnění kolejnice, musí být alespoň 7 kN, a pro rychlosti větší než 250 km.h⁻¹ musí být alespoň 9 kN;

- upevnění kolejnice musí odolat 3 000 000 cyklům typického zatížení v oblouku malého poloměru tak, aby se svěrná síla a odpor proti podélnému posunutí kolejnice nezhoršily o více než 20 % a svislá tuhost o více než 25 %. Typické zatížení musí odpovídat:
 - maximální hmotnosti na nápravu, pro kterou je systém upevnění navržen,
 - kombinaci kolejnice, úklonu kolejnice, podložky pod patu kolejnice a typu pražců, s nimiž může být systém upevnění kolejnice použit.

2.5.2 Požadavky vycházející z evropských norem

Požadavky na systémy upevnění jsou dány evropskou normou ČSN EN 13 481 *Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění*, přičemž existuje více dílů této normy lišící se tím, pro jaký typ kolejnicových podpor jsou systémy upevnění použity. Pro zde řešenou problematiku jsou nejvíce relevantní požadavky z části 3 *Systémy upevnění pro betonové pražce* [94], části 5 *Systémy upevnění pro pevnou jízdní dráhu s kolejnicí na jejím povrchu nebo zapuštěnou ve žlábků* [95] a části 7 *Speciální systémy upevnění pro výhybky a výhybkové konstrukce a přídržné kolejnice* [96]. Ve všech dílech jsou uvedeny následující požadavky:

- odpor proti podélnému posunutí kolejnice (min 7 kN; pro $V \geq 250 \text{ km.h}^{-1}$ min 9 kN);
- odpor proti pootočení;
- útlum rázového zatížení;
- tuhost podložky a sestavy upevnění;
- účinek opakovaného zatížení ($3 \cdot 10^6$ cyklů, posuzuje se změna);
- elektrický odpor systému upevnění (min 5 k Ω);
- vliv působení nepříznivých vnějších podmínek.

Jednotlivé požadavky je nutno zjišťovat dle konkrétního případu, pro který je návrhu uzlu upevnění určen. Jak je vidět z některých uvedených hodnot, požadavky korespondují se závaznými požadavky TSI uvedenými v předchozí kapitole. Laboratorní zkoušky se v případě výhybky po vyřešeném konstrukčním návrhu obvykle dělají pro typické systémy upevnění vyskytující se ve výhybce – standardní systém upevnění, kluzná stolička a podkladnice k přídržnici.

Z hlediska tuhosti systémů upevnění ve výhybkách je stěžejní díl 7 [96]. V normě není přímo předepsáno, jakých hodnot by měla tuhost v systémech upevnění pro výhybky dosahovat. Norma pouze předepisuje, jaký druh tuhosti je v případě požadavku zákazníka měřen (statická/dynamická) a zda se měří tuhost podložky nebo sestavy upevnění. Jediný závazný parametr s ohledem na tuhost se vyskytuje u

účinku opakovaného zatížení, kde norma předepisuje maximální možnou změnu tuhosti sestavy upevnění po zkoušce cyklickým zatížením 25 %.

2.5.3 Požadavky Správy železnic

Požadavky na zpružněné systémy upevnění vycházejí především z předpisu SŽDC S9 Pevná jízdní dráha [93], a to z toho důvodu, že zpružněné systémy upevnění se vyskytují především na pevné jízdní dráze. Tento předpis tedy stanovuje následující požadavky:

Z hlediska konstrukčních požadavků pro kolej, výhybky a výhybkové konstrukce je dále uvedeno, že požadovanou pružnost jízdní dráhy lze zajistit na více úrovních:

- v uzlu upevnění, příp. v systému uložení kolejnice,
- pružným uložením podpor zabudovaných v nosné desce PJD,
- pružným uložením nosné desky PJD,
- kombinací výše uvedených,

přičemž použití dvou a více pružných prvků ve výšce konstrukce se musí zvlášť pečlivě prověřit výpočtem a posouzením dynamických vlastností konstrukce. To znamená, že pro výhledové řešení výhybek na pevné jízdní dráze v budoucnu nemusí být řešeno zpružnění pouze v uzlu upevnění, ale může být rovněž užito i např. systému popsaného v kap. 2.3.5. Rovněž je zde zdůrazněna problematika zpružnění ve více vrstvách, které je lepší nenavrhovat.

Dále předpis stanoví, že navržený systém upevnění musí umožnit regulaci výškové a směrové polohy koleje, která po zavedení do zkušebního provozu umožní dodatečnou úpravu:

- výškové polohy koleje min. v rozsahu: -2 mm, +40 mm,
- směrové polohy koleje, resp. rozchodu koleje min. v rozsahu: 5 mm,

při zachování dovolených odchylek dle ČSN 73 6360-2 [97]. Z toho vyplývá, že je nutné konstrukčním řešením systému upevnění zohlednit i možnost příčné a výškové regulace.

Neméně důležitý požadavek se týká i problematiky změn tuhosti po délce výhybky (viz kap. 2.1.7). Při návrhu výhybek a výhybkových konstrukcí zřízených na zesílené nosné desce PJD musí být brána na zřetel změna svislé tuhosti jízdní dráhy. Tomu musí být přizpůsoben návrh tuhosti uzlů upevnění v takovýchto konstrukcích tak, aby byla zajištěna rovnoměrná spojitá tuhost jízdní dráhy. Při návrhu výhybky na PJD je nutné tedy výhybku zpružnit globálně a dále vyřešit lokální tužší oblasti po délce výhybky.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Konstrukce výhybek pro vysoké rychlosti je velice komplexní záležitost zahrnující celou řadu dílčích aktivit ve výzkumu a vývoji od geometrie výhybky samotné, přes řešení kinematiky jízdy vozidel přes výhybky, návrh a konstrukční řešení jednotlivých prvků (systémy upevnění, pražce, srdcovky apod.), až po stránku materiálovou. Tuto celou oblast samozřejmě nelze pojmut v jediné disertační práci, jelikož se jedná o soustavné dlouhodobé činnosti prolínající se vzájemně mezi sebou. Proto jako hlavní téma a cíl této práce bylo zaměření se na snižování dynamických účinků ve výhybce prostřednictvím systémů upevnění. Hlavní cíl práce lze tedy definovat následovně.

Hlavním cílem disertační práce je stanovení zásad pro konstrukci výhybek a výhybkových konstrukcí, které vedou ke snižování dynamického namáhání konstrukce koleje.

Tento hlavní cíl je velice aktuální, jelikož v zásadě všechen výzkum a vývoj v oblasti vysokorychlostních výhybek vede k cíli snížit náklady na údržbu, prodloužit životnost výhybek, resp. vylepšit životní cyklus výhybky. Těchto požadavků je velice často dosaženo právě snižováním dynamického namáhání v oblasti výhybky, a to prostřednictvím různých způsobů – optimalizace kinematiky průjezdu (např. řešení typu FAKOP®), návrh optimalizace tuhosti ve výhybce ať už prostřednictvím systémů upevnění nebo podpražcovými podložkami, nebo návrh srdcovek s PHS bez přerušení pojezdové plochy. Lze říci, že i vylepšení pevné srdcovky po stránce materiálové vede k tomuto cíli, jelikož snížení opotřebení vede k dlouhodobějšímu uchování optimální geometrie přechodu kola v srdcovce, což vede ke snížení dynamického zatížení v této oblasti. Problém dynamického namáhání se pak samozřejmě prohlubuje při zvyšování rychlostí, zejména pak při vysokorychlostním provozu. **Zaměření této disertační práce je tedy konkrétně na optimalizaci tuhosti ve vysokorychlostních výhybce prostřednictvím systémů upevnění vedoucí ke snížení dynamického namáhání.**

3.1 JEDNOTLIVÉ KROKY VÝZKUMU A VÝVOJE VEDOUcí KE STANOVENí DÍLČíCH CÍLŮ

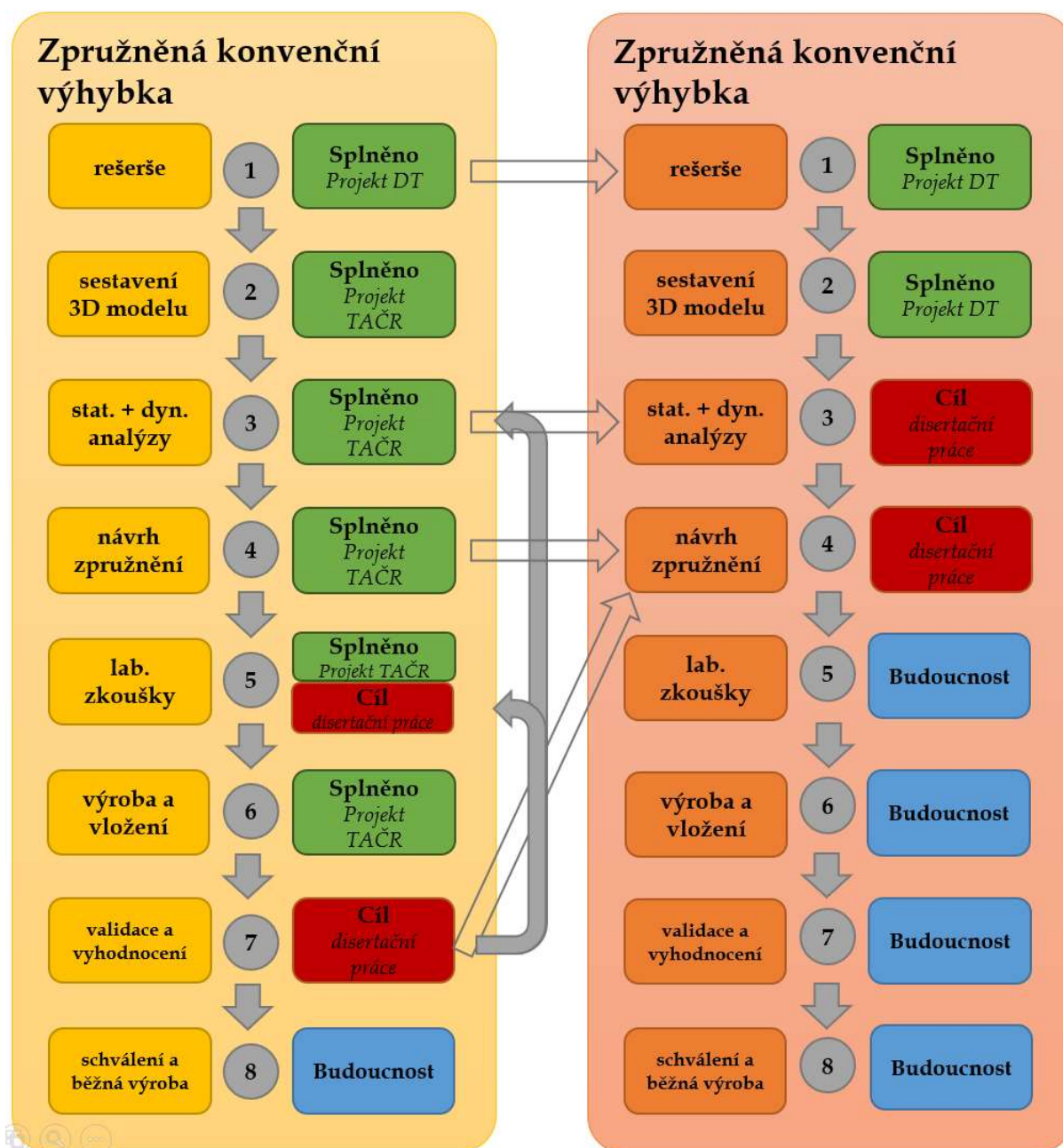
Vývoj zpružněných výhybek je velmi komplexní a dlouhodobá záležitost. V současné době je u konce validace (provozní ověřování u Správy železnic) konvenčních zpružněných výhybek vyvinutých v rámci projektu TAČR [46–49]. Navazující dlouhodobou snahou českého dodavatele výhybek DT je v rámci jeho interních projektů navrhnout zpružnění obdobným způsobem i do vysokorychlostní

výhybky. Z jednotlivých **obecných dílčích kroků výzkumu a vývoje** vycházejí dále definované dílčí cíle této disertační práce.

Výzkum a vývoj každého nového prvku má podobné kroky, které jdou postupně za sebou a jsou mezi sebou provázané. Tyto kroky v konkrétní aplikaci na výzkum a vývoj v oblasti zpružněných výhybek jsou následující, schematicky pak zobrazeny na následujícím obr. 56.

1. **Rešerše současného stavu:** tento krok již byl během předcházejících projektů splněn, stručnější rešerše současného stavu je popsána i zde v předcházející kapitolech 2.2 a 2.3. Je potřeba zdůraznit, že vývoj probíhá stále i v oblasti souvisejících oborů, a proto musí rešeršní činnost probíhat, byť v menší míře, stále po celou dobu výzkumu a vývoje či po jeho ukončení.
2. **Sestavení 3D modelu:** vzhledem k předpokládaným statickým a dynamickým analýzám je zcela nezbytné sestavit 3D model jak výchozího stavu výhybky, tak i nových systémů upevnění a souvisejících prvků. – *Dílčí cíl disertační práce, podrobněji upřesněno v kap. 3.2.2.*
3. **Statické a dynamické analýzy:** výzkum a vývoj v technické oblasti se v dnešní době neobejde bez statických a dynamických analýz, díky kterým lze zjistit chování konstrukce při zatížení, ověřit pevnost apod. Statické a dynamické analýzy jsou částečně zahrnuty i do této disertační práce. – *Dílčí cíl disertační práce, podrobněji upřesněno v kap. 3.2.2.*
4. **Konstrukční návrh zpružnění:** v návaznosti na provedenou rešerši obdobných řešení jiných výrobců a následnou patentovou rešerši přichází krok samotného výzkumu a vývoje v oblasti konstrukčního řešení, zohledňujícího i výsledky statické a dynamické analýzy, normativní a provozní požadavky a očekávání. – *Dílčí cíl disertační práce, podrobněji upřesněno v kap. 3.2.3.*
5. **Laboratorní zkoušky nově vyvinutých prvků:** za účelem prověření na již fyzicky vyrobených vzorcích (prototypch) splnění všech požadavků v laboratorních podmínkách před i během dlouhodobého provozního ověřování. – *Dílčí cíl disertační práce, podrobněji upřesněno v kap. 3.2.4.*
6. **Výroba a vložení výhybek do trati:** jakmile jsou navrženy a laboratorně ověřeny nové systémy upevnění, je na řadě ověření v rámci celé výhybky v trati. Za tímto účelem jsou zřízeny zkušební úseky a zahájeno provozní ověřování, resp. validace výrobku.
7. **Validace a vyhodnocení:** během provozního ověřování probíhá na zkušebním úseku měření a následné vyhodnocování přínosů (u Správy železnic obvykle 5 let). Zde lze sledovat, jestli návrh byl správný a jestli se za provozu výhybky jako celek chovají dle očekávání. – *Dílčí cíl disertační práce, podrobněji upřesněno v kap. 3.2.1.*

8. **Schválení a běžná výroba:** po ukončení provozního ověřování a schválení nového prvku k běžnému užívání je možno standardně nově vyvinuté prvky projektovat a standardně dle schválené dokumentace vyrábět a dodávat.



Obr. 56 Graficky vyjádřené cíle disertační práce v rámci celého výzkumu a vývoje v oblasti zpružněných výhybek

3.2 DÍLČÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z výše uvedené posloupnosti kroků výzkumu a vývoje v oblasti zpružněných výhybek v systému upevnění byly vybrány dílčí kroky jako dílčí cíle disertační práce, kterou vedou k dosažení hlavního cíle. Tyto cíle jsou vyznačeny ve schématu výše (viz obr. 56) a podrobněji rozepsány níže.

3.2.1 Zhodnocení zkušebního úseku se zpružněnými výhybkami

Monitoring zkušebního úseku se zpružněnými výhybkami je nedílnou součástí návrhu optimalizace vysokorychlostní výhybky. Postup návrhu vysokorychlostní výhybky vychází z navrženého postupu návrhu zpružnění konvenční výhybky. V rámci projektu TAČR [46–49] bylo dosaženo vložení výhybek k provoznímu ověřování u Správy železnic, a díky tomuto zkušebnímu úseku může být **v rámci disertační práce ověřeno, zda byl tento návrh správný** a zda je možno z něho vyjít i pro řešení zpružnění vysokorychlostní výhybky. Ve zkušebním úseku bylo prováděno nejen **vlastní měření a vyhodnocení (nivele temen kolejnicových pásů, 3D skenování pojížděných ploch, vyhodnocení dat z měřiče projeté zátěže a z měřicího vozu železničního svršku)**, ale také je zde uvedeno měření a vyhodnocení dalšími spolupracujícími výzkumnými organizacemi (DT, VUT, UPCE, původně také ČVUT), které bylo provedeno ve zkušebním úseku, z důvodu následného **globálního hodnocení zkušebního úseku, což je rovněž dílčím cílem disertační práce**.

3.2.2 Určení statické a dynamické odezvy VR výhybky

Při návrhu optimalizace tuhosti kolejové jízdní dráhy ve výhybce je nejvhodnější cestou využití nástrojů výpočtového modelování, zejména numerických modelů. Za tímto účelem byla navázána spolupráce s Ústavem stavební mechaniky Fakulty stavební VUT v Brně. Dílčím cílem, a tedy **vlastním příspěvkem, byla zejména příprava a podrobný materiálový popis 3D modelu vysokorychlostní výhybky**, u něhož byla zjištěna statická a dynamická odezva současného konstrukčního řešení vysokorychlostní výhybky v FEM software ANSYS. Po návrhu konstrukčního řešení zpružnění v systému upevnění do vysokorychlostní výhybky na základě zhodnocení zkušebního úseku (viz následující dílčí cíl) byl proveden opakovaný výpočet reflektující úpravy optimalizace tuhosti v systémech upevnění. Samotný výpočet vysokorychlostní výhybky nebyl vlastním příspěvkem, tím byla pouze průběžná konzultace při výpočtu a následná součinnost při interpretaci výsledků.

3.2.3 Návrh konstrukčního řešení zpružnění VR výhybky

Na základě dostupných výsledků ze zkušebního úseku se zpružněnými výhybkami a z výsledků výpočtového modelování byl proveden **vlastní návrh**

optimálního způsobu modifikace tuhosti po délce výhybky. Byl tedy konkrétně proveden předběžný návrh zpružnění na základě dosavadních znalostí a dostupných materiálů použitelných do systémů upevnění. Výsledkem nebylo pouze řešení pro aktuálně vyvinutou výhybku tvaru J60-1:33,5-8000-4000-14000-PHS, ale hlavním výsledkem je návrh obecného řešení a zásad, jakými bude moci být úprava tuhosti ve vysokorychlostních výhybkách v budoucnu řešena (viz i hlavní cíl). Tento dílčí cíl je velice úzce provázán s předchozím dílčím cílem a je o nich v rámci práce pojednáno souhrnně v rámci jedné kapitoly.

3.2.4 Laboratorní zkoušky prvku systému upevnění zpružněné výhybky

V průběhu provozního ověřování výhybek bylo potřeba zjistit, zda použité materiály pružných prvků (tj. podložek) v systémech upevnění mají očekávanou životnost a zda se významně nemění jejich materiálové charakteristiky. Za tímto účelem bylo připraveno provedení laboratorních zkoušek, které ukázaly rozdíl v materiálových charakteristikách jednak před vložením a po několika letech provozu a také při použití podložek od různých výrobců a různých materiálů to umožňuje srovnat výsledky dlouhodobé použitelnosti mezi těmito různými typy. Jedná se tedy o dodatečné laboratorní zkoušky v průběhu provozního ověřování ukazující stálost materiálových charakteristik za provozu. Výsledky hrají roli při výběru materiálu pružných prvků do vysokorychlostních výhybek. **Vlastním příspěvkem** v tomto dílčím cíli **byla příprava vzorků** (vytěžení vzorků z výhybek a nachystání pro laboratorní zkoušky), **příprava metodiky zkoušení a následná interpretace výsledků.** Samotné provedení laboratorní zkoušky pak provedlo VUT za osobní asistence.

4 SLEDOVÁNÍ STÁVAJÍCÍHO ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU

4.1 POPIS ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU

4.1.1 Výhybky zkušebního úseku

Do zkušebního úseku byly zahrnuty celkem 3 výhybky patřící do žst. Ústí nad Orlicí, z čehož 2 výhybky jsou zpružněné v systému upevnění a 1 výhybka je standardní konstrukce a slouží jako referenční pro porovnání naměřených dat. Všechny výhybky byly vloženy v rámci celkové modernizace stanice, která probíhala v roce 2014. Jednalo se konkrétně o stavbu „Průjezd železničním uzlem Ústí nad Orlicí“. Ve zkušebním úseku jsou konkrétně následující typy výhybek [98]:

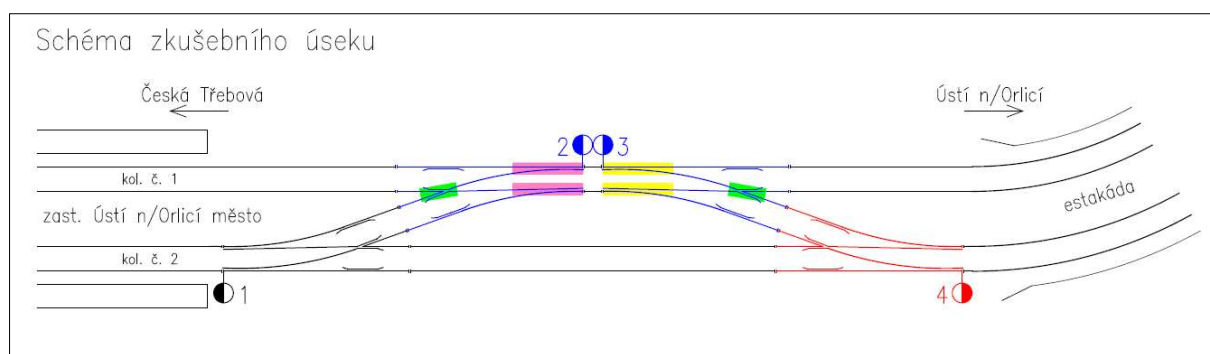
- **výhybka č. 2** – osazena zpružněným upevněním
 - tvar J60-1:12-500-I-zlp-L-ČZ-b-KS-ZPT¹²
 - kolej č. 1
 - staničení ZV km 255,467 405
 - rychlosti¹³ v přímé větvi výhybky: $V = 120 \text{ km.h}^{-1}$, $V_{130} = 130 \text{ km.h}^{-1}$, $V_k = 160 \text{ km.h}^{-1}$
- **výhybka č. 3** – osazena zpružněným upevněním
 - tvar J60-1:12-500-I-zlp-P-ČZ-b-KS-ZPT
 - kolej č. 1
 - staničení ZV km 255,471 405
 - rychlosti v přímé větvi výhybky $V = 120 \text{ km.h}^{-1}$, $V_{130} = 130 \text{ km.h}^{-1}$, $V_k = 160 \text{ km.h}^{-1}$
- **výhybka č. 4** – referenční výhybka (standardní schválená konstrukce)
 - tvar J60-1:12-500-I-zlp-P-ČZ-b-KS-ZPT
 - kolej č. 2
 - staničení ZV km 255,570 000
 - rychlosti v přímé větvi výhybky $V = 120 \text{ km.h}^{-1}$, $V_{130} = 130 \text{ km.h}^{-1}$, $V_k = 160 \text{ km.h}^{-1}$

Jako vhodné pro sledování ve zkušebním úseku byly vybrány výhybky tvořící kolejové spojky na českotřebovském zhlaví stanice v těsné blízkosti železniční zastávky Ústí nad Orlicí město před začátkem nové estakády překlenující soutok řek Tiché Orlice a Třebovky. Výhybky jsou v konfiguraci jednoduchých kolejových spojek (viz obr. 57), přičemž výhybka č. 1 v koleji č. 2 byla shledána jako nevhodná pro sledování, jelikož její výměnová část leží částečně na konstrukci mostu, což by mohlo

¹² Vysvětlení označení typu výhybky je dostupné v předpise SŽDC S3, díl IX.

¹³ V_{130} – rychlost pro vozidla umožňující využívat nedostatek převýšení 130 mm; V_k – rychlost pro vozidla s naklápečími skříněmi

při vyhodnocování zkušebního úseku vnášet do porovnání jisté nepřesnosti. Zpružněné výhybky č. 2 a č. 3 jsou vloženy do koleje č. 1, výhybka č. 4 leží v koleji č. 2. Jízda spojkami není příliš častá, největší množství dopravy přejíždí mezi kolejemi z důvodů mimořádných provozních situací, např. během výluk. Spojkou 4 – 3 projíždí několik pravidelných vlaků, které jedou z letohradského zhlaví stanice ve směru na Českou Třebovou a kolejovou spojkou 4 – 3 se dostávají na správnou traťovou kolej. Do zkušebního úseku byly proto vybrány výhybky s čísly 2, 3 a 4, které leží na stejné konstrukci pražcového podloží. Výhybky leží na vysokém náspu, vpravo ve směru trati je umístěna protihluková stěna.

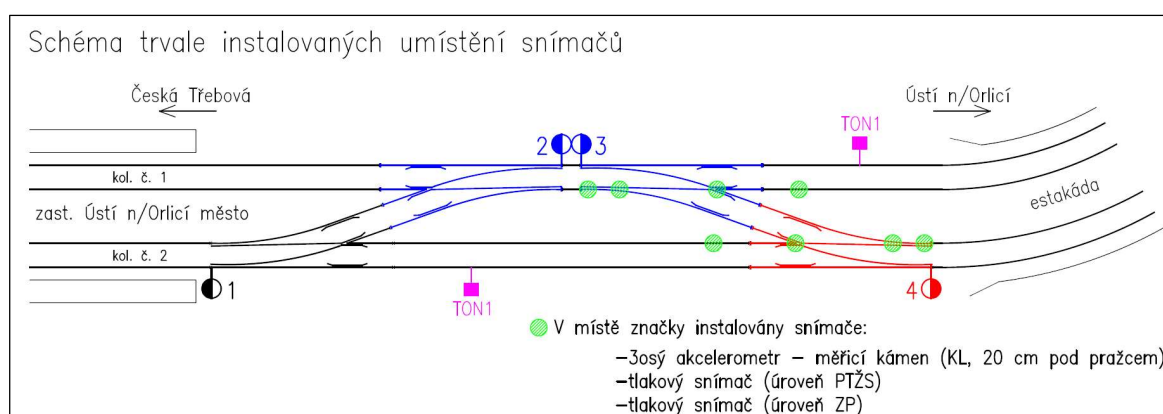


Obr. 57 Schematické znázornění zkušebního úseku. Výhybka č. 4 je referenční, standardní konstrukce. Výhybky č. 2 a 3 mají zpružněné upevnění kolejnic na pražci

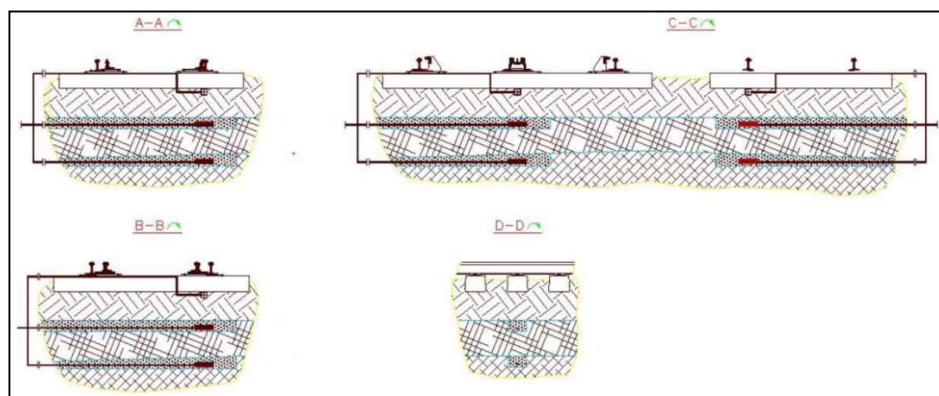
Z hlediska konstrukčního provedení jsou výhybky č. 1 a č. 4 standardními geometriemi J60-1:12-500, druhé generace s betonovými pražci a s celolitými monoblokovými srdcovkami typu ZPT z manganové oceli odlité ve slévárně v Bari (Itálie). Výhybky č. 2 a č. 3 jsou výhybky se zpružněním v uzlu upevnění kluzných stoliček a oblasti srdcovky dle popisu technického řešení v kap. 2.2.2. Rozdíl mezi výhybkou č. 2 a č. 3 byl pouze v tom, že ve výhybce č. 2 byly použity v kluzných stoličkách podložky KSN materiálu EPDM Cellentic® výrobce Vossloh, zatímco ve výhybce č. 3 se jednalo o pryžové podložky KSN výrobce Renogum. Systémy upevnění v oblasti srdcovky (celkem 9 uzlů upevnění) byly zcela identické jak ve výhybce č. 2, tak ve výhybce č. 3.

Samotná stavba zkušebního úseku byla důkladně monitorována. Během stavby a samotné pokládky výhybek byli přítomni jak pracovníci DT, tak i pracovníci z VUT a ČVUT. Před stavbou zkušebního úseku byl navržen podrobný plán monitoringu zkušebního úseku. Některá plánovaná měření obnášela i instalaci snímačů již během stavby. Tyto snímače byly ve zkušebním úseku instalovány již natrvalo. Jedná se o tlakové snímače měřící napětí a vibrace v pražcovém podloží, tříosé akcelerometry zabudované do zrna šterku kolejového lože („měřící kameny“), měřící zrychlení ve třech směrech pod pražcem, a snímače projeté zátěže (typ „TON 1“). Tlakové snímače a měřící kameny jsou instalovány ve čtyřech řezech ve výhybce č. 3 (zpružněná)

a rovněž ve stejných 4 řezech ve výhybce č. 4 (referenční). Tlakové snímače jsou v každém řezu dva, a to na zemní pláni a pláni tělesa železničního spodku a nad nimi je v kolejovém loži 20 cm pod ložnou plochou pražce instalován měřicí kámen (viz obr. 59). Snímače projeté zátěže jsou instalovány po jednom kuse v koleji č. 1 i v koleji č. 2. Poloha trvale instalovaných snímačů je patrná ze schématu (obr. 58). Během stavby byly také důkladně měřeny parametry železničního spodku (měření provedlo ČVUT). Proběhlo měření statické zatěžovací zkoušky za účelem zjištění statického modulu přetvárnosti a rovněž měření dynamického modulu přetvárnosti lehkou dynamickou deskou. [49]



Obr. 58 Schéma trvale instalovaných snímačů na zkušební úseku – tříosé snímače zrychlení a tlakové snímače na pláni tělesa železničního spodku a na zemní pláni.



Obr. 59 Příčné řezy v místě tlakových snímačů a akcelerometrů. [49]

V příloze 1 je uveden průběh stavby chronologicky ve dvou tabulkách. Jedná se konkrétně o významné stavební mezníky začínající výlukou původní koleje a končící ukončením výluky koleje, resp. zprovozněním. Do zkušební úseku dle výnosu [98] patří oficiálně i další 2 výhybky se zpružněním ložné plochy pražců. Jedná se o výhybky č. 7 a č. 8, přičemž výhybka č. 7 (J60-1:14-760-I) má instalovány podpražcové podložky v optimalizované variantě pouze pod srdcovkovou částí a výhybka č. 8 (J60-1:12-500-I) má instalovány podpražcové podložky v celé délce. Vzhledem k omezenému rozsahu práce zde nebudou další podrobnosti tohoto zkušební úseku popisovány.

4.1.2 Stav zkušebního úseku a údržbové zásahy

Na stavbu zkušebního úseku bylo od počátku striktně dohlíženo a všechny významné poznatky byly dopodrobna zaznamenávány. Zprovoznění zkušebního úseku bylo umožněno výnosem SŽDC č.j. 24778/2014-O13 [98]. Provozní ověřování bylo sjednáno na dobu 5 let. V průběhu provozního ověřování bylo velice dbáno na informovanost ohledně jakýchkoliv poruch a údržbových zásahů, což bylo ukotveno i v předmětném výnose SŽ. Všechny údržbové zásahy, a to zejména ty, které mají vliv na způsob sledování, tj. podbíjení a broušení pojížděných ploch, byly důsledně zaznamenávány. Seznam zásahů na zkušebním úseku je uveden v následující tabulce.

Tab. 2 Seznam údržbových zásahů na výhybkách 1 až 4.

Datum	Údržbový zásah	Dotčená výhybka	Projetá zátěž [mil. hrt]
23. 3. 2015	Podbíjení	výhybka č. 4 kolej č. 2	8,444
25. 3. 2015	Podbíjení	spojkové koleje 1–2, 3–4	–
9. 8. 2016	Podbíjení	kolej č. 1 kolej č. 2	55,283 (kol. č. 1) 61,655 (kol. č. 2)
9. 10. 2016	Podbíjení	spojkové koleje 1–2, 3–4	–
11. 10. 2016	Broušení přímý jazyk	výhybka č. 4 kolej č. 2	66,981
26. 1. 2017	Broušení cyklické	výhybky č. 1 až 4 kolej č. 1/č. 2	68,287 (kol. č. 1) 76,465 (kol. č. 2)
6. 4. 2017	Podbíjení ruční	výhybka č. 2 kolej č. 1	73,721
4. 5. 2017	Výměna jazyka a opornice	výhybka č. 4 kolej č. 2	85,049
10. 5. 2017	Podbití a navaření srdcovek	výhybka č. 2 a č. 3 kolej č. 1	76,346
6. 10. 2017	Broušení základní jazyka a opornice	výhybka č. 4 kolej č. 2	98,712
19. 10. 2017	Podbíjení ruční, srdcovka	výhybka č. 2 a č. 3 kolej č. 1	89,425
17. 6. 2018	Navaření srdcovek	výhybky č. 2, 3 a 4 kolej č. 1/č. 2	108,631 (kol. č. 1) 120,693 (kol. č. 2)
22. 10. 2018	Výměna srdcovek	výhybky č. 2 a č. 3 kolej č. 1	119,363
29. 10. 2018	Výměna srdcovky	výhybka č. 4 kolej č. 2	132,837
29. 3. 2019	Broušení cyklické	výhybka č. 4 kolej č. 2	146,848
1. 5. 2019	Broušení cyklické	výhybky č. 3 a 4 kolej č. 1/č. 2	135,434 (kol. č. 1) 149,867 (kol. č. 2)

Ke každému zásahu je také uvedena projetá zátěž zaznamenaná měřičem projeté zátěže TON 1. Tabulka neobsahuje drobné standardní zásahy jako mazání kluzných stoliček, dotažení svěrek apod.

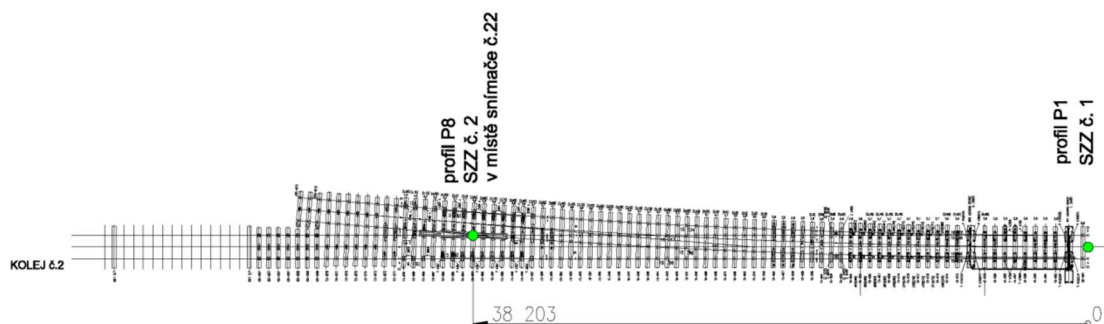
Mezi nejvýznamnější zásahy, které byly vykonány na zkušebním úseku a které významnějším způsobem ovlivnily následné vyhodnocení, byly výměny některých stěžejních dílů výhybek. Jednalo se zejména o výměnu jazyka a opornice výhybky č. 4 (referenční), přímého jazyka a ohnuté opornice (květen 2017), jelikož došlo k vydrolení a následnému vylomení pojížděné plochy jazyka v oblasti cca 1 m od hrotu. Dalším významným zásahem byla výměna srdcovek. Vzhledem k indikovanému projetí hrotu v řezu 40 mm v míře větší 3 mm požádala správa tratí o výměnu v rámci reklamace. Požadavku bylo vyhověno a došlo v říjnu roku 2018 (po 4 letech provozního ověřování) k výměně původních srdcovek ZPT (odlitky ze slévárny v Bari) za srdcovky ZPTZ (zpevněné výbuchem) u výhybek č. 3 a č. 4 a ZPT (odlitek ze Sléváren Třinec) u výhybky č. 2. Ostatní údržbové zásahy byly v zásadě standardní, tedy broušení a podbíjení, případně také navaření srdcovky. Všechny tyto zásahy následně vstupují do interpretace při hodnocení výsledků všech měření. Celkově lze říct, že díky dobré spolupráci a komunikaci místní správy tratí se všemi subjekty zainteresovanými do provozního ověřování byly všechny údržbové zásahy ohlášeny včas a podařilo se potřebná měření realizovat ještě v předstihu před samotným zásahem. V průběhu provozního ověřování byly také realizovány zpravidla dvakrát ročně kontrolní dny, na kterých se sešly zástupci Správy železnic se všemi organizacemi zajišťující měření na předmětných výhybkách, s výrobcem DT a se zhotovitelem stavby. Na těchto schůzkách byly shrnuty všechny významné události za předcházející období a diskutován výhled na další období.

4.1.3 Výsledky měření deformačních charakteristik železničního spodku

Před položením výhybek proběhlo podrobné mapování únosnosti vrstev pražcového podloží. Tato měření byla provedena spolupracující organizací ČVUT [48]. Měření proběhlo na zemní pláni a na pláni tělesa železničního spodku v předem definovaných místech. Z hlediska použitých metod se jednalo jak o statickou zatěžovací zkoušku, tak o rázovou zkoušku lehkou dynamickou deskou.

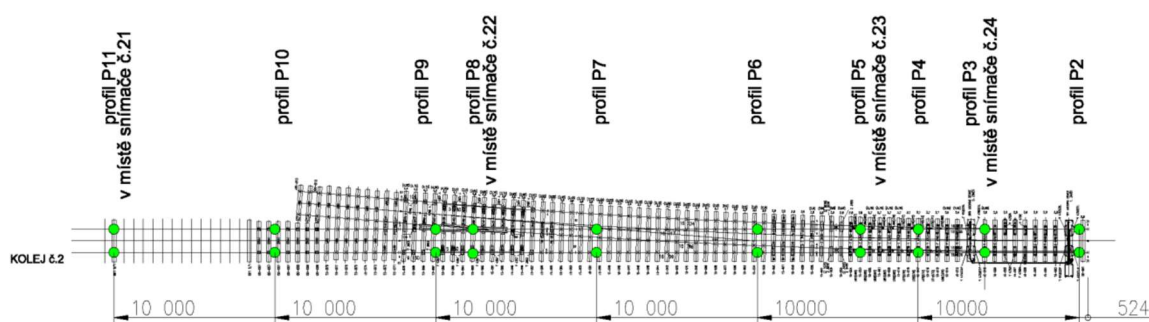
Statická zatěžovací zkouška byla provedena zástupci ČVUT prostřednictvím standardního zařízení určeného pro tuto zkoušku. Jako protizávaží byl použit stavební válec. Metodika pro statickou zatěžovací zkoušku je dána normou ČSN 72 1006 přílohy B [99] a dále dána předpisem SŽDC S4 přílohou 4 [100]. Statickou zatěžovací zkouškou byl určen statický modul přetvárnosti E_0 na zemní pláni a E_{pl} na pláni tělesa železničního spodku. Celkem byly provedeny statické zatěžovací zkoušky ve dvou

profilech jak u výhybky č. 3, tak a u výhybky č. 4, které byly označeny jako profil P1 (výměnový styk) a P8 (hrot srdcovky) viz obr. 60.



Obr. 60 Poloha statických zatěžovacích zkoušek u v. č. 3 a 4. [48]

Rázová zatěžovací zkouška byla provedena pracovníky ČVUT a byla použita lehká dynamická deska LDD 100 od výrobce ECM Measurement s.r.o. Jedná se o standardní zařízení dodávané pro tyto aplikace vč. vyhodnocovací jednotky. Pro zjištění dynamických modulů přetvárnosti na zkušebním úseku se zpružněnými výhybkami byla vytvořena metodika [101]. Pro výpočet rázového modulu přetvárnosti E_{vd} byly použity následující hodnoty Poissonova součinitele: $\mu = 0,30$ pro zemní pláň, $\mu = 0,25$ pro pláň tělesa železničního spodku a $\mu = 0,15$ pro kolejové lože. Celkem byly provedeny rázové zatěžovací zkoušky v 10 řezech u každé výhybky. Byly vybrány takové pozice, které jsou z hlediska konstrukce výhybky významné (hrot srdcovky, přechod kola jazyk/opornice). Základní rastr (vzdálenost) pro zkoušky byl 10 m. Do tohoto základního rastru byla přidána i další měření ve významných místech (např. i pozice umístění snímačů). Profily jsou vyznačeny na následujícím obr. 61.



Obr. 61 Poloha rázových zatěžovacích zkoušek u v. č. 3 a 4. [48]

Na **zemní pláni** byly změřeny v uvedených profilech následující hodnoty modulů přetvárnosti, viz tab. 3 pro výhybku 3 a tab. 4 pro výhybku č. 4. Rozhodující jsou výsledky statických zatěžovacích zkoušek, přičemž předpis S4 udává minimální hodnotu statického modulu přetvárnosti $E_0 = 30$ MPa, což je u obou výhybek splněno. Z hlediska předpisu jsou rázové zatěžovací zkoušky pouze podpůrné. U měřených hodnot dynamických modulů přetvárnosti je sledován zejména rozdíl mezi pravým a levým kolejnicovým pásem. Z výsledků rázových zatěžovacích zkoušek lze

vysledovat konzistentní výsledky až na řezy P9 a P11 u výhybky č. 3 (rozdíl 14 MPa) a řez P11 u výhybky č. 4 (rozdíl 16 MPa).

Tab. 3 Hodnoty modulů přetvárnosti na zemní pláni pod výhybkou č. 3.

Profil	E_{vd} [MPa] levý kol. pás	E_{vd} [MPa] pravý kol. pás	E_0 [MPa]	Poznámka
P1	-	-	80,4	
P2	38,7	46,0	-	
P3	-	-	-	
P4	32,7	35,2	-	
P5	-	41,6	-	
P6	43,4	47,6	-	
P7	42,5	35,6	-	
P8	40,9	46,9	54,9	¹⁴ 18,5 MPa
P9	22,8	36,4	-	
P10	38,7	40,8	-	
P11	36,2	22,0	-	vizuálně hůře zhutněno

Tab. 4 Hodnoty modulů přetvárnosti na zemní pláni pod výhybkou č. 4.

Profil	E_{vd} [MPa] levý kol. pás	E_{vd} [MPa] pravý kol. pás	E_0 [MPa]	Poznámka
P11	35,0	51,2	-	
P10	40,2	38,9	-	
P9	49,6	43,9	-	
P8	42,0	38,1	76,3	
P7	52,8	43,5	-	
P6	39,0	34,9	-	
P5	38,5	41,0	-	
P4	50,0	45,6	-	
P3	53,2	45,9	-	
P2	44,3	38,8	-	
P1	-	-	90,6	

Na **pláni tělesa železničního spodku** byly změřeny následující hodnoty statického modulu přetvárnosti E_{pl} a dynamického modulu přetvárnosti E_{vd} , viz tab. 5 pro výhybku č. 3 a tab. 6 pro výhybku č. 4. Z hlediska stavby je opět rozhodující statický modul přetvárnosti, jehož minimální hodnota definovaná předpisem S4 je $E_{pl} = 50$ MPa. Tato hodnota byla v obou měřených řezech u obou výhybek splněna. U měřených hodnot dynamických modulů přetvárnosti je sledován zejména rozdíl mezi pravým a levým kolejnicovým pásem. Z měřených hodnot lze říct, že jsou výsledky relativně konzistentní až na řez P11 u výhybky č. 3 a řez P11 u výhybky č. 4.

¹⁴ U výhybky č. 3 byla v řezu P8 navíc lehkou dynamickou deskou změřena pozice vnější kolejnice odbočné větve.

Tab. 5 Hodnoty modulů přetvárnosti na pláni tělesa železničního spodku pod výhybkou č. 3.

Profil	E_{vd} [MPa] levý kol. pás	E_{vd} [MPa] pravý kol. pás	E_{pl} [MPa]	Poznámka
P1	-	-	63,1	
P2	41,3	36,8	-	
P3	-	-	-	
P4	48,8	41,5	-	
P5	-	38,5	-	
P6	48,1	51,1	-	
P7	46,0	46,6	-	
P8	43,5	39,6	79,9	
P9	47,1	48,8	-	
P10	47,3	50,5	-	
P11	37,5	31,4	-	

Tab. 6 Hodnoty modulů přetvárnosti na pláni tělesa železničního spodku pod výhybkou č. 4.

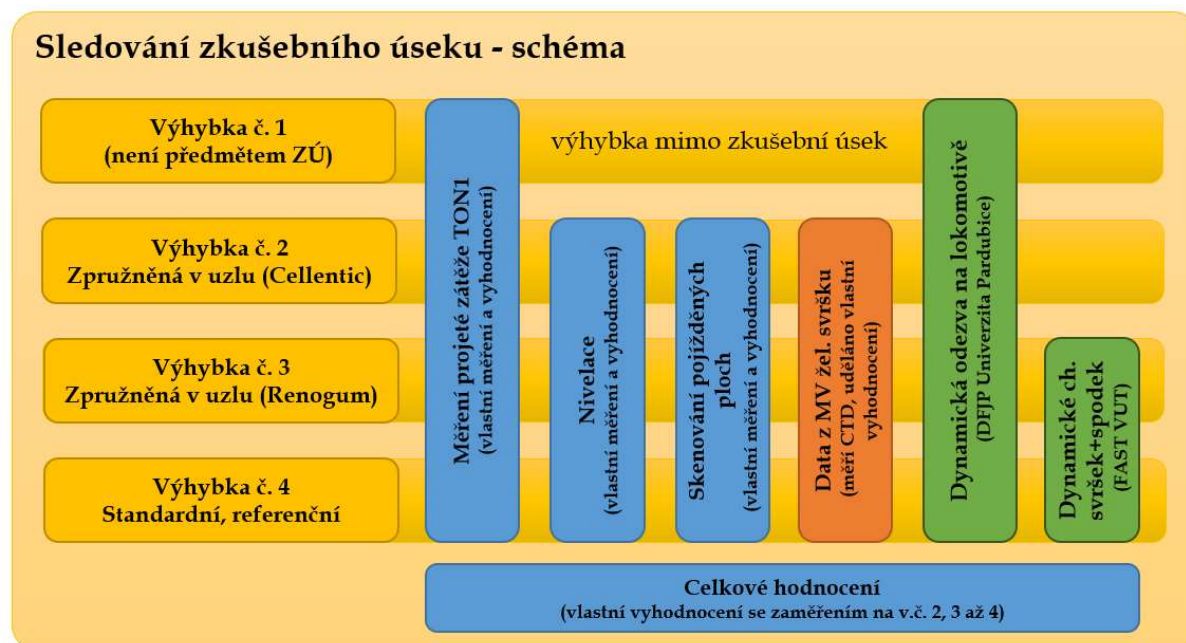
Profil	E_{vd} [MPa] levý kol. pás	E_{vd} [MPa] pravý kol. pás	E_{pl} [MPa]	Poznámka
P11	56,0	36,5	-	
P10	54,9	47,4	-	
P9	53,6	62,7	-	
P8	58,8	49,4	91,2	
P7	59,9	59,8	-	
P6	66,7	48,6	-	
P5	51,4	49,6	-	
P4	59,7	44,8	-	
P3	56,7	43,5	-	
P2	62,9	57,6	-	
P1	-	-	104,7	

Statické zatěžovací zkoušky na zemní pláni i na pláni tělesa železničního spodku prokázaly dostatečnou únosnost pražcového podloží. Pro posouzení konzistentního provedení pražcového podloží sloužily rázové zkoušky lehkou dynamickou deskou. Až na několik výše uvedených výjimek bylo **prokázána dostatečná konzistence pražcového podloží podsledovanými výhybkami č. 3 a č. 4**. Pod zpružněnou výhybkou č. 2 nebylo pražcové podloží při stavbě bohužel změřeno.

4.2 METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Zkušební úsek v žst. Ústí nad Orlicí byl od začátku považován za jedinečný z hlediska komplexního dlouhodobého sledování výhybek, na kterém se podílelo velké množství spolupracujících institucí a organizací. Sledována byla velice detailně i stavba a pokládka výhybek (viz kap. 4.1.3) a rovněž byl navržen podrobně plán sledování celého zkušebního úseku včetně části výhybek se zpružněním ložných ploch pražců. Měření, která proběhla na zkušebním úseku po dobu provozního ověřování,

lze rozdělit na **vlastní měření** a na **měření spolupracujícími institucemi** nebo organizacemi. V rámci disertační práce bude zaměřena pozornost zejména na **vlastní měření a vyhodnocení**. Měření spolupracujících institucí a organizací bude zmíněno pouze okrajově se zaměřením na výsledky provedených měření. Součástí disertační práce je pak **celkové hodnocení zkušebního úseku jak na základě vlastních výsledků měření, tak na základě výsledků měření spolupracujících institucí a organizací**.



Obr. 62 Schéma sledování zkušebního úseku – **modře** zobrazeno vlastní sledování a vyhodnocení, **zeleně** zobrazeno sledování a vyhodnocení spolupracujících institucí, **oranžově** měření CTD s vlastním zpracováním surových dat.

Jak již bylo zmíněno v kap. 4.1.1, do zkušebního úseku patří mimo dvou zpružněných výhybek v uzlu upevnění (a jedné výhybky referenční) také další dvě výhybky se zpružněním ložných ploch pražců, tedy s instalovanými podpražcovými podločkami. Vzhledem k omezenému rozsahu práce? nebude sledování výhybek s podpražcovými podločkami dále rozepisováno.

Přehled prováděných měření na zkušebním úseku je schematicky znázorněn na obr. 62. **Vlastní měření obnášelo:**

- měření, resp. vyhodnocení projeté zátěže zařízením TON 1;
- měření výšek kolejnicových pásů geodetickou metodou přesné nivelace;
- snímání tvaru pojížděných ploch vybraných komponentů metodou 3D skenování;
- měření standardních provozních parametrů (doplňkové měření).

Dále se na měření pravidelně podílely následující instituce a organizace:

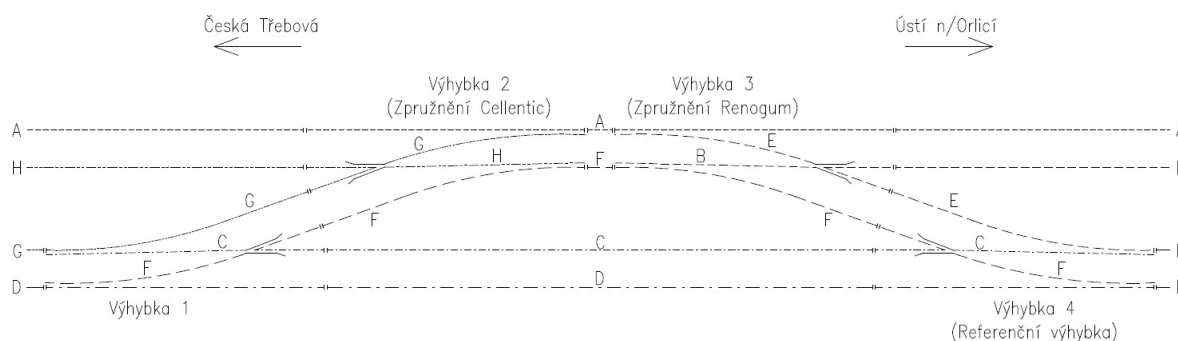
- VUT v Brně, Fakulta stavební (dále uváděno jen jako VUT);
- Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera (dále uváděno jen jako UPCE);
- Centrum telematiky a diagnostiky¹⁵ Správy železnic (dále uváděno jen jako CTD);
- ČVUT v Praze, Fakulta stavební (dále uváděno jen jako ČVUT);
- Ústav aplikované mechaniky Brno, a.s. (dále uváděno jen jako ÚAM).

4.2.1 Vlastní měření a vyhodnocení

4.2.1.1 Měření výšky kolejnicových pásů metodou přesné nivelace

Stěžejní pro sledování sedání výhybek na zkušebním úseku je nivelace temen kolejnicových pásů, pomocí níž bylo hodnoceno sedání koleje. Metodika vlastního měření byla převzata dle necertifikované metodiky [102] vzniklé za řešení projektu [48] a byla dále rozvíjena a upravena. Při nivelaci jsou měřeny všechna temena kolejnicových pásů v jednotlivých řezech příslušných výhybek i v odbočné větvi i celá spojková kolej. Nivelace je prováděna nivelačním přístrojem Leica Sprinter 150M, jehož střední kilometrická chyba je 1,5 mm. Do výsledného vyhodnocení jsou použita i některá data z původního měření realizovaného ČVUT po zprovoznění (pouze výhybky č. 3 a č. 4), které bylo měřeno přesnějším přístrojem Zeiss Ni 007, jehož střední kilometrická chyba je 0,7 mm.

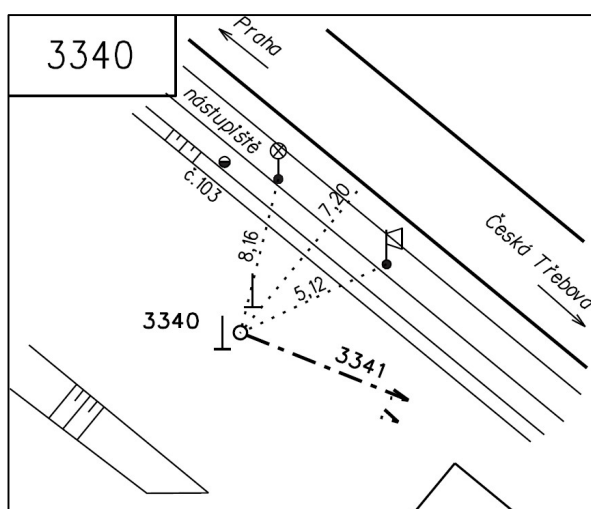
Podrobné body na výhybkách a spojkové koleji byly zvoleny v přibližném rastru 3 m (po 5 pražcích), přičemž měřené řezy byly vyznačeny na pražce barevnou značkou. Jednotlivé kolejnicové pásy byly označeny písmeny A až H, viz obr. 63. Výhybka č. 1 nebyla měřena (neboť nebyla zařazena do zkušebního úseku) a výhybky č. 2, 3 a 4 byly nivelovány v celé délce, vč. odbočných větví výhybek a krátkých úseků běžné koleje před a za výhybkami.



Obr. 63 Označení kolejnicových pásů pro potřeby nivelace.

¹⁵ Dříve Technická ústředna dopravní cesty, zkr. TÚDC.

Měření bylo vztaženo k pevnému geodetickému bodu, jelikož byl předpoklad, že stavební zajišťovací značky na nově vybudovaných patkách sloupů trakčního vedení nebudou mít stálou výškovou polohu, což se měřením i potvrdilo. Jako výchozí bod byl tedy vybrán geodetický bod č. 2403 207 katastrálního území Ústí nad Orlicí. Jedná se o žulový mezník zapuštěný v terénu, který je umístěn v obvodu zastávky Ústí nad Orlicí město v traťovém km 255,290 cca 35 m od čekárny směrem na Choceň. Bod byl zřízen v roce 1993 a přeměřen v roce 2009. Nadmořská výška bodu je 329,944 m Bpv. Díky známé výšce výchozího bodu mohly být všechny měřené výšky určovány v absolutních hodnotách a případně porovnávány s projektovaným stavem.



Obr. 64 Schematické znázornění umístění geodetického bodu č. 2403 207. [103]

Nivelační pořad byl měřen jako uzavřený se začátkem a koncem na známé výšce geodetického bodu č. 2403 207. Jednotlivé nivelační přestavy byly prováděny na stavebních zajišťovacích značkách na sloupech trakčního vedení a podrobné body na temenech kolejnicových pásů byly měřeny záměrami bočně. Po průjezdu vlaku byla obvykle měřena znovu výška nejbližší zajišťovací značky sloupu trakčního vedení pro vyloučení chyby z pohybu přístroje způsobeným vibracemi při průjezdu vlaku. Chyba uzávěry nivelačního pořadu se obvykle pohybovala do 1,5 mm.

Vyhodnocení bylo realizováno za pomoci softwaru Microsoft Excel, kam byla naměřená data importována z textového dokumentu vygenerovaného nivelačním přístrojem. Hlavními výstupy vyhodnocení jsou následující:

- graf výšek temen kolejnicových pásů;
- graf odchylek od projektované výškové polohy;
- graf průběhu převýšení;
- graf průběhu zborcení koleje na definované základně;
- graf sedání výhybky

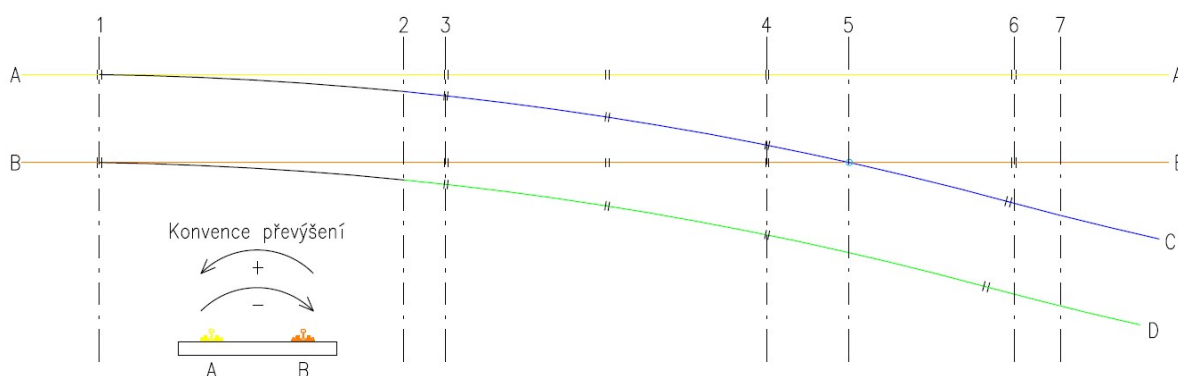
v závislosti na projeté zátěži.

Graf výšek temen kolejnicových pásů je prostým vynesemím absolutních výšek jednotlivých kolejnicových pásů do grafu. Pokud je trať ve výškovém sklonu, je tento graf obvykle hůře čitelný, jelikož v grafu zanikají odchylky od stanoveného výškového průběhu.

Z výše uvedeného důvodu je pro interpretaci vhodnější vytvořit graf odchylek, a to buď od projektované nivelety nebo od vyrovnaného výškového průběhu. Odchylky od projektované nivelety mohou být spočítány, pokud je známa absolutní výška měřených bodů a projektový stav výškového vedení trasy. Pokud výše uvedené není známo, je nutné se spokojit s výchozí hodnotou, která vznikne vyrovnaním naměřeného stavu. Na výslednou interpretaci nemá ale zvolený postup vliv. Vzhledem k tomu, že byl znám projektovaný stav i absolutní výšky měřených bodů, bylo zvoleno vynášet do grafu odchylky od projektované nivelety. Tento graf je lepší na interpretaci oproti grafu výšek temen kolejnicových pásů z důvodu, že zde zaniká vliv sklonového vedení trati (hodnota 0 je vodorovná, resp. přímo osou x).

Další veličinou pro hodnocení geometrických parametrů koleje je převýšení koleje. Převýšení koleje definuje norma [97] jako výškový rozdíl kolejnicových pásů daný úhlem, který svírá spojnice temen protilehlých kolejnicových pásů a vodorovná rovina; udává se délkou svislé odvěsny pravoúhlého trojúhelníka, jehož přepona má délku 1 500 mm. Převýšení se získá měřením v trati jednoduše jako rozdíl výšky pravého a levého kolejnicového pásu, jejichž vzdálenost se uvažuje 1 500 mm. Kladná nebo záporná hodnota převýšení pak značí smysl natočení koleje v daném řezu. Pokud budeme uvažovat rozdíl výšek dle rovnice (129), kde H_A značí nadmořskou výšku kolejnicového pásu A a H_B nadmořskou výšku kolejnicového pásu B, dostaneme konvenci dle obr. 65, tj. kladné převýšení znamená natočení v pohledu od začátku výhybky doleva (kolejnicový pás B výše) a záporné převýšení opačně.

$$D = H_B - H_A \quad (129)$$



Obr. 65 Konvence výpočtu převýšení.

Pro hodnocení kvality výškového vedení kolejnicových pásů se dále používá veličina zborcení koleje, což je posouzení vzájemného sklonu kolejnicových pásů. Zborcení koleje je definováno dle normy [97] jako změna převýšení koleje na měřické základně a je vyjádřeno jednotkou mm.m^{-1} . Zborcení koleje v místě x , označeno jako ZK_x , se tedy dle definice spočítá jako:

$$ZK_x = \frac{D_x - D_{x+mz}}{L_{mz}} \quad (130)$$

kde D_x je převýšení v místě x , D_{x+mz} je převýšení v místě x posunutého o délku měřické základny (index „mz“), a ve jmenovateli zlomku je pak délka příslušné měřické základny L_{mz} v m. Pro vykreslení do grafu je pak v rámci této práce posunuto i staničení spočteného zborcení koleje o polovinu délku měřické základny.

Poslední vyhodnocovanou veličinou z nivelace je sedání koleje v čase, nebo lépe na projeté zátěži, je-li projetá zátěž známa. Z každého nového provedeného měření lze zjistit, o kolik se kolejnice trvale posunula ve svislém směru. Pokud nedošlo k podbití, jedná se o sedání koleje, kdy kolej vlivem provozu přirozeně klesá. Pokud dojde k podbití, jedná se pak o zdvih do nového výškového stavu. Po každém podbití následuje pak fáze konsolidace kolejového lože, při které dochází k významnějšímu poklesu koleje. Následuje fáze stabilnější, při které dochází již k menším hodnotám sednutí. Od podbití do dalšího podbití je křivka sedání velice blízká klesající exponenciální funkci.

Výše uvedené principy vyhodnocení a vykreslení grafických průběhů (mimo sedání koleje) lze aplikovat také na výstupy z měřicího vozu. Stejnými způsoby lze vykreslit graf převýšení a dopočítat zborcení koleje na zvolené měřické základně a vykreslit graf podélné výšky. Rozdílem je ale skutečnost, že měřicí vůz měří parametry koleje při zatížení kolejovým vozidlem (na rozdíl od nivelace) a hodnoty odchylek v podélné výšce jsou relativní bez vztažení ke konkrétnímu stálému výškovému bodu. Z výstupů měřicího vozu tedy nelze dopočítat sedání koleje v čase nebo projeté zátěži.

4.2.1.2 Skenování pojezdových ploch

Tvarově komplikované součásti železničních výhybek a jejich opotřebení (ojetí za provozu) lze měřit buď klasickými metodami (např. profiloměrem), nebo z důvodu širšího rozmezí vizualizace a komplexní kontroly celého povrchu součásti pomocí 3D skenovacích systémů. [104] Tato speciální skenovací měřidla umožňují nasnímáním povrchu součásti před jejím vložením do trati a následné další skenování v průběhu jejího používání ve výhybce. Výstupem takto provedeného měření může být určení oblastí s největším opotřebením součásti společně s určením velikosti úbytku

materiálu. 3D skenovací systémy je možné využít také při samotném konstrukčním zpracování nových dílů či úpravě stávajících nástrojů, které jsou potřeba k výrobě polotovarů vstupujících do konstrukce železniční výhybky.

Na zkušebním úseku v žst. Ústí nad Orlicí bylo zvoleno sledování ojetí kritických částí výhybky pomocí 3D skeneru. Po vložení byly pro zachycení výchozího stavu oskenovány srdcovky a také jazyky. Interval následujících pravidelných měření byl zvolen půlroční, obvykle jaro a podzim. Vzhledem k obtížnému vyhodnocení (viz dále) bylo nakonec od sledování jazyka upuštěno a byly měřeny a detailně hodnoceny pouze srdcovky.

K měření byly k dispozici dva typy 3D skenerů. Jedná se o laserové skenery a jsou používány jak pro kontrolu výrobků po vyrobení, tak při validační činnosti v trati. Jedná se konkrétně o typy:

- HandySCAN 3D EXAscan;
- HandySCAN 700.

Parametry skenerů jsou uvedeny v tabulce (obr. 66). V současnosti se téměř výhradně používá HandySCAN 700 vzhledem k rychlosti měření, která je zejména při skenování v provozované trati zásadní. Pro časově méně náročné aplikace (skenování ploch ve výrobním závodě po vyrobení) je v omezené míře používán starší model HandySCAN 3D EXAscan.

	HandySCAN 3D EXAscan		HandySCAN 700	
HMOTNOST [kg]	1,25		0,85	
ROZMĚRY [mm]	172x260x216		122x77x294	
MĚŘENÍ [-/s]	25 000		480 000	
ROZLIŠENÍ [mm]	0,05		0,05	
PŘESNOST [mm]	0,04		0,03	
VELIKOST OBJEKTU [m]	0,1-4		0,1-4	

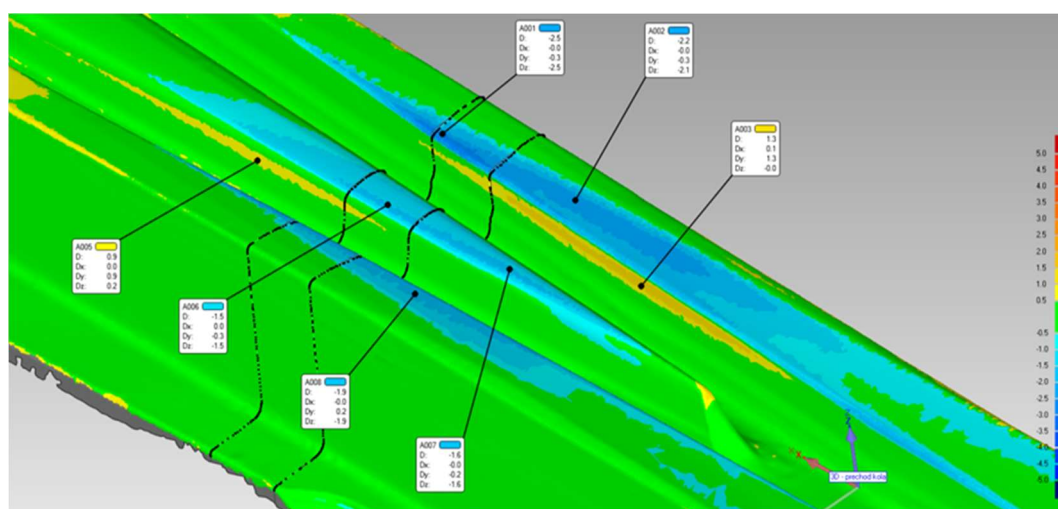
Obr. 66 Parametry použitých 3D skenerů. [104]

Princip laserového 3D skeneru je založen na projekci laserového paprsku (laserovým emitorem) na povrch snímaného objektu a souběžném snímání těchto promítnutých paprsků pomocí dvou (a více) kamer umístěných ve skeneru. Poloha snímaného místa je určena pomocí reflexních pozičních značek (tzv. targetů, reflexních bodů). Tyto značky mohou být umístěny jak na skenovaném tělese, tak i na pomocné podložce. Obvykle se používají jednorázové nalepovací, existují však i magnetické permanentně použitelné, ty však nejsou vhodné na odlitky z manganové oceli, které nejsou magnetické. V průběhu skenování se na počítači v reálném čase zobrazuje nasnímaná plocha objektu, laserový kříž a poloha pozičních značek. Po naskenování se automaticky vygeneruje polygonová síť, kterou je možné na místě předběžně zkontrolovat a poopravit (pomocí softwaru skeneru, nebo doskenováním chybějících

míst). Skener má externí napájení pro práci mimo dosah elektrické sítě. Ke skeneru patří rovněž kalibrační deska, pomocí které je nutné před započítím práce skener zkalibrovat.

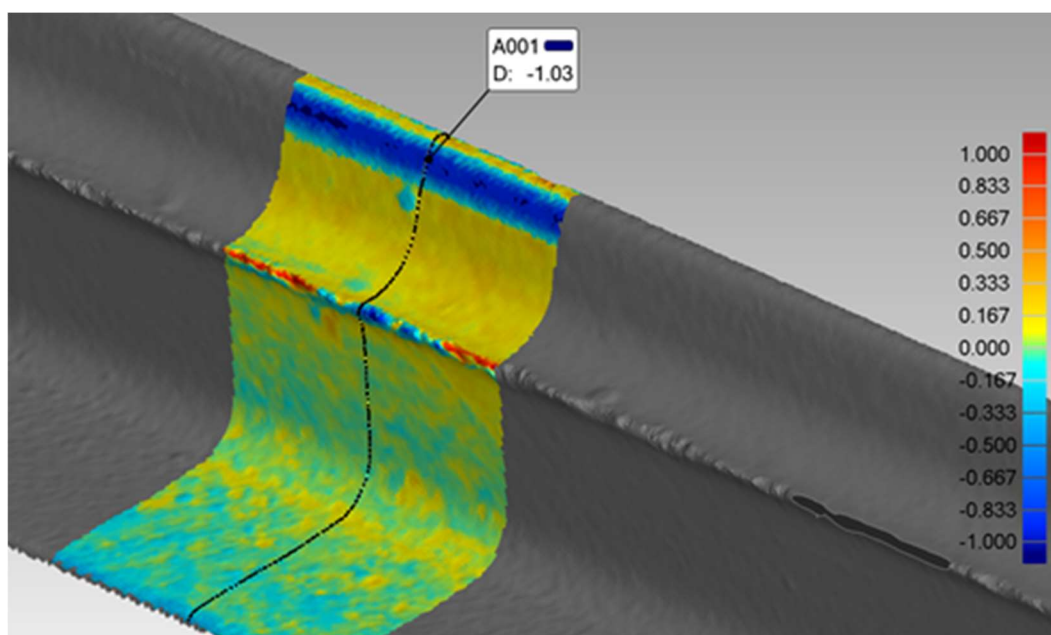
Obvyklými úlohami 3D skenování při validaci (tj. při provozním ověřování) v trati je sledování provozního opotřebení (ojetí) srdcovky v závislosti na projeté zátěži a sledování provozního opotřebení (ojetí) jazyka v závislosti na projeté zátěži.

V případě srdcovky se při vyhodnocení porovnává tvar po určité projeté zátěži v trati se skenem tvaru s nulovým projetým zatížením (tj. ve stavu po vyrobení). První sken srdcovky je obvykle proveden před její expedicí na dílně výrobce. Po následném vyhodnocení je viditelný úbytek materiálu, viz ilustrativní obr. 67.



Obr. 67 Ukázka vyhodnocení skenu srdcovky, modře úbytek materiálu, žlutě převalky. [104]

Obdobně jako u srdcovek se jazyk porovnává po určité projeté zátěži v trati se skenem s nulovým projetým zatížením. Vhodné je opět první měření provést hned po výrobě na dílně (případně použít teoretický 3D model). Podle zamýšleného cíle projektu se obvykle skenují krátké úseky a v těchto místech se vyšetřují příčné řezy. Vyhodnocování delších segmentů jazyka je problematické, neboť se nikdy nepodaří naskenovat jazyk při stejném průběhu ohnutí, jako byl první sken.



Obr. 68 Ukázka vyhodnocení skenu jazyka, modře úbytek materiálu, žlutě nadbytek materiálu. [104]

V následujícím textu jsou popsány jednotlivé kroky postupu přípravy skenovaného povrchu a vlastního skenování. Popis je uveden na příkladu skenování pro nejběžnější úlohu skenování ojetí srdcovky v trati. Postup skenování jakýchkoliv jiný dílů je pak obdobný.

Při skenování srdcovky se snímají horní plochy srdcovky v oblasti od hrdla po šířku hrotu cca 90 mm. Při snímání neojeté srdcovky při zátěži 0,0 mil hrt. se snímá oblast na každém konci o 0,5 m delší z důvodu případné budoucí potřeby. Vždy je potřeba zvolit vhodný rozsah skenování tak, aby byla pokryta i s rezervou potřebná plocha pro vyhodnocení a aby byl k dispozici i jistý přesah pro případnou budoucí potřebu. Je ale nutné dbát na ekonomické zvolení vhodné skenované plochy tak, aby byl optimalizován čas pro skenování (a to zejména v trati) a aby byla optimalizována velikost výsledného souboru s naskenovanými daty. Velké soubory jsou náročné jak pro vyhodnocení (práce s velkými soubory vyžadují větší nároky na hardware), tak pro uchovávání dat. Není tedy vhodné skenovat naprosto celou srdcovku, popř. jinou součást. Postup skenování je následující:

1. Příprava skenovaného povrchu součásti.

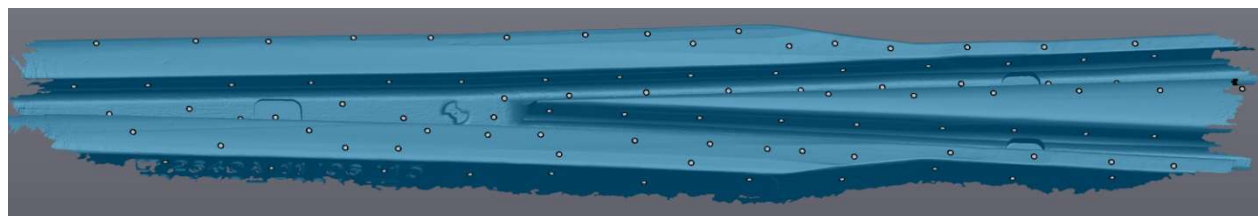
- Skenovaný povrch je třeba nejdříve očistit od mastnoty, zbytků špon po obrábění, předchozích značek (bodů), vlhkosti a dalších nečistot. V zimním období pomůže nahřátí. Potřebné pomůcky jsou: rukavice, odmašťovač, ocelový kartáč, špachtle, smetáček, kus látky, propanbutanová láhev s hořákem (v zimním období).
- Při skenování počátečního stavu po vyrobení na dílně musí být skenovaná součást vhodně podepřena a vyrovnána tak, aby její globální křivost byla co

nejmenší a nezkreslila výsledek měření. Součást je nutné umístit tak, aby kolem ní byl dostatečný prostor pro obsluhu skeneru, případně ji umístit na podpěry.

- Lesklé povrchy, jako obrobený nebo ojetý kov, je nutno opatřit nástřikem rychleschnoucí šedé matné akrylátové barvy. Pro sjednocení odrazivosti a lepší nalepování značek je vhodné nastříkat touto barvou celou skenovanou plochu. Pokud by aplikací barvy došlo k znehodnocení skenovaného objektu, je možné použít křídovou barvu, kterou lze snadno smýt.
- V průběhu skenování se skenovaný povrch nesmí žádným způsobem upravovat (rovnat).
- Po průjezdu železničních vozidel v průběhu skenování se lesklé plochy znovu přestříkají a ve skenování je možno pokračovat. Při aplikaci barvy je třeba chránit nalepené značky.
- Pokud je nutné v průběhu skenování jazyka přestavit výhybku, je nutné přerušit skenování a po přestavení začít znovu (platí v případě skenování jazyka nebo srdcovky s pohyblivými díly).

2. Nalepení značek (reflexních bodů).

- Na oblast součásti, která bude skenována, se umístí reflexní poziční body (targety). Tyto body slouží pro orientaci skeneru v prostoru.
- Pro úspěšný průběh skenování musí kamery skeneru zabírat vždy nejméně 4 body.
- Body se nalepují libovolně, ideálně však min 2,5 cm od hrany skenovaného objektu a ve vzdálenosti nejlépe 5 cm až 10 cm mezi sebou.



Obr. 69 Umístění pozičních značek na srdcovce skenované v trati. [104]

3. Zapojení, kalibrace skeneru, nastavení a spuštění skenování. Před samotným procesem skenování je nutné provést následující úkony:

- propojit skener s notebookem (aktuálně Dell Precision M3800);
- provést kalibraci skeneru před skenováním;
- nastavit pro skenovaný povrch a světelné podmínky sílu laseru a frekvenci snímkování.

4. Průběh skenování, uložení dat.

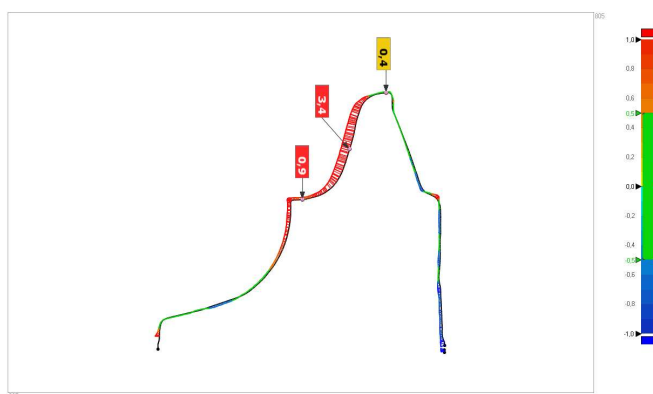
Po kalibraci může začít samotný proces skenování. Nejprve jsou sejmuty značky (reflexní body) a až následně probíhá skenování plochy. V případě skenování jazyka,

resp. při skenování dlouhých objektů s hranou mezi dvěma plochami, které vzájemně svírají konvexní úhel menší než 90° , je třeba dbát na to, aby nebyly body skenovány pouze z jedné a pak z druhé strany bez průběžného přecházení mezi plochami. To vede k velké chybě. Je nutno co nejčastěji přecházet z jedné strany plochy na druhou tak, aby byly vždy vidět minimálně 4 značky na každé ploše. Program tak má hodně vazeb mezi body z obou stran a po přepočítání při optimalizaci je model bodů s malou chybou.

5. Postup vyhodnocení

Zpracování naskenovaných dat probíhalo v kancelářského prostředí. Plochy jsou importovány do specializovaného softwaru, pomocí kterého je možné porovnávat odchylky mezi více naskenovanými plochami. V DT je používán software Geomagic Control X. Po importu jsou data (plochy) upraveny do podoby, se kterou se dá následně pracovat. Jedná se zejména o úkony typu zmenšení počtu trojúhelníků sítě a odstranění nepotřebných naskenovaných dat (obvykle podklad skenovaného objektu). Po úpravě posuzovaných ploch jsou tyto vzájemně mezi sebou porovnávány. Výstupem může být nejčastěji:

- vyhodnocení odchylek formou barevného zobrazení 3D pohledu na objekt (viz např. obr. 67 a obr. 68)
- vyhodnocení 2D řezu jak příčného, tak podélného, vč. zobrazení odchylek (barevně i číselně, viz obr. 70)
- export 2D křivek do vhodného souboru, se kterými lze dále pracovat i v jiných softwarech (např. formát dwg)



Obr. 70 Ukázka 2D řezu jazyka s barevně i číselně vyznačenými odchylkami při porovnání dvou různých skenů. [104]

4.2.1.3 Měření GPK a zjišťování stavu konstrukčních prvků výhybek

Pravidelně byly sledovány standardní provozní parametry předmětných výhybek na zkušebním úseku. Při obvyklých měřeních byla tato standardní měření také prováděna a zaznamenávána. Jednalo se zejména o měření:

- rozchodu koleje ruční rozchodkou;
- přibližné ojetí srdcovky zjišťované klínkem a pravítkem (viz obr. 71) v šířce hrotu 26 mm a 40 mm;
- vodící míry v srdcovce;
- vizuální kontrola jazyka a opornice, případně kontrola měřidlem PŠR-3;
- doléhání jazyka k opornici, do opornicových opěrek a na kluzné plochy;
- vizuální kontrola podložek KSN v kluzných stoličkách, případně změření posuvným měřítkem.



Obr. 71 Měření ojetí srdcovky klínkem a pravítkem.

Tato měření jsou vnímána spíše jako doplňková sloužící k základní informaci o tom, zda nedochází v průběhu provozního ověřování k nějakému nežádoucímu vlivu ověřovaného prvku na výhybkovou konstrukci jako takovou. U těchto ručních měření se obtížně sledují nějaké tendence, resp. v případě ojetí je tato hodnota vnímána jako orientační, jelikož jako přesná je chápána hodnota zjištěna z vyhodnocení a porovnání skenovaných ploch.

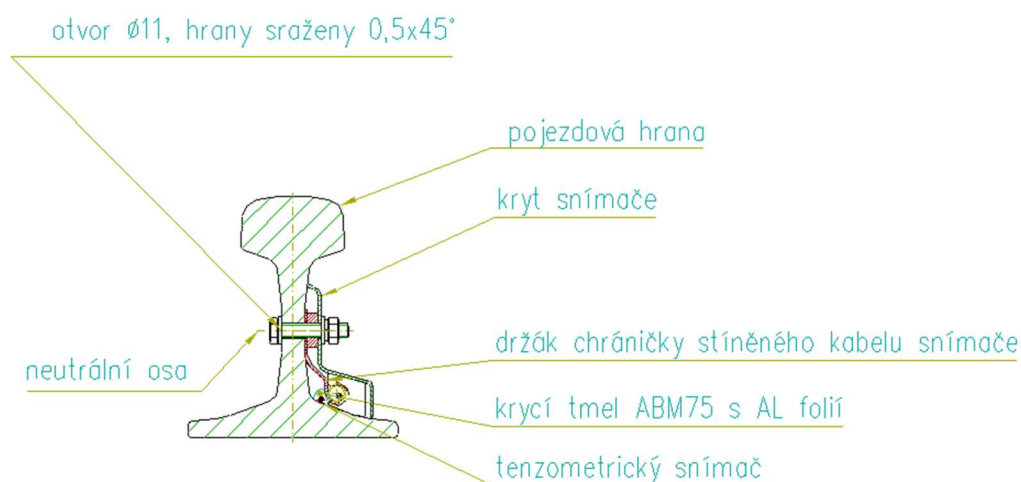
4.2.1.4 Měření projeté zátěže

Pro účely vyhodnocení bylo nutné veškerá naměřená data vztahovat k projeté zátěži. Proto byly na zkušebním úseku v žst. Ústí nad Orlicí nainstalovány do obou kolejí měřiče provozního zatížení vyvinuté v DT, které jsou označovány jako TON 1 [105]. Toto zařízení umožňuje kontinuálně měřit projetou zátěž, rychlost a směr průjezdu vlaku, přičemž je určováno pořadí a hmotnost každé nápravy jednotlivých vlaků. Záznam je vždy proveden do pevné interní paměti a přenos dat se provádí pomocí paměťového média – SD karty. Zařízení je vhodné především pro statistické sledování projeté zátěže na konkrétním úseku trati a pro validační činnost (hodnocení jiných veličin v reálně projeté zátěži). Má nainstalovány interní hodiny a baterii pro případ krátkodobého výpadku proudu. [106] Hlavním výstupem je celková projetá zátěž za požadované období.

Zařízení TON 1 má pak konkrétně celkem 3 části. Jedná se o:

- snímací část;
- elektronickou část;
- napájecí část.

Snímací část je instalována přímo v koleji, ve které je prováděno měření. Ideální je, aby takové místo bylo v delším přímém úseku nebo oblouku o velkém poloměru, aby průjezd vozidel nebyl rušen vlivy z průjezdu oblouku. Snímací část se skládá ze dvou snímačů – tenzometrů, které jsou nalepeny na patu kolejnice. Přes tenzometry je za účelem zamezení poškození připevněn kryt prostřednictvím šroubového spojení v neutrální ose kolejnice. Tenzometry se umísťují na kolejnici do mezipražcového prostoru, přičemž je možné si při instalaci zvolit vzdálenost v rozsahu 3,00 až 3,98 m. Reálná vzdálenost je pak naprogramována do zařízení. Příčný řez kolejnice s umístěnými tenzometry je uveden na následujícím obr. 72. Pohled na instalovaný snímač s krytem je pak na obr. 73.



Obr. 72 Snímací část zařízení TON 1 – příčný řez v místě nalepení tenzometru. [106]



Obr. 73 Snímací část zařízení TON 1 – pohled na kryt snímače v žst. Drahotuše.

Druhou částí zařízení TON 1 je potom elektronická část. Ta je umístěna v plastové krabici, jež je umístěna na ocelové noze se základem ve šterku kolejového lože, resp. drážní stezky a jejímž vnitřkem vedou kabely od tenzometrů a napájecí kabel. Elektronická část se skládá z napájecí desky a vyhodnocovací a řídicí jednotky. Rovněž je možné zadávat některé vstupní informace do zařízení pomocí dvou tlačítek. Jedná se konkrétně o parametry: citlivost zařízení, čas, datum (rok, měsíc, den), nastavení rozvoru kalibrovací lokomotivy (1,80 až 3,40 m) a přesná vzdálenost snímačů – tenzometrů po instalaci (3,00 až 3,98 m). Zařízení rovněž umožňuje zálohování základních dat pomocí baterie (při dočasném výpadku proudu jsou zachovány informace o základním nastavení). Stažení naměřených dat je pak provedeno vložením SD karty do příslušného portu, přičemž po potvrzení akce tlačítkem dojde ke stažení dat. Provedení elektronické části je pak patrné z následujícího obr. 74.



Obr. 74 Elektronická část zařízení TON 1 – boční pohled a pohled na elektronickou jednotku.

Poslední elementem zařízení je napájecí část. Ta se skládá ze standardní rozvaděčové skříně, která je umístěna v blízkosti trati u elektronické jednotky. V rozvaděči je umístěn napájecí transformátor 230 V/12 V (4 kV), z rozvaděče pak vychází napájecí kabel s napětím 12 V AC, přičemž délka kabelu může být až 200 m. Rozvaděč dále obsahuje jističe a svodiče přepětí. Pohled na realizovanou napájecí část v žst. Drahotuše ukazuje obr. 75.



Obr. 75 Elektronická část zařízení TON 1 – boční pohled a pohled na elektronickou jednotku. [105]

Průjezdem každého vlaku jsou pak snímány jednotlivé nápravy, integrovaný program pak vyhodnotí z měřeného napětí na dvou tenzometrech a následně zaznamená do textového souboru: pořadí vlaku daného dne, čas průjezdu, rychlost vlaku, zda proběhla kalibrace, směr poježdění a hmotnost každé nápravy zaokrouhlené na 0,5 t. Kalibrace je prováděna průjezdem známého typu lokomotivy o známé typové hmotnosti na základě znalosti rozvoru této lokomotivy. Zařízení vytváří také souhrnné soubory, kde jsou uvedeny celková projetá zátěž a počet projetých náprav a hmotnosti od každé „tonážní třídy“, což jsou nápravové hmotnosti po 0,5 t. Je možné tedy sestavit i histogram projetých tonážních tříd. Ukázka výstupu je uvedena na následujícím obr. 76. [105]

V žst. Ústí nad Orlicí byly instalovány celkem dva měřiče projeté zátěže, viz schéma na obr. 58. Jeden se nachází v koleji č. 1 a druhý v koleji č. 2. Uspořádání, jak je zřejmé i ze schématu, neumožňuje dostatečně identifikovat vlaky, které jezdí kolejovými spojkami. Jede-li vlak ze žst. Ústí nad Orlicí po nesprávné koleji a průjezdem spojkou 4-3 se dostává na správnou kolej, není tento vlak vůbec ani jedním z měřičů zaznamenán, přičemž tato situace dle jízdního řádu několikrát denně nastane. Naopak jede-li vlak spojkou 1-2 (méně častá situace, ale občas nastává zejména u nákladních vlaků), zaznamenají tento vlak oba měřiče projeté zátěže. Vzhledem k tomu, že není jednoduše zjištělné, jaká zátěž projela kolejovými spojkami, byla tato skutečnost i s ohledem na zcela převládající dopravu v přímém směru zanedbána, ale je nutno tuto skutečnost brát v potaz při hodnocení odbočných směrů výhybek (zejména ojetí poježděných ploch – 3D skenování). Byly tedy

zjišťovány sumy projeté zátěže za jednotlivé dny, které sloužily jako vztažná hodnota pro další provedená měření. [48]

vlak	čas	rych	kalib	směr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0:38	118		A	17	14,5	17	16,5	9,5	8	10,5	9,5	8	7,5	6,5	8	8	9	9,5
2	0:51	78	K	A	18,5	18	22	19	5	5	5	5	5	5	6,5	5	5,5	5	5
3	1:16	64		B	20,5	17,5	16,5	17,5	17	19	14,5	14,5	17	17	17	14	15	14	16,5
4	1:36	109		A	20	21	21,5	20,5	15	14	14	11,5	18	17	16,5	15	14,5	13	15,5
5	1:50	70		A	23	16,5	22,5	19	17	13	16	14	15	19	16,5	16,5	8	9,5	14
6	1:55	77		A	22	20,5	22	21	15	19	17,5	16,5	15,5	18	16	17,5	17	18	17,5
7	2:55	57		A	21	20	22	19,5	5	5	6,5	6,5	5,5	5,5	6,5	7,5	11	10	11
8	3:00	113	K	A	19	17	20,5	20	11,5	10,5	13	13	11,5	13	12,5	12	12	10	10,5
9	3:07	116		A	21,5	18	22,5	17,5	15,5	14	16	16	12	11,5	11,5	10,5	15,5	14,5	13,5
10	3:17	116		A	23	22	21	20	17,5	16	17	15,5	17,5	15,5	15,5	15	15	14	16
11	3:21	46		A	25	24	23,5	24	6	6,5	7	6	5,5	6	6	6,5	14,5	14	13,5
12	3:46	80		A	21,5	21	25	20,5	15	18,5	17,5	18	16	20	17,5	16,5	16,5	19	18
13	4:13	87		A	17	15,5	15	17	9	8,5	9,5	8,5	9	8,5	10	9	9	8,5	10
14	4:23	90		A	25	23	23	22	8,5	6	6	9	8	7	5,5	9	7,5	8,5	7
15	4:45	117	K	A	20,5	17,5	21	20	15,5	14	16,5	17	11	11	12	10,5	12	12	11

Obr. 76 Výřez z textového editoru se zobrazenými průjezdy vlaků v žst. Drahotuše v době probíhající validace zařízení TON 1. Čísla 1 až 15 v prvním řádku jsou pořadí jednotlivých náprav (nejsou zobrazeny ve výřezu všechny nápravy).

4.2.2 Metodiky měření spolupracujících institucí

Současně s vlastním měřením na zkušebním úseku byla realizována také měření dalšími institucemi, jejichž spolupráce vyplynula již z řešení projektu [48] a nadále za jisté modifikace pokračovala. Na měření se podílely následující instituce, které poskytovaly naměřené výsledky pro celkové hodnocení zkušebního úseku. Pravidelně v průběhu celého provozního ověřování se podíleli na měření:

- **VUT v Brně, Fakulta stavební** – měření dynamických účinků na výhybky při průjezdu vlaku;
- **Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera** – měření dynamické odezvy na ložiskových skříních lokomotivy při průjezdu výhybkami;
- **Technická ústředna dopravní cesty** – poskytování surových dat z měřicího vozu železničního svršku.

Dále se také podíleli:

- **ČVUT v Praze, Fakulta stavební** – měření únosnosti železničního spodku při stavbě a dále provedení prvního měření výšek geodetickou metodou přesné nivelace;
- **Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o.** – měření dynamických účinků na výhybky č. 7 a 8 s instalovanými podpražcovými podložkami.

Na zkušebním úseku dále proběhla ještě příležitostně nebo v omezené míře i další měření, jako např. měření hluku (ČVUT, VUT), měření absolutních průhybů paty kolejnicového pásu v oblasti srdcovky vůči pláni tělesa železničního spodku

pomocí posuvného měřítka upevněného na tyči zatlučené do pláň tělesa železničního spodku (ČVUT).

Tato měření ale nebyla pravidelně po celou dobu kontinuálně zajišťována, není tedy znám žádný vývoj daných veličin v průběhu času. Pro měření hluku byla důvodem blízkost protihlukové stěny, která měření znehodnocovala, a od měření průhybů ze strany ČVUT bylo opuštěno z důvodu obdobného měření ze strany VUT sofistikovanějším způsobem dle certifikovaných metodik (viz dále). Tato okrajová měření nebudou dále v rámci této práce rozváděna.

4.2.2.1 Měření dynamických účinků na výhybky

Měření dynamických účinků působících na výhybky při průjezdu železničních vozidel provádělo VUT dle metodik, které byly výsledkem projektu [46–49]. Vzniku předcházelo již dlouhodobé sledování srdcovek výhybek, kterým se zabývají i další práce (např. [4]). Jedná se o dvě rozdílná měření, jedno je zaměřeno na dynamické účinky na železničním svršku a druhé na dynamické účinky na železničním spodku, konkrétně:

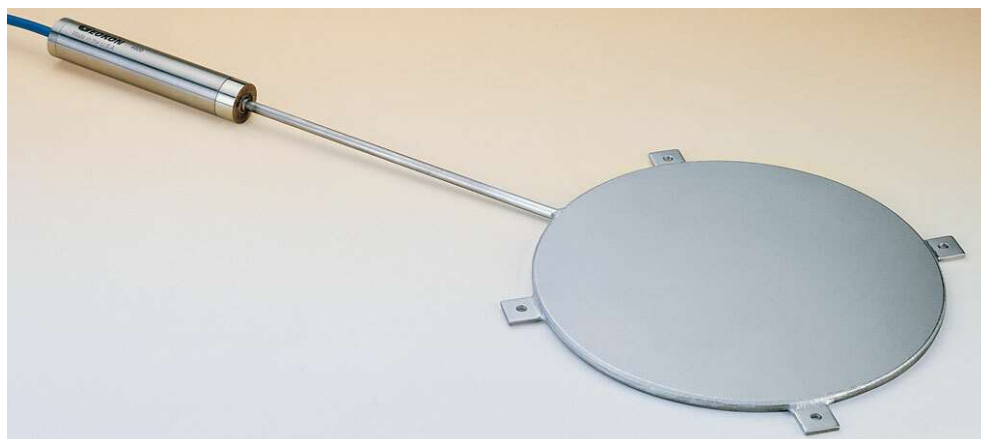
- Měření napětí a vibrací působících na pražcové podloží pomocí tlakových snímačů a akcelerometrů (měřících kamenů) trvale instalovaných na zkušebním úseku. Měření je prováděno dle certifikované metodiky „**Hodnocení dynamických účinků v konstrukci pražcového podloží výhybky**“ [107].
- Měření dynamických účinků na železničním svršku výhybek. Měřeno je pohybové chování konstrukčních částí výhybky (oblast srdcovky). Jsou měřeny posuny a je rovněž analyzováno šíření vibrací. Měření je prováděno dle certifikované metodiky „**Hodnocení dynamických účinků působících na výhybky**“ [108].

Podle metodiky [107] zabývající se **měřením a vyhodnocením dynamických účinků na železničním spodku** jde o následující princip a vyhodnocení. V jednotlivých vrstvách pražcového podloží jsou zabudovány následující snímače:

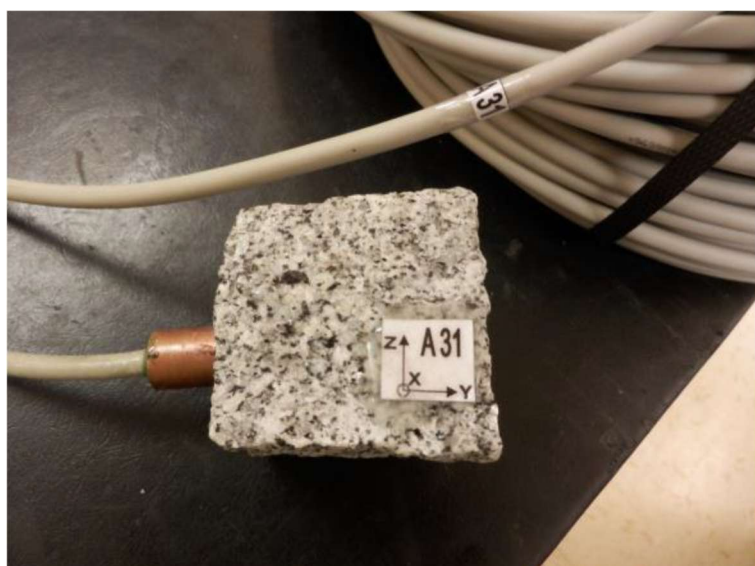
- kolejové lože 20 cm pod pražcem – tzv. měřicí kámen (3osý akcelerometr);
- pláň tělesa železničního spodku – talířový tlakový snímač s rozsahem do 250 kPa;
- zemní pláň – talířový tlakový snímač s rozsahem do 100 kPa.

Rozsahy talířových tlakových snímačů byly stanoveny z předpokládaného statického napětí se započítáním dynamického příspěvku. Použitý tzv. měřicí kámen je v zásadě 3osý akcelerometr (konkrétně typu MEMS) zabudovaný do kamene ve tvaru krychle, který je zhotoven ze stejné nebo obdobné horniny použité pro kolejové lože. Kámen má v sobě vyvrtán otvor, do kterého je vložen a zaklíněn příslušný

akcelerometr. Příklad talířového tlakového snímače je zobrazen na následujícím obr. 77 a zhotovený měřicí kámen je zobrazen na obr. 78.



Obr. 77 Tlakový snímač firmy Geokon.¹⁶



Obr. 78 Měřicí kámen konstrukce VUT. [47]

V každém měřicím řezu se tedy dle metodiky umísťují 3 snímače nad sebe. Podle zkoumané výhybky se pak volí více měřicích řezů, konkrétní příklad ze zkušebního úseku Ústí nad Orlicí je uveden v kap. 4.1.1 a na obr. 58. Příčný řez s naznačenými snímači je pak uveden na obr. 59. Jedná se konkrétně o řez v místě začátku výhybky (z důvodu náhlé změny tuhosti při přechodu běžná kolej/výhybka), v místě přechodu kola z opornice na jazyk (přechod z pružně uložené opornice na tuze uložený jazyk v případě standardní výhybky), pod hrotem srdcovky (přechod kola z hrotu na křídlovou kolejnici) a v běžné koleji za výhybkou pro referenční měření.

Vyhodnocení je prováděno v časové a frekvenční oblasti. Pro transformaci měřeného signálu z jedné oblasti do druhé je dle metodiky užito Fourierovy

¹⁶ Zdroj ilustrativního obrázku: <https://www.geokon.com/4800>

transformace. Pro vyhodnocení signálů z měřicích kamenů je užito následujících metod a parametrů (přímá citace z metodiky [107] s. 9):

1. *Časová rovina:*

- časové zobrazení průběhu zrychlení kmitání ve 3 osách, jednotka: $m.s^{-2}$;
- výpis extrémů zrychlení kmitání ve 3 osách včetně času působnosti, jednotka: $m.s^{-2}$;
- hodnocení efektivní hodnoty zrychlení kmitání ve 3 osách, jednotka: $m.s^{-2}$.

2. *Frekvenční rovina:*

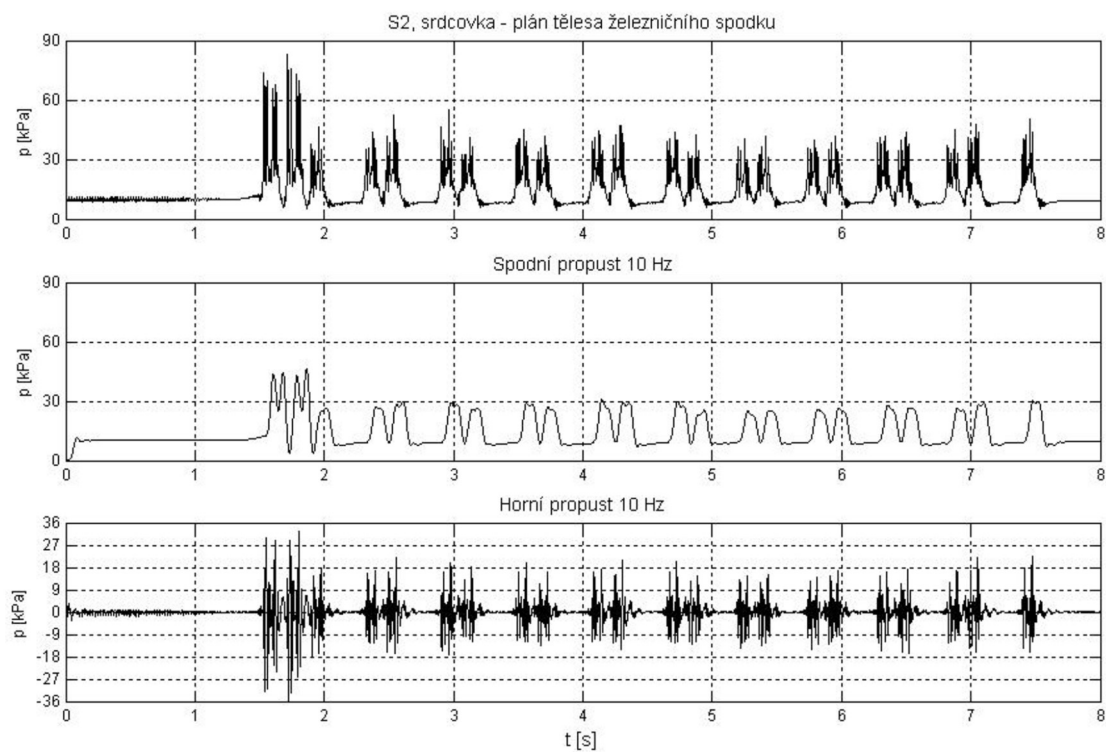
- frekvenční analýza s využitím průběhu amplitudového spektra (pro přechod z časové do frekvenční oblasti bude používán pro všechna měřicí místa algoritmus Fourierovy transformace), doporučený frekvenční interval hodnocení 1 Hz až 500 Hz, jednotka: $m.s^{-2}$;
- pro prezentaci a zjednodušené vyhodnocení bude použita třetino-oktávová analýza, doporučený frekvenční interval hodnocení 1 Hz až 500 Hz, jednotka dB, vztažná hodnota $1 \cdot 10^{-6} m.s^{-2}$.

Obdobně, jak jsou uvedeny metody a parametry pro vyhodnocení signálů z měřicích kamenů, navrhuje metodika [107] také hodnocení pro tlakové snímače (přímá citace z metodiky [107] s. 9-10):

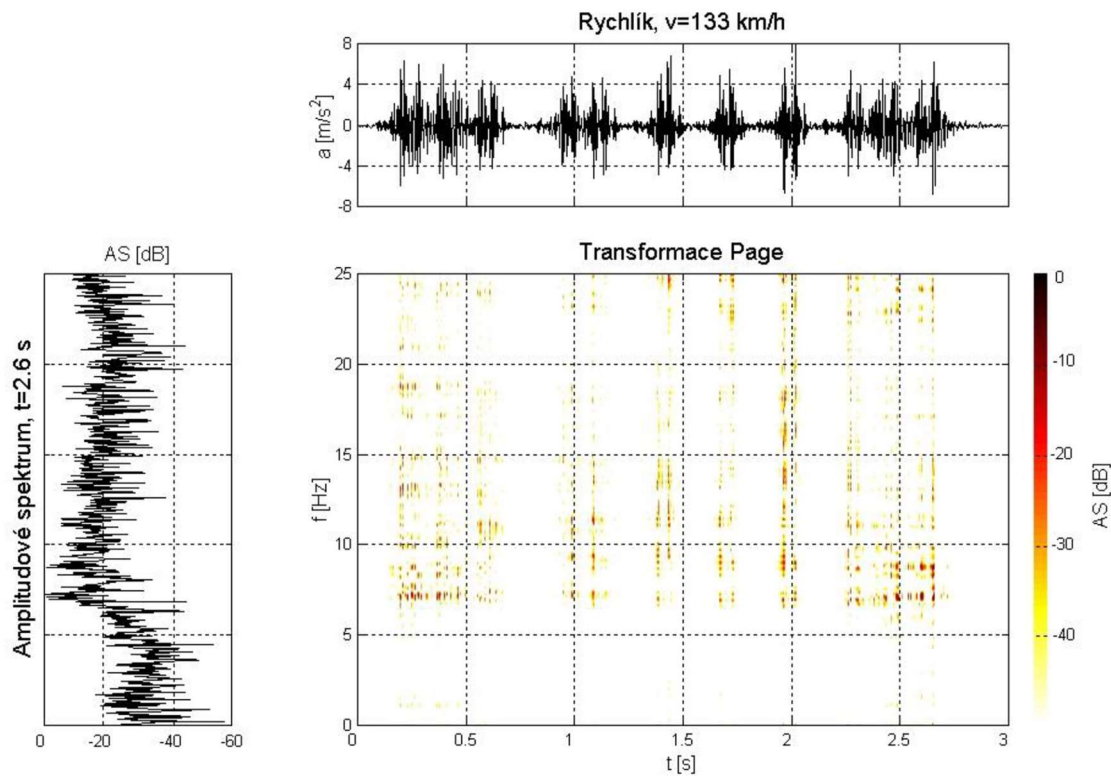
- Časové zobrazení průběhu normálového napětí, jednotka: kPa
- Výpis extrémů, jednotka: kPa
- Záznam filtrovaný s dolní propustí 10 Hz – kvazistatická složka napětí, jednotka: kPa
- Záznam filtrovaný s horní propustí 10 Hz – dynamická složka, jednotka: kPa
- Popisná statistika

Vzorkovací frekvence je metodikou doporučena pro každý kanál na optimálně více než 2,5násobek nejvyšší požadované frekvence analýzy, což je 500 Hz, tedy více než 1250 Hz. Pokud se předpokládá srovnávání dvou výhybek, doporučuje se zaznamenávat vlaky, které jedou přibližně stejnou rychlostí (odchylka do 10 km.h⁻¹), a zaměřit se při hodnocení na podobné typy souprav (např. jednotka s naklápěcími skříněmi, lokomotiva určité řady s vozy obdobné řady apod.). Příklad vyhodnocení z tlakového snímače je uveden na následujícím obr. 79 a vyhodnocení měřicího kamene na obr. 80. Podrobnější informace jsou pak uvedeny v metodice [107].

Vranovice, souprava EC, $V=160$ km/h, záznam č. 4



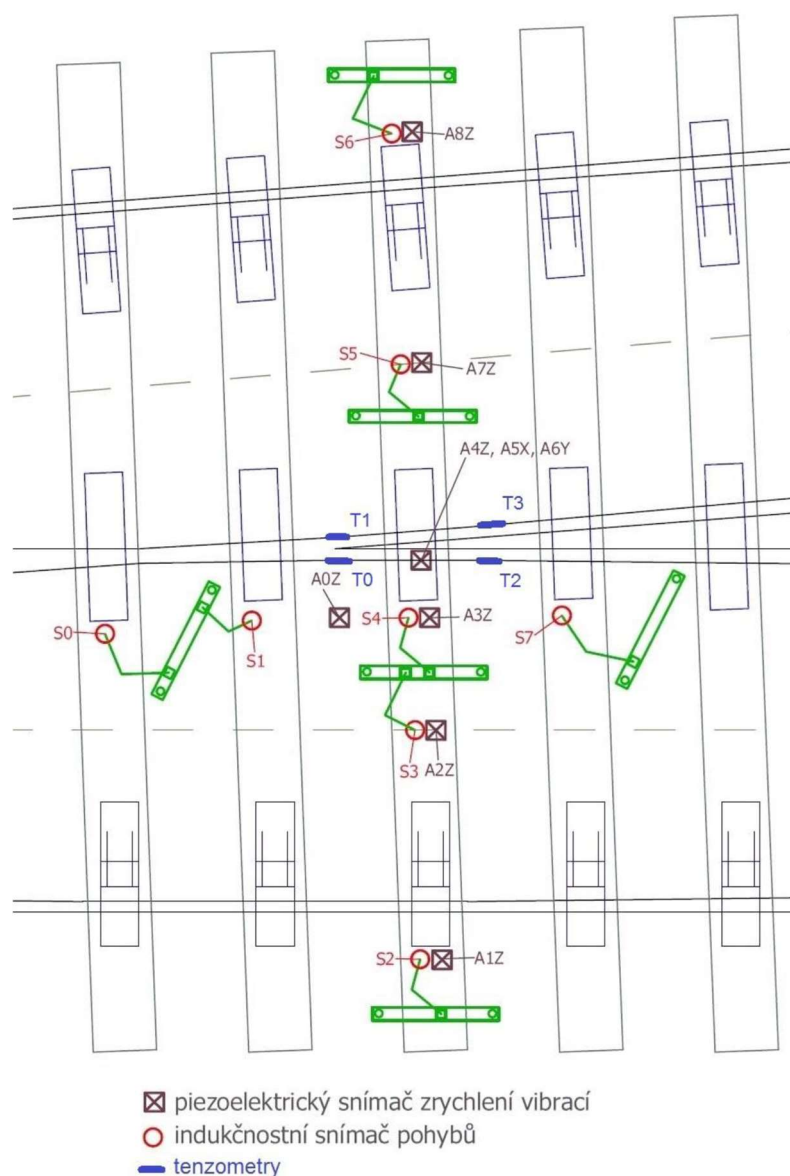
Obr. 79 Ukázka vyhodnocení tlakového snímače (zde konkrétně na pláni tělesa železničního spodku). [107]



Obr. 80 Ukázka vyhodnocení měřicího kamene, konkrétně svislý směr. [107]

Způsob **měření a vyhodnocení měření dynamických účinků na železniční svršek** popisuje certifikovaná metodika [108]. Metodika udává teoretické i praktické zásady pro analýzu dynamických účinků od kolejové dopravy působící na železniční svršek, zejména pak se zaměřením na výhybky – na výměnovou část a na srdcovku. Vzhledem k tomu, že v případě Ústí nad Orlicí byla metodika uplatněna pouze na srdcovku, budou dále popsány pouze základní principy měření a vyhodnocení srdcovky výhybky dle uvedené metodiky.

Metodika hodnotí dynamické účinky ve 3 základních oblastech – měření pohybového chování konstrukce (tj. analýza posunů); šíření vibrací (vč. účinků na kolejové lože) a analýza silového působení. Pro měření a vyhodnocení všech 3 oblastí navrhuje metodika rozmístění snímačů dle následujícího schématu obr. 81.



Obr. 81 Uspořádání snímačů v oblasti srdcovky výhybky. [108]

Pro analýzu pohybového chování konstrukce je navrženo přímé měření posunů pomocí indukčních snímačů délek. Tyto snímače musejí být umístěny na nějaké pevné základně, proto metodika navrhuje použití rámu, který je zatlučen do hloubky 65 cm do kolejového lože, resp. částečně do konstrukční vrstvy pražcového podloží. Uspořádání vystihuje schéma obr. 81, kde zeleně jsou vyobrazeny rámy a červenými kroužky pak snímače posunutí. Jak je vidět, uspořádání je pak do kříže. V podélném směru jsou 4 snímače s tím, že střed sestavy je přibližně hrot srdcovky a v příčném směru jsou snímače umístěny na pražci procházející pod hrotem srdcovky, a to celkem ve 4 kusech (resp. v 5, jelikož snímač S4 je průsečíkem obou směrů). Toto uspořádání umožňuje vykreslení průhybu srdcovkové části výhybky při průjezdu vlaku v příčném i podélném směru.

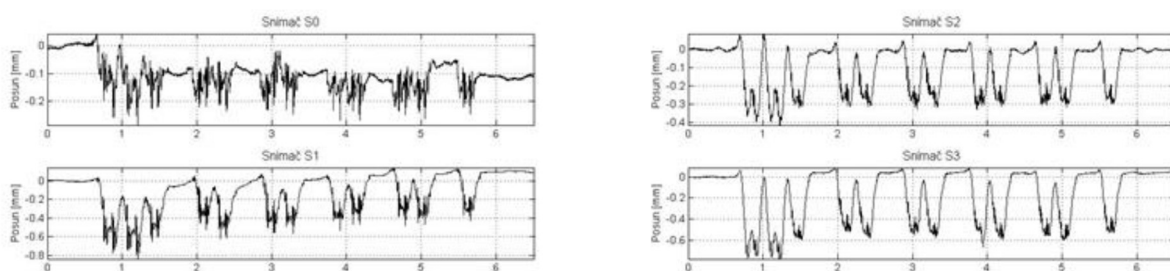
Z hlediska analýzy šíření vibrací jsou stěžejní piezoelektrické snímače zrychlení. Cílem je zjistit míru šíření vibrační energie od místa přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky dále do kolejového lože a ve směru pražce pod hrotem. Šíření vibrací ve svislém směru zajišťují snímače na patě křídlové kolejnice v blízkosti hrotu srdcovky, vedle podkladnice a snímač umístěný na tyči zapuštěné do kolejového lože (tyč slouží jako vlnovod). V příčném směru jsou pak umístěny akcelerometry v blízkosti snímačů posunutí na pražci pod hrotem srdcovky. Tímto je zjištěno, jak se šíří vibrace do osy koleje, resp. až po hlavy pražce. Tím může být indikována také postupná změna podepření pražce do podbití (z původního podepření hlav pražců po podepření v ose koleje).

Silové působení v oblasti srdcovky je dle metodiky sledováno prostřednictvím měření poměrné deformace (mechanického napětí) v konstrukci. Konkrétně se jedná o instalaci 4 tenzometrů na patu křídlové kolejnice dle schématu. Tenzometry se ideálně použijí fóliové odporové (např. výrobce HBM) a nalepené tenzometry se překryjí krycím tmelem. Zjištěné hodnoty deformace se následně přepočítají na napětí dle známého vztahu, viz rovnice (122).

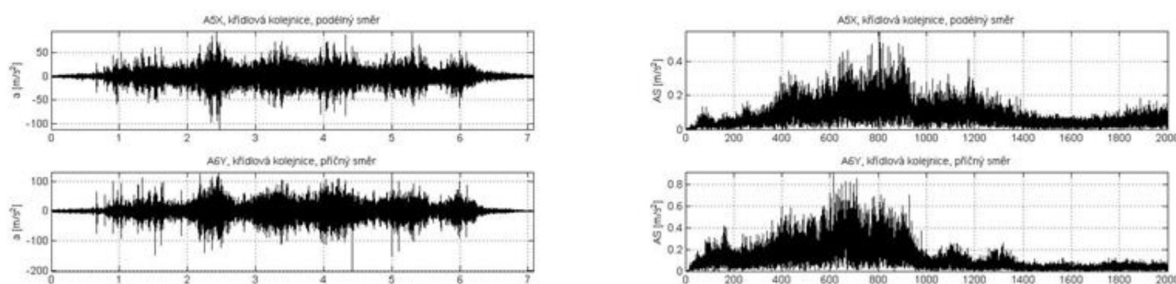
Hodnocení je dle metodiky [108] navrženo obdobným způsobem jako u předcházející metodiky [108] v časové a frekvenční oblasti. Některé vlivy je vhodnější hodnotit v rovině časové (např. statistické hypotézy, globální a lokální maxima) a některé v rovině frekvenční (viz popis vyhodnocení dle metodiky [108]). Pro vyhodnocení deformace měřené tenzometry navrhuje pak metodika následující metody a parametry v časové rovině (citace z metodiky [108] str. 13):

- Časové zobrazení průběhu poměrné deformace, jednotka $\mu\text{m.m}^{-1}$
- Výpis lokálních a globálních extrémů napětí metodou přepočtu z poměrné deformace
- Doporučen je výpočet kolových sil

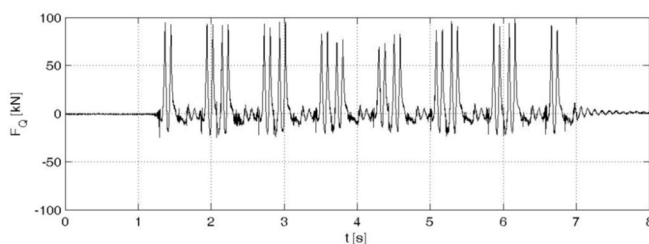
Stěžejním výsledkem analýzy jsou grafické výstupy, jejichž příklady jsou uvedeny níže. Při analýze posunů jsou dle metodiky vyhotoveny grafy, jejichž příklad je uveden na obr. 82. S výhodou se použije uspořádání takové, že vlevo svisle pod sebou jsou umístěny výstupy snímačů podél srdcovky, vpravo pak snímače na pražci kolmo k srdcovce. Při analýze vibrací jsou grafy vždy ve dvojím vyhotovení (viz obr. 83) – v pravé části jsou amplitudová spektra a v levé části jsou časové průběhy kmitání zrychlení, která jsou vypočítána Fourierovou transformací. Ukázka výstupu z vyhodnocení tenzometru je na obr. 84. Více podrobnějších informací k měření a vyhodnocení poskytuje certifikovaná metodika [108].



Obr. 82 Ukázka vyhodnocení ze snímačů svislých posunutí (snímače S0 až S3 dle schématu srdcovkové části). [108]



Obr. 83 Ukázka vyhodnocení ze snímačů zrychlení (snímače A5X, A6Y). [108]



Obr. 84 Ukázka vyhodnocení z tenzometrů (na patě křídlové kolejnice). [108]

Některé stěžejní výsledky měření dle uvedených metodik a způsobů vyhodnocení jsou dále uvedeny v kapitole 4.3.2.1.

4.2.2.2 Měření dynamické odezvy na ložiskové skříní lokomotivy

Všechna výše uvedená měření se zaměřují na zjišťování toho, jak vozidlo působí na výhybku a jak ji v průběhu času opotřebovává. Aby byl pohled na výhybky komplexní, bylo prováděno měření interakce také ze strany vozidla. Za tímto účelem byla oslovena Univerzita Pardubice¹⁷ (UPCE), která se takovým typem měření zabývá již delší dobu. [109, 110] Zadáním úkolu tedy bylo měřit dynamickou odezvu na ložiskové skříní lokomotivy při průjezdu zpružněnými výhybkami a výhybkou referenční, navrhnout způsob hodnocení a provést srovnání výhybek mezi sebou. [111] V rámci činnosti byly při měřeních hodnoceny také charakteristiky kontaktní geometrie reálného dvojkolí a koleje jakými jsou poloha dotykových bodů, delta r funkce, tangens gama funkce a ekvivalentní konicita. [112]

Konkrétně realizovaná měření a vyhodnocení na lokomotivě nese souhrnný název vycházející z příslušné metodiky, tj. Hodnocení dynamického zatížení srdcovkové části a zpružněných výhybek na základě svislého zrychlení neodpružených částí pojížděného vozidla. [113] Toto měření bylo realizováno již v projektu [48, 49] a také po celou dobu provozního ověřování (validace) výhybek v žst. Ústí nad Orlicí. Měření stejnou řadou lokomotiv byla prováděna vždy na jaře a na podzim lokomotivy na běžných vlacích. Obvykle je pro tato měření určena lokomotiva řady 380, viz obr. 85. Nápravové zatížení tohoto vozidla je 22 t s nevypruženou hmotností na nápravu 2,6 t. V roce 2017 proběhlo i jedna měřicí kampaň s jinou lokomotivou s vyšší nevypruženou hmotností na nápravu.

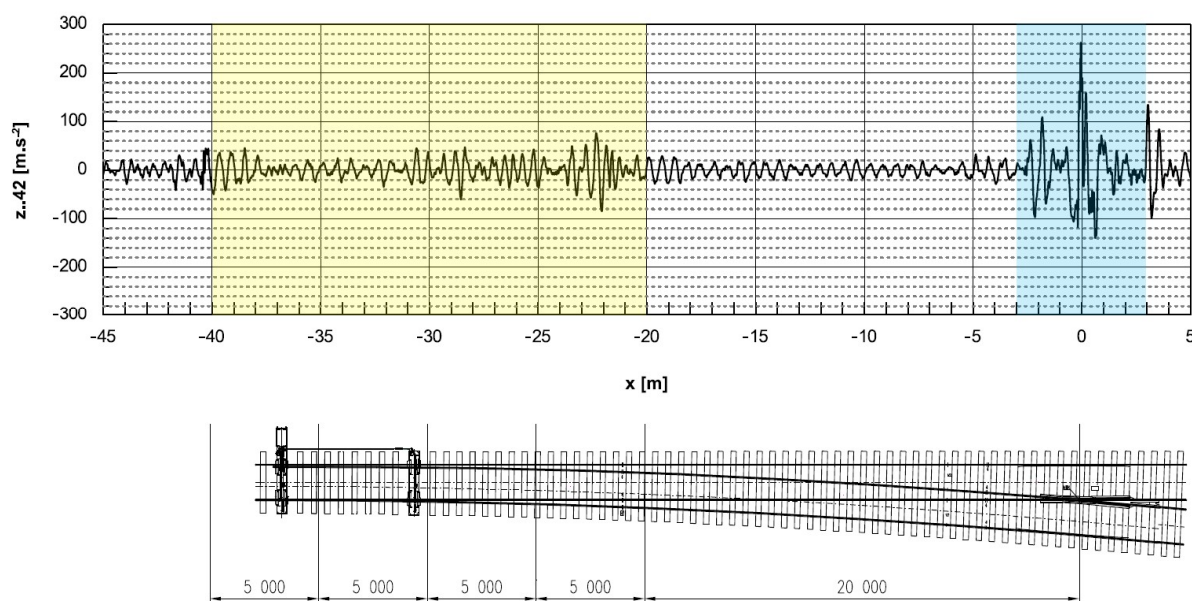


Obr. 85 Lokomotiva ř. 380 před instalací měřicí techniky.

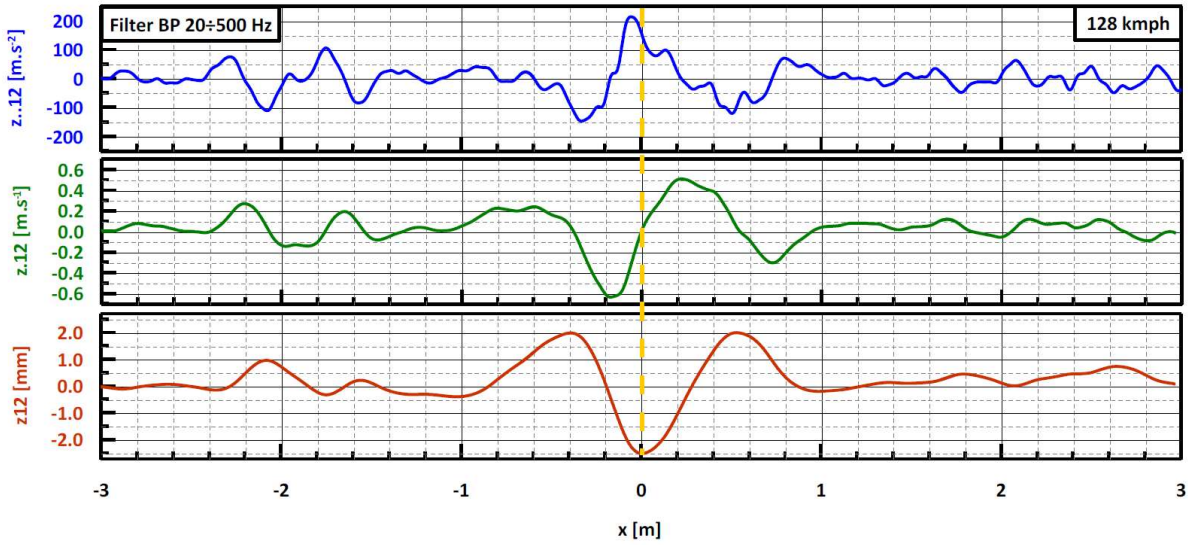
¹⁷ Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, Oddělení kolejových vozidel, Dopravní fakulta Jana Pernera

Pro toto měření a vyhodnocení byla také vytvořena certifikovaná metodika [113] v rámci projektu TAČR TE01020038 *Centra kompetence drážních vozidel*, jehož se UPCE přímo účastnila. Metodika byla certifikována v roce 2014 před započítím měření v žst. Ústí nad Orlicí. Jelikož není hodnocení míry dynamických účinků při průjezdu vozidla výhybkami zakotveno v žádném předpise nebo normě, vznikl tedy velmi vhodný nástroj pro tato měření.

Základním principem je měření svislého zrychlení na ložiskové skříní dvojkolí železničního vozidla. Při samotném měření je používána vysoká vzorkovací frekvence 20 kHz, následně je signál filtrován na 20 až 500 Hz. Průběh svislého zrychlení při průjezdu výhybkou vypadá následujícím způsobem (viz obr. 86). [111] Žlutě podbarvená oblast je výměnová část, oblast kluzných stoliček, modře podbarvená plocha grafu je pak oblast srdcovky, kde je dobře patrná výrazná špička v dynamické odezvě, která je vyvolána přechodem kola z hrotu na křídlovou kolejnici, resp. opačně. Se signálem je následně pracováno tak, aby byly odhaleny veškeré potřebné informace. Signál svislého zrychlení je tedy numericky integrován, čímž je získán průběh rychlosti, a po další integraci je získán průběh svislé výchylky kola, viz grafy obr. 87. Výchylka kola je zatížena i výchylkou koleje, což zde není zohledněno. (Výchylku koleje lze změřit postupem viz kap. 4.2.2.1.)

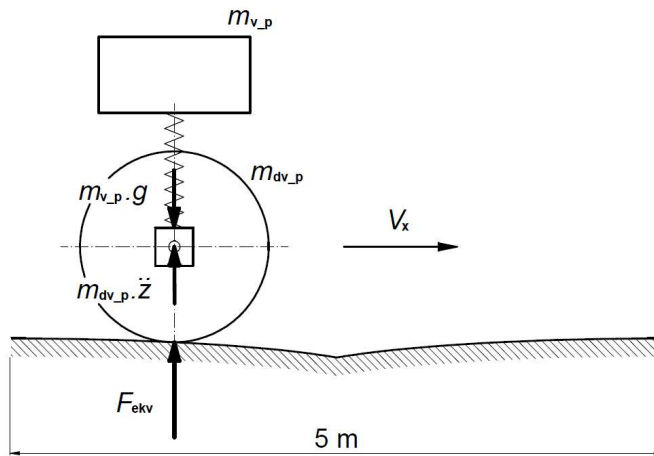


Obr. 86 Průběh svislého zrychlení při průjezdu výhybkou. [113]



Obr. 87 Integrace svislého zrychlení při průjezdu srdcovkovou částí výhybky. [113]

Za účelem stanovení ekvivalentního zatížení při průjezdu srdcovkou byla použita stejná certifikovaná metodika. [113] Tato metodika uvažuje pro vyhodnocení zjednodušený dynamický model vozidla při průjezdu výhybkou (viz obr. 88). Uvažujeme statickou sílu, kterou působí vozidlo na kolej, a k ní je přičtena tzv. ekvivalentní dynamická síla, reprezentující setrvačné účinky nevypružených hmot (vztahy (131)(132), značení bylo převzato z metodiky. [113])

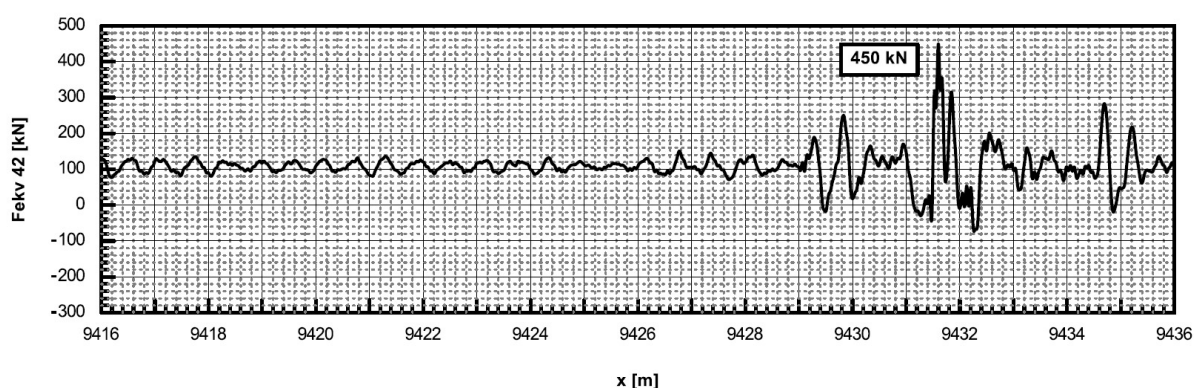


Obr. 88 Zjednodušený dynamický model vozidla při průjezdu srdcovkovou částí výhybky.

$$F_{ekv} = m_{v.p} \cdot g + F_{ekv_dyn} \quad (131)$$

$$F_{ekv_dyn} = \frac{1}{2} m_{dv.p} \cdot a_{ekv} \quad (132)$$

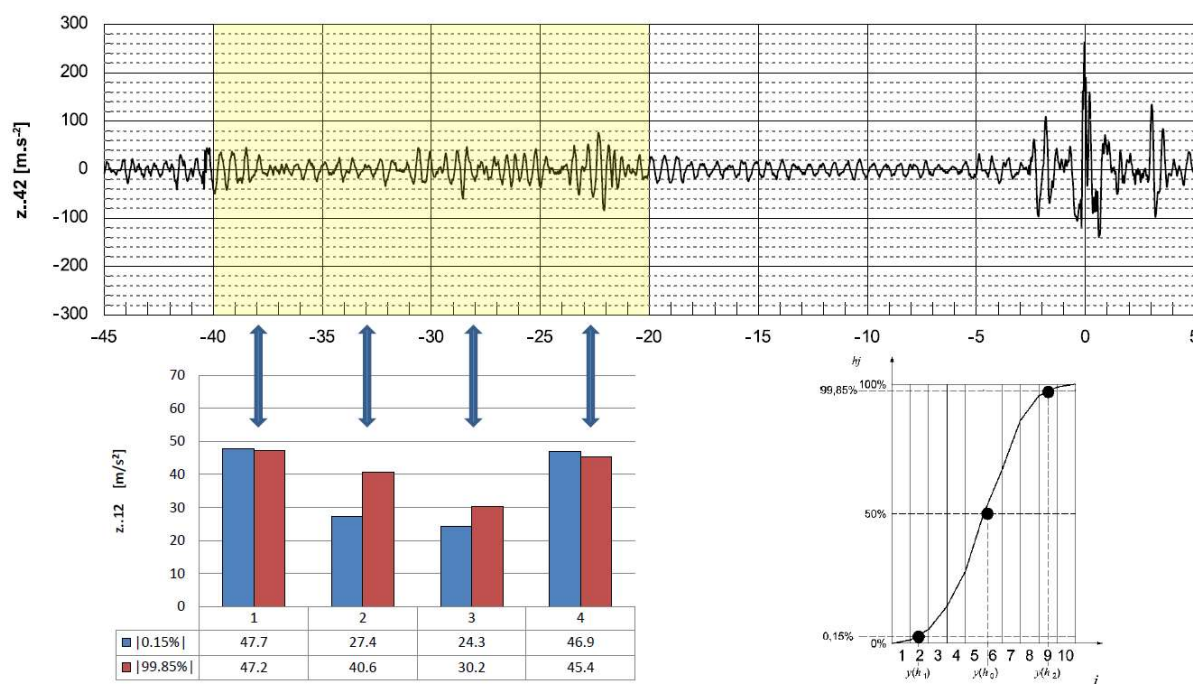
Příklad průběhu ekvivalentní zatížení F_{ekv} při průjezdu lokomotivy přes srdcovku je uveden na obr. 89. Měřeno bylo každého kolo, lze tedy udělat průměr ze 4 hodnot z jednoho průjezdu měřící lokomotivou. Je třeba zdůraznit, že hodnota F_{ekv} není rovna přímo kolové síle, ale je nutné ji chápat pouze jako ekvivalent dynamického účinku pro porovnávací hodnocení výhybek (proto nazýváno jako „ekvivalentní zatížení“). Zvolený přístup má i z hlediska publikovaných prací [114–117] výbornou opakovatelnost.



Obr. 89 Ukázka přepočteného měřeného signálu na ekvivalentní zatížení. [113]

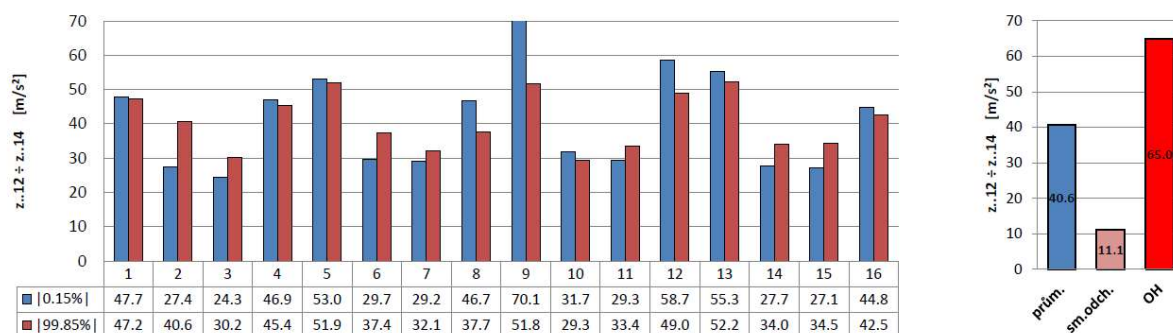
Hodnocení oblasti zpružnění výměnové části (tj. oblast kluzných stoliček) je pak realizováno oproti výše popsanému hodnocení srdcovky odlišně. Jak je vidět z obr. 86, výměnová část (žlutě podbarvená), byla rozdělena na 4 části délky 5 m. Začátek výměnové části byl s ohledem na geometrii výhybky zvolen ve vzdálenosti 20 m od počátku souřadného systému, který je zvolen v místě přechodu kola v srdcovce (v místě měřené špičky). Toto místo je možné dobře identifikovat z měřeného signálu. To, že hodnocená oblast přesahuje oblast kluzných stoliček není problém, jelikož se předpokládá, že příznivý vliv zpružnění ovlivní průjezd vozidla i před, resp. za oblastí zpružněných kluzných stoliček (dle směru jízdy). Z těchto 5metrových úseků jsou pak počítány statistické veličiny, tj. statistické hodnocení zrychlení v oblasti zpružnění.

Inspirací pro vytvoření metodiky hodnocení výměnové části byly postupy z normy EN 14363 *Železniční aplikace - Přejímací zkoušky jízdních charakteristik železničních vozidel - Zkoušení jízdních vlastností a stacionární zkoušky*. [118] Jak je vidět z následujícího obrázku obr. 90, signál je v každé dílčí 5metrové oblasti rozdílný. Hodnocení oblasti jako celku tedy nebylo shledáno jako vhodné, jelikož by nezachytilo také případnou různorodost signálu, resp. chování vozidla. Každý dílčí úsek je proto hodnocen zvlášť.



Obr. 90 Statistické hodnocení zrychlení v oblasti zpružnění.

Z každého 5metrového úseku jsou určeny percentily 0,15 % a 99,58 %. Z každého kola (snímače) je k dispozici 8 hodnot, celkem tedy 32 hodnot z jednoho průjezdu, viz obr. 91.



Obr. 91 Statistické hodnocení zrychlení v oblasti zpružnění – hodnoty z celé lokomotivy.

Z hodnot je následně spočítán průměr, směrodatná odchylka a tzv. očekávaná hodnota zrychlení $OH_{z..}$, kterou je prováděno samotné hodnocení průjezdu vozidla výměnovou částí. Očekávaná hodnota $OH_{z..}$ je dána následujícím vztahem:

$$OH_{z..} = \text{střední hodnota percentilů} + 2,2 \cdot RMS, \quad (133)$$

tedy součtem střední hodnoty percentilů a 2,2násobku tzv. efektivní hodnoty RMS (Root Mean Square). Očekávaná hodnota $OH_{z..}$ tak zahrnuje informaci o způsobu kmitání i směrodatnou odchylku (rozkmít). Pokud tedy vozidlo pojede výměnovou

částí neklidně s různě velkými rozkmity, odrazí se to i v očekávané hodnotě $OH_{z...}$, která vyjde daleko větší. Pojede-li ale vozidlo klidně přes celou délku hodnocené výměnové části, hodnota RMS neovlivní výsledek. Očekávaná hodnota $OH_{z...}$ tedy zohledňuje vliv rozdílné dynamické odezvy. Jelikož se nejedená o zcela stacionární proces, byla proto převzata tato filozofie z EN 14363. Výsledky a diskuze k vyhodnocení měření je podrobně popsána v následující kapitole 4.3.

4.2.2.3 Měřicí vůz železničního svršku TÚDC (CTD)

Nezanedbatelným přínosem pro sledování zkušebního úseku se zpružněnými výhybkami byl také příspěvek samotné Správy železnic, která pravidelně poskytovala data z měřicího vozu železničního svršku. Činnost související s měřicím vozem spadá konkrétně pod organizační jednotku Centrum telematiky a diagnostiky (CTD, do roku 2020 Technická ústředna dopravní cesty, TÚDC). Tato organizační jednotka zajišťuje s celosíťovou působností diagnostická a provozní měření stavu tratí, trakčního vedení, vybraných sdělovacích, zabezpečovacích a automatizačních zařízení, elektrotechnických a energetických zařízení, měření rádiových sítí a další specializovaná měření v oboru železniční dopravní cesty a technický servis pro železniční infrastrukturu, a to ve všech etapách jejího rozvoje, výstavby a provozu. Z hlediska používaných měřicích prostředků TÚDC je pro sledování geometrie koleje a jejího vývoje v čase nejlepší využít dat z **měřicího vozu železničního svršku**, viz obr. 92.

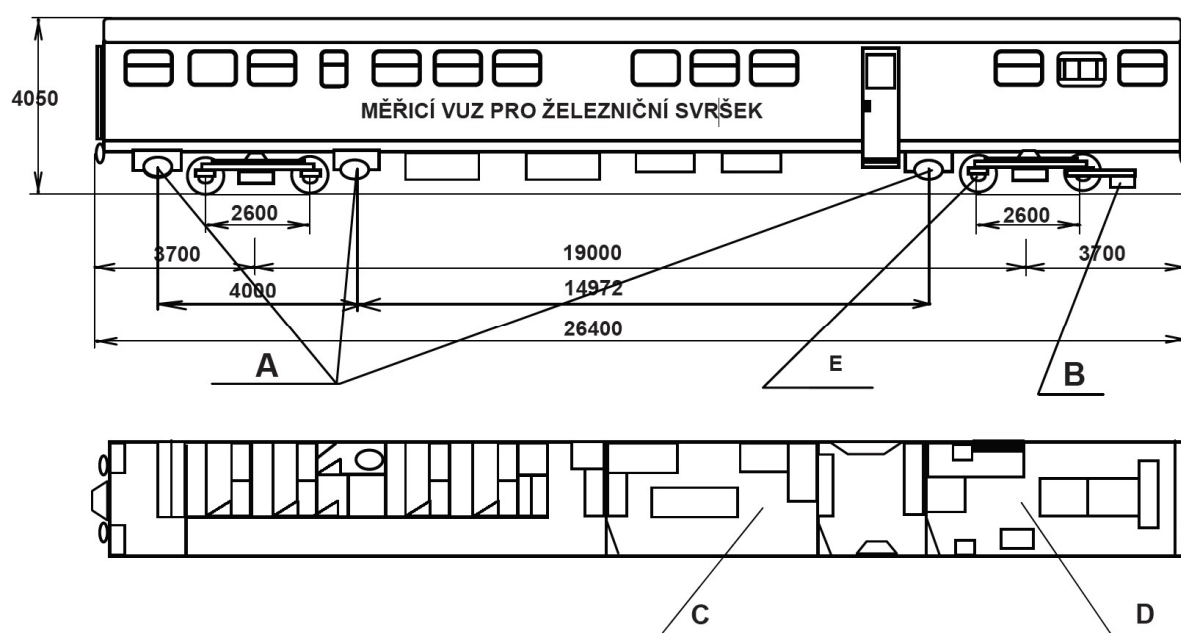


Obr. 92 Ilustrativní obrázek měřicího vozu železničního svršku při průjezdu žst. Prosenice.

Měřicí vůz železničního svršku je určen zejména pro následující měření a hodnocení:

- měření geometrických parametrů koleje;
- měření vertikální mikrogeometrie kolejnic;
- měření příčného profilu kolejnic;
- hodnocení odezvy vozidla.

Podrobnější informace ohledně popisu vozu a principu měření a vyhodnocení jsou uvedeny v předpise SŽDC SR103/4(S) „Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením“. Vůz může měřit v obou směrech jízdy, konkrétně ve správném i nesprávném postavení vozu, přičemž reprodukovatelnost výsledků měření při stejném postavení vozu vyhovuje požadavkům přesnosti měření. Výhybkami projíždí měřicí vůz bez omezení, z hlediska principu měření ale není umožněno správné vyhodnocení naměřeného rozchodu koleje a směru v oblasti přídržnic. [119]



Obr. 93 Uspořádání měřicího vozu. [119]

Na obr. 93 je zobrazen schematicky měřicí vůz a označeny hlavní části jeho měřicího systému. **Pozice A** jsou snímací jednotky tětiového systému měřených parametrů GPK; **pozice B** je snímací jednotka příčného profilu kolejnic; **pozice C** je společenská místnost s monitory pro sledování výsledků měření GPK; **pozice D** je prostor s vyhodnocovací a ovládací technikou a tiskárnami výstupních sestav a **pozice E** jsou snímače vertikálního povrchu kolejnic.

V rámci hodnocení zkušebního úseku jsou pro další práci používány pouze následující veličiny: směr koleje (SL, SP), podélná výška (VL, VP), převýšení koleje (PK) a rozchod koleje (RK). Data z měřicího vozu poskytují oproti měření výšek metodou nivelace a měření rozchodů koleje ruční rozchodkou jiný pohled na stav výhybky (resp. koleje), jelikož jsou tyto informace sbírány při průjezdu pod zatížením výhybky vozidlem.

Četnost průjezdu měřicího vozu konkrétním úsekem trati záleží na významu trati (resp. na řádu koleje). Koridorové tratě obvykle projíždí měřicí vůz 3krát ročně, konkrétně stanicí Ústí nad Orlicí většinou v březnu, v červenci a v listopadu.

Vhodné je ještě zmínit problematiku přesnosti naměřené hodnoty z hlediska přiřazení příslušného staničení koleje v trati. Z tohoto pohledu uvádí předpis [119] následující. *Přesnost polohové identifikace závad GPK je dána jednak přesností snímání dráhy vozu a dále přesností určení polohy MV (dosažitelná přesnost 1 m na 1 km). Pro dosažení požadované přesnosti a reprodukovatelnosti při opakovaném měření jsou v části sítě osazeny začátky a konce měřicích úseků magnetickými značkami, které umožňují automatickou korekci dráhy během měřicí jízdy vozu.*

Z poskytnutých naměřených dat je patrné, že zjištěné lokální extrémy jsou při mnohých měřeních mírně posunuty (cca do 0,5 m), přičemž je zřejmé, že se jedná o jedno a totéž konkrétní místo ve výhybce při různých průjezdech měřicího vozu. Tato skutečnost byla při vyhodnocení vzata v potaz a byl proveden ručně posun staničení tak, aby lokální extrémy při jednotlivých průjezdech byly zobrazeny ve stejné kilometrické poloze.

Poskytovaná data jsou pak surového nezpracovaného charakteru v textovém souboru. Ukázka uspořádání dat v souboru je uvedena na následujícím obr. 94. První sloupec udává staničení koleje (kilometrickou polohu) v kroku 0,25 m. Následují hodnoty jednotlivých veličin, které jsou uvedeny výše (směr, podélná výška, převýšení koleje a rozchod koleje). Data jsou dále importována do softwaru MS Excel, kde jsou dále zpracovávána.

UstiNadOri_K2_20150730 – Poznámkový blok									
Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda					
KM.M	SL_D1	SP_D1	SK_D2	VL_D1	VP_D1	VK_D2	PKcel	RK1-i	KRcel
255.490	-0.23	0.13	0.11	-0.82	-0.24	0.03	1.38	0.08	0.31
255.49025	-0.10	0.04	0.09	-0.82	-0.15	0.03	0.99	0.20	0.23
255.49051	0.04	-0.01	0.07	-0.80	-0.07	0.04	1.27	0.13	0.25
255.49075	0.21	0.01	0.05	-0.79	-0.02	0.04	1.08	0.32	0.28
255.491	0.36	0.11	0.03	-0.79	0.00	0.05	1.07	0.22	0.33
255.49124	0.49	0.24	0.01	-0.78	0.00	0.05	1.26	0.30	0.38
255.49150	0.57	0.32	0.00	-0.77	-0.03	0.04	1.22	0.30	0.42
255.49174	0.59	0.34	-0.02	-0.75	-0.11	0.04	1.18	0.31	0.42
255.492	0.57	0.30	-0.03	-0.71	-0.22	0.04	1.14	0.34	0.40
255.49225	0.51	0.25	-0.05	-0.67	-0.35	0.03	1.37	0.48	0.43
255.49251	0.45	0.22	-0.07	-0.61	-0.47	0.03	1.44	0.40	0.40
255.49275	0.37	0.18	-0.08	-0.55	-0.56	0.02	1.64	0.48	0.41
255.493	0.29	0.13	-0.09	-0.49	-0.59	0.01	1.80	0.46	0.40
255.49324	0.23	0.05	-0.11	-0.44	-0.58	0.00	1.77	0.50	0.34
255.49350	0.21	-0.02	-0.12	-0.39	-0.59	0.00	2.10	0.52	0.29

Obr. 94 Ukázka uspořádání poskytnutých naměřených surových dat z MVŽSv.

Vyhodnocení dat z měřicího vozu se dá pojmout dvěma způsoby. Jednak lze zjišťovat, zda některá z měřených veličin nepřekračuje mezní odchylky, které definuje norma ČSN 736360-2 *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba* [97], přičemž toto je primární účel měření měřicím vozem železničního svršku. Druhým způsobem přístupu k vyhodnocení je zjišťování, jakým způsobem dochází ke změně veličin GPK v projeté zátěži, resp. v čase. V rámci vyhodnocení zkušebního úseku byly použity oba přístupy, nicméně zřetel byl brán zejména na dlouhodobé sledování a vývoj odchylek měřených veličin v čase.

Z hlediska hodnocení veličin z pohledu mezních odchylek je stěžejní norma ČSN 73 6360-2 [97]. Ze všeobecného hlediska posuzování je každá hodnocená kolej zařazena do rychlostního pásma, přičemž se aplikuje nejvyšší projektovaná traťová rychlost v daném úseku (tj. vč. zohlednění rychlostí V_{130} , V_{150} , event. V_k). Rychlostních pásem je celkem 6 (RP0 až RP5); pro žst. Ústí nad Orlicí v posuzovaném úseku se uplatní rychlostní pásmo RP3, které je pro projektované rychlosti $120 < V \leq 160$ km.h⁻¹ (rychlosti jsou konkrétně uvedeny v kap. 4.1). Norma rozděluje požadavky na uvedené veličiny při stavbě a přejímce prací a pak za provozu a při údržbě. Z logiky věci budou používány pro účely hodnocení mezní odchylky pro provoz a údržbu. Provozní odchylky geometrických veličin se dělí do třech stupňů, resp. kategorií:

- AL – mez sledování;
- IL – mez zásahu (opravy);
- IAL – mez bezodkladného zásahu;

přičemž stupně AL a IL jsou definovány jako provozní odchylky a stupeň IAL je definován jako mezní provozní odchylky.

V následujícím textu bude uveden souhrn hodnot, které jsou použity pro hodnocení výhybek v žst. Ústí nad Orlicí.

Rozchod koleje běžné koleje se v případě provozních a mezních provozních odchylek hodnotí změnou rozchodu koleje na 2 m délky koleje a střední hodnotou rozchodu koleje na 100 m délky koleje. Provozní a mezní provozní odchylky ve výhybce potom definuje konkrétně normativní příloha B normy [97]. Výhybka je rozdělena na následující části:

- výměnová část a kořen jazyka;
- střední část přímá;
- střední část oblouková;
- srdcovka;
- koncový styk v přímé větvi;
- koncový styk v odbočné větvi.

Pro předmětné rychlostní pásmo RP3 stanoví norma následující provozní a mezní provozní odchylky pro jednotlivé stupně AL, IL a IAL.

Tab. 7 Provozní a mezní provozní odchylky rozchodu koleje dle [97].

Stupeň:	AL (+)	AL (-)	IL (+)	IL (-)	IAL (+)	IAL (-)
Část výhybky:						
Výměnová část, kořen jazyka	+5	-3	+8	-4	+12	-5
Střední část přímá	+5	-3	+10	-4	+13	-5
Stř. část oblouková	+5	-3	+10	-4	+15	-5
Srdcovka	+3	-2	+4	-3	+5	-4
Konc. styk přímá	+5	-3	+10	-4	+13	-5
Konc. styk obl.	+5	-3	+10	-4	+13	-5
Běžná kolej:						
Přímá	+10	-5	+15	-7	+20	-8
Přechodnice, oblouk	+18	-5	+22	-7	+27	-8

Tyto hodnoty byly uvažovány následně při hodnocení výstupů z měřicího vozu. Stupeň IL byl zaznačen do všech grafů výsledků rozchodu koleje a v případě překročení hodnoty IL bylo diskutováno, zda nebyl překročen i další stupeň a bylo dále zkoumáno, v jakém místě se překročení odchylky vyskytlo a co mohlo mít na překročení parametru vliv. Při hodnocení výhybek mezi sebou se pak hodnotilo, v jakých délkách u jednotlivých porovnávaných konstrukcí se překročení parametru rozchodu koleje vyskytlo.

Dále byla hodnocena **výšková poloha kolejnicových pásů**. Hodnoty relativních provozních odchylek a mezních relativních provozních odchylek (tj. výška levá – VL, výška pravá – VP) jsou pro předmětné rychlostní pásmo RP3 uvedeny v následující tabulce.

Tab. 8 Provozní a mezní provozní odchylky výškové polohy kolejnicových pásů dle [97].

	Stupeň AL	Stupeň IL	Stupeň IAL
VL (RP3)	±7	±10	±12
VP (RP3)	±7	±10	±12

Provozní a mezní provozní odchylky **převýšení koleje** (tj. PK) jsou hodnoceny jako odchylky od projektované, resp. předepsané, hodnoty. Norma upřesňuje, že odchylky PK nejsou samy o sobě bezpečnostním kritériem, ale vyjadřují žádoucí standard údržby. Provozeroschopnost se pak dále posuzuje dle nedostatku převýšení. Záporné odchylky převýšení –PK se pak berou jako průměr na délce 2,0 m. Pro rychlostní pásmo RP3 norma stanoví následující hodnoty provozních a mezních provozních odchylek.

Tab. 9 Provozní a mezní provozní hodnoty převýšení koleje dle [97].

	Stupeň AL	Stupeň IL	Stupeň IAL
PK (RP3)	±16	±18	±20

Norma definuje také provozní a mezní provozní hodnoty **zborcení koleje** (ZK) při kontinuálním měření. Tyto hodnoty přímo měřicí vůz neměří, lze je však jednoduše dopočítat dle výše uvedeného vztahu (130) ze známého převýšení (PK) a stanovené měřické základny. Byla počítána zborcení na měřické základně $l = 3 \text{ m}$, 6 m a 12 m . Pro tyto měřické základny lze spočítat následující provozní a mezní provozní odchylky pro rychlostní pásmo RP3.

Tab. 10 Provozní a mezní provozní hodnoty zborcení koleje dle [97].

Stupeň provozních hodnot	Hodnoty zborcení koleje ZK [mm.m ⁻¹]	Délka měřické základny l [m]
Stupeň AL	max 4,0	3
	max 3,2	6
	max 2,1	12
Stupeň IL	max 5,0	3
	max 4,0	6
	max 2,6	12
Stupeň IAL	max 6,0	3
	max 4,8	6
	max 3,1	12

Veličiny směr levý (SL), pravý (SP) a v ose (SK) nebyly v rámci sledování výhybek hodnoceny, jelikož vzhledem ke krátké délce hodnocené výhybky a měření pouze v přímém směru byl parametr shledán jako méně vypovídající.

4.3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

4.3.1 Výsledky vlastního měření

4.3.1.1 Měření výšky kolejnicových pásů metodou přesné nivelace

Měření metodou nivelace probíhalo dvakrát ročně, obvykle na jaře a na podzim, v případě významného údržbového zásahu také nestandardně před zásahem a po zásahu. Souhrn měření, vč. příslušné projeté zátěže, je uvedeno v tabulce níže (tab. 11).

Tab. 11 Souhrn měření metodou nivelace vč. příslušné projeté zátěže.

č. a datum měření	Projetá zátěž [mil hrt]		poznámka
	kolej č. 1 výhybka č. 2 a č. 3	kolej č. 2 výhybka č. 4	
I – 16. 10. 2014	4,951	3,646	vých. 2 neměřena
II – 28. 3. 2015	17,946	17,397	vých. 2 neměřena
III – 11. 6. 2015	23,406	23,828	
IV – 6. 11. 2015	35,072	37,408	
V – 16. 5. 2016	49,359	54,386	
VI – 26. 8. 2016	56,570	63,051	
VII – 16. 11. 2016	62,935	70,118	
VIII – 19. 5. 2017	77,061	86,377	
IX – 31. 10. 2017	90,383	100,852	
X – 9. 4. 2018	102,978	114,533	
XI – 15. 10. 2018	118,787	131,461	
XII – 12. 4. 2019	133,906	148,164	
XIII – 25. 11. 2019	153,113	168,240	

Výsledky z nivelace prováděné dle metodiky popsané výše (kap. 4.2.1.1) byly následující:

- odchylky od projektované výškové polohy;
- převýšení koleje;
- sedání v projeté zátěži.

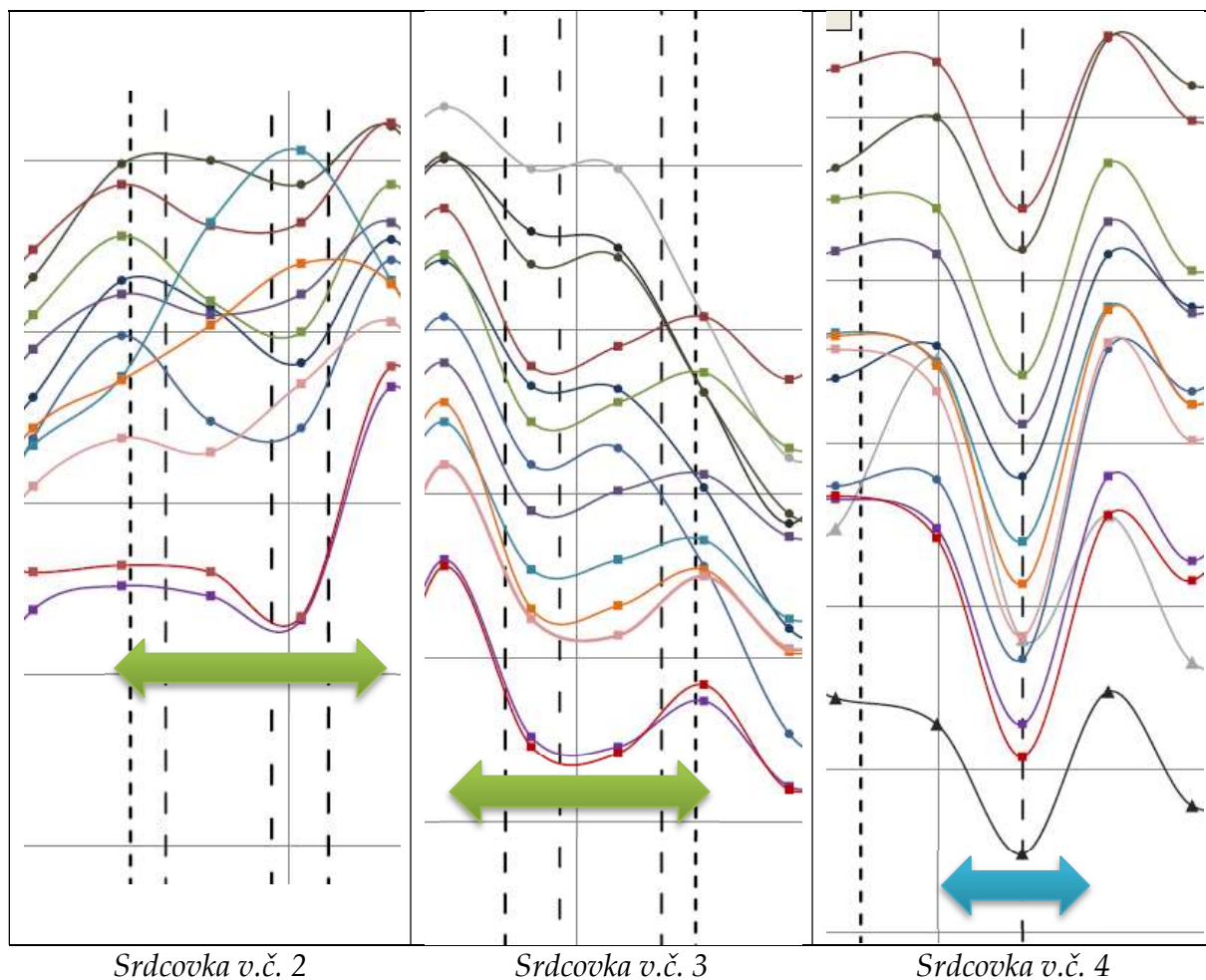
Vše výše uvedené bylo vyhodnoceno pro sledované výhybky č. 2, č. 3 a č. 4 a také pro spojkovou kolej JKS 3–4. Další veličiny nebyly z výsledků nivelace hodnoceny. Například veličinu zborcení koleje nebylo možno zcela korektně vyhodnotit z důvodu, že při nivelaci nebyla všude konstantní vzdálenost mezi jednotlivými zkoumanými řezy (veličina zborcení se určuje na dané měřické základně). Ze začátku

sledování (první dvě měření) nebyla sledována výhybka č. 2 (zpružněná), přičemž byly porovnávány pouze výhybky č. 3 (zpružněná) a č. 4 (referenční). Do měření byla výhybka č. 2 zařazena až od III. měření.

Odchyly od projektované výškové polohy ukázaly detaily s ohledem na dlouhodobou stabilitu výškové polohy koleje v jednotlivých oblastech výhybek, stejně tak i zjištěné převýšení. Z globálního hlediska je pak stěžejní sedání v projeté zátěži, které ukazuje, jakou měrou jednotlivé části výhybek v době sledování sedaly, z čehož lze dobře porovnat jednotlivé výhybky. Všechny výstupy (grafy) jsou uvedeny v příloze 1. U všech grafů téhož parametru bylo měřítko svislé osy zachováno, je tedy možno všechny výhybky velice dobře vizuálně hodnotit.

Z měřeních **odchylek od projektované výškové polohy** lze velmi dobře vidět historii svislého pohybu výhybky, jak vlivem přirozeného sedání za provozu, tak posun směrem vzhůru při podbíjení. U všech výhybek je patrné typické prosednutí v oblasti pevné srdcovky, které je dáno zvýšeným dynamickým namáháním této oblasti. Při zkoumání této oblasti se projevil zajímavý efekt, který může být dán realizovaným zpružněním srdcovky (viz obr. 95). U srdcovky nezpružněné výhybky je deformace v oblasti srdcovky vymezena z hlediska sledovaných bodů v zásadě třemi body – bodem na hrotu, bodem před hrotem a bodem za hrotem. Tato deformace je tedy v relativně úzkém pásmu a je rovněž významnější. U výhybek zpružněných je tato deformace roztáhnuta ještě o jeden měřený bod za srdcovku (tedy o cca 3 m). Díky tomu není tato deformace až tak výrazná. Tento jev je dán pravděpodobně skutečností, že díky zpružnění se zatížení roznáší podélně po větší délce, takže i tato deformace se roznáší po větší délce. Na tento efekt neměl vliv ani směr pojíždění (výhybky č. 2 a č. 3 jsou pojížděny primárně opačnými směry – po hrotu/proti hrotu). Z globálního hlediska výhybky a provozu lze tuto skutečnost hodnotit pozitivně – jednak je deformace výškově v menších hodnotách, jednak není pro průjezd vozidla tak náhlá.

Ve střední a výměnové části výhybek nebyla objevena zásadní odlišnost mezi zkoumanými výhybkami. Globálně lze říci, že po celou dobu sledování se u zpružněných výhybek pohybovaly hodnoty měřených výšek v užším pásmu než u výhybky referenční konvenčního provedení. To lze nejlépe vidět z grafu odchylek od projektované výšky spojkové koleje JKS 3–4 (příloha 4.7 a 4.8), kde jsou v jednom grafu sledované výhybky č. 3 a č. 4.



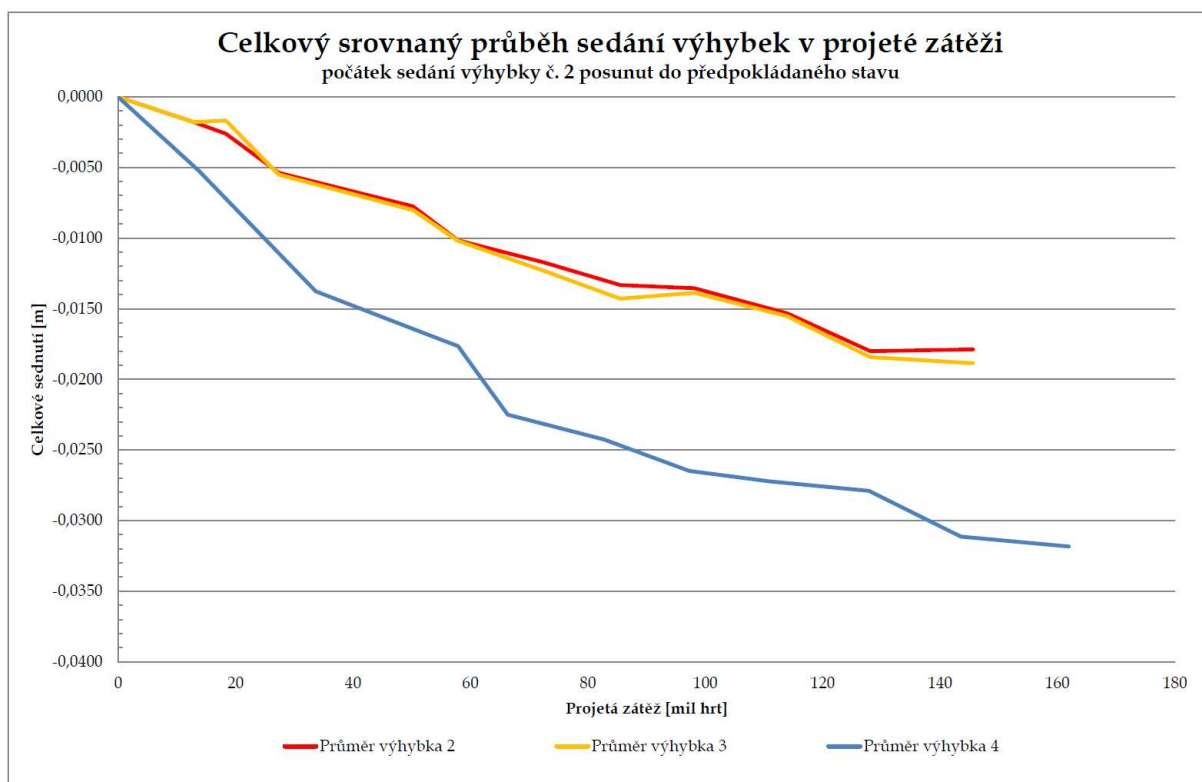
Obr. 95 Porovnání odchylek výškové polohy (kolejnicový pás jdoucí přes srdcovku) v oblasti srdcovek sledovaných výhybek – kompletní grafy viz příloha 4.

Vyhodnocení **převýšení koleje** koresponduje v zásadě s výskytem poruch zjištěných a popsanych již v odchylkách od projektované polohy. Převýšení vzniká zejména v oblasti srdcovek, kde dochází k nerovnoměrné deformaci, kdy kolejnicový pás jdoucí přes srdcovku je zatlačován více než kolejnicový pás u přídržnice. Tato zjištěná převýšení se pohybují řádově do 5 mm. U výhybky č. 2 se vyskytuje abnormalita, kdy je sednutí větší u přídržnice než pod samotnou srdcovkou. Tuto abnormalitu lze vysvětlit tím, že kolejnicový pás u přídržnice výhybek č. 2 a č. 3 je u hrany vysokého náspu a k tomuto jevu přispěl zhoršující se stav železničního spodku. Oblast srdcovky byla u výhybky č. 2 také několikrát za dobu sledování ručně podbíjena a byla upravována její prostorová poloha.

Nejzajímavější informace poskytuje vyhodnocené **sedání v projeté zátěži**. Díky známé projeté zátěži zjišťované měřičem TON 1 mohla být každému měření přiřazena konkrétní hodnota kumulované projeté zátěže. Tímto se podařilo eliminovat vliv různé projeté zátěže v obou kolejích a porovnávání jednotlivých výhybek mohlo být přesnější. Pro vyhodnocení sedání byly výhybky rozděleny na své 3 standardní konstrukční části, které byly vyhodnocovány zvlášť. Pro každou zvolenou oblast byla

z každé měřicí kampaně zjištěna průměrná výška ze všech měřených hodnot. Tyto výšky byly následně vyneseny do grafu (příloha 4.13). V tomto grafu jsou rovněž vidět jednotlivá realizovaná podbíjení, kdy výška byla náhle zvednuta. Tento graf ale neposkytuje dobře informace o míře sednutí, jelikož každá posuzovaná část všech třech výhybek má jiný výchozí bod, a ne všechny výhybky byly stejně často podbíjeny. Proto byl vytvořen upravený graf (příloha 4.14 a 4.15), kdy byl výchozí bod všech výhybek přesunut do počátku (bod 0), a byl odstraněn pohyb vzhůru (podbíjení). Nyní je patrné očištěné sedání jednotlivých výhybek a jejich částí. Tento graf má ale stále jednu nepřesnost a to tu, že u výhybky č. 2 chybí první dvě měření, není tedy úplně správný postup, aby byl výchozí bod, stejně jako u ostatních dvou výhybek, v 0. Jenže není známo, kde by měl být výchozí bod u této výhybky, proto byly první dvě hodnoty sednutí „vypůjčeny“ od výhybky č. 3, která je konstrukčně stejného provedení (obě zpružněné) a obě jsou ve stejné koleji. Nyní tedy vznikl graf s upraveným výchozím bodem výhybky č. 2 (příloha 4.16 a 4.17), z čehož lze vidět, že grafickému průběhu sedání tato úprava pomohla, jelikož posunutím křivky se charakter průběhu výhybky č. 2 přiblížil charakteru průběhu výhybky č. 3.

Výsledný graf sedání po všech úpravách je uveden v příloze 4.17 a rovněž na následujícím obr. 101. Z tohoto obrázku je na první pohled zcela zřejmé, že zpružněné výhybky č. 2 a č. 3 sedaly jinou rychlostí než výhybka č. 4. Celkové sednutí v přibližně 140 mil hrt (tzn. před koncem sledování výhybek č. 2 a č. 3) bylo u zpružněných výhybek v řádu 18 mm, zatímco u výhybky č. 4 standardní konstrukce 32 mm. **Celkové sednutí výhybek zpružněných bylo tedy o 42 % menší než u výhybky konvenční.** Je samozřejmě možné, že na výsledek celkového sedání mohl mít vliv i stav železničního spodku, nicméně z hlediska kvality stavby vykazovaly obě výhybky dostatečnou únosnost železničního spodku jak na zemní pláni, tak na pláni tělesa železničního spodku a měření vycházelo z větší části konzistentně přes výhybku č. 3 i výhybku č. 4 (viz kap. 4.1.3). Přínos zpružnění výměnové části a srdcovky výhybky lze z tohoto pohledu tedy považovat za relevantní. Vzhledem k malému statistickému vzorku by bylo ale potřeba tento přínos ještě potvrdit zřízením dalšího zkušebního úseku, kde by byly výhybky opět po určenou dobu sledovány stejným způsobem.



Obr. 96 Celkový srovnaný průběh sedání v projeté zátěži – průměry pro jednotlivé výhybky.

Skenování pojezdových ploch

Výchozí skenování pojezdových ploch srdcovky bylo provedeno ihned po vložení výhybek předtím, než začal pravidelný provoz. U výhybek v koleji č. 1 tomu bylo dne 14. 8. 2014, u výhybky v koleji č. 2 dne 29. 8. 2014. Toto měření je označeno jako měření 0 a pro hodnocení ojetí je tato plocha srovnávací při vyhodnocení po celou dobu sledování. Další měření probíhalo, neberou-li se v potaz občasné výjimečné měření, pravidelně na jaře v období březen až červen a na podzim v období říjen až listopad. Konkrétní dny měření, vč. příslušné projeté zátěže v obou kolejích, jsou uvedeny v následující tab. 12.

Skenovaná plocha srdcovky byla vždy přibližně od hrdla (nejušší místo žlábků srdcovky) po přibližně tloušťku hrotu 10 cm. Stěžejní bylo, aby skenovaná plocha obsahovala oblast zájmu, což jsou hrot a křídlové kolejnice od šířky hrotu 26 mm do šířky hrotu 40 mm, což je oblast, kde dochází k přechodu kola a kde se standardně sleduje ojetí. Ukázka skenované plochy je na následujícím obr. 97.

Tab. 12 Souhrn měření metodou 3D skenování po dobu sledování vč. projeté zátěže.

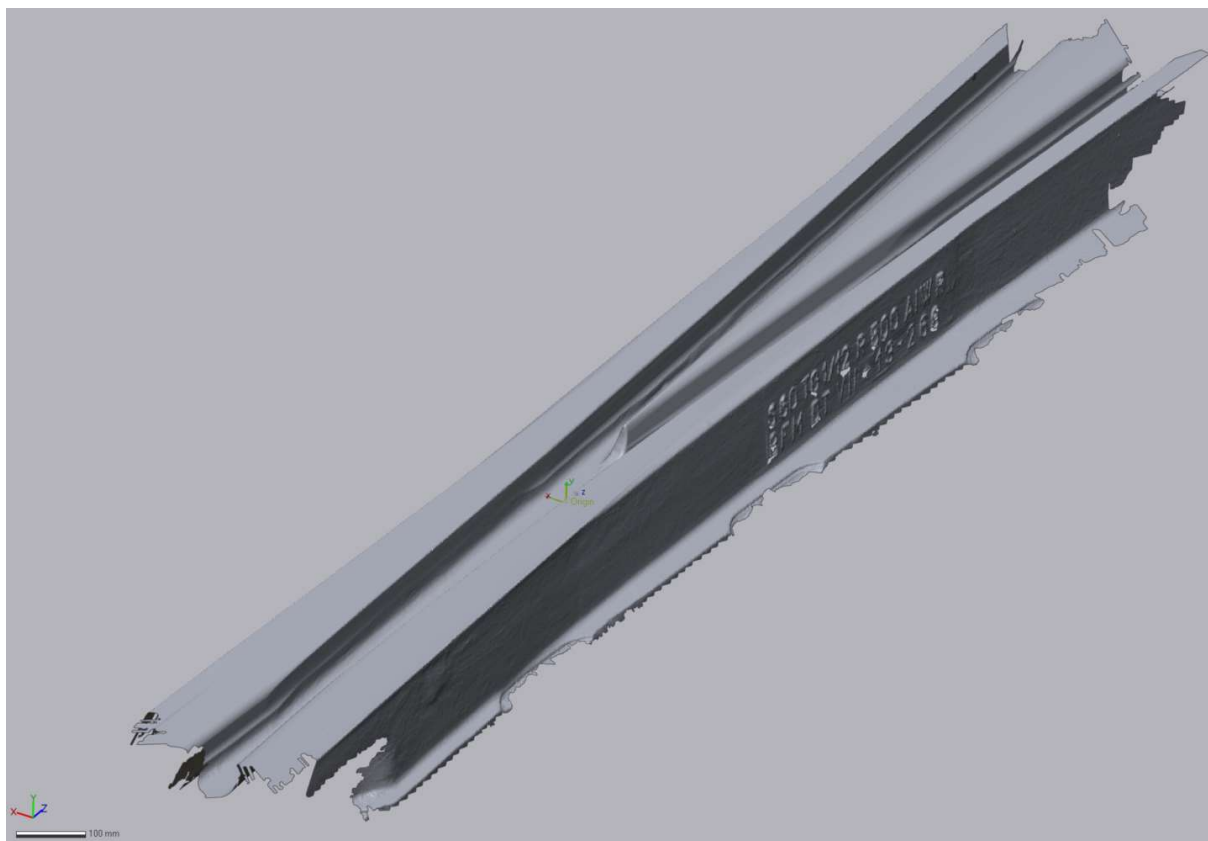
č. měření	výhybka č. 2		výhybka č. 3		výhybka č. 4	
	datum	zátěž [mil hrt]	datum	zátěž [mil hrt]	datum	zátěž [mil hrt]
0	14.8.2014	0	14.8.2014	0	29.8.2014	0
I	16.9.2014	2,456	—	—	—	—
II	23.3.2015	17,455	23.3.2015	17,455	24.3.2015	17,033
III	—	—	24.8.2015	29,063	24.8.2015	30,548
IV	16.11.2015	35,853	16.11.2015	35,853	16.11.2015	38,322
V	25.4.2016	47,877	25.4.2016	47,877	14.6.2016	52,586
VI	5.12.2016	64,473	5.12.2016	64,473	5.12.2016	71,867
VII	27.3.2017	72,941	27.3.2017	72,941	27.3.2017	81,868
VIII	19.5.2017	77,061	19.5.2017	77,061	—	—
IX	9.10.2017	88,609	9.10.2017	88,609	9.10.2017	98,932
X	18.4.2018	103,724	18.4.2018	103,724	18.4.2018	115,342
XI	8.10.2018	118,146	8.10.2018	118,146	8.10.2018	130,796

Každé z měření I až XI bylo pak srovnáváno v sw. Geomagic Control s výchozím 3D skenem označovaným 0. Při každém vyhodnocení pak byly vytvořeny následující výstupy:

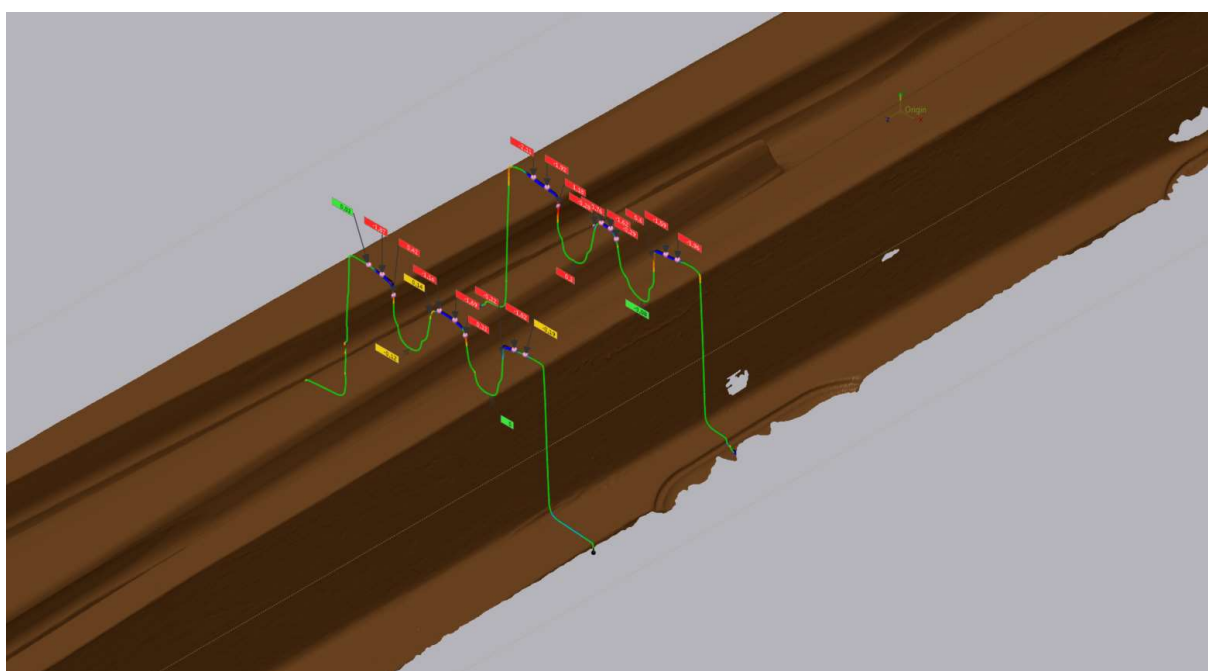
- 3D pohled s patrným ojetím (úbytkem materiálu), případně s patrnými převalky (materiál přibyl);
- 2D řez v tloušťce hrotu 26 mm s vyneseními odchylkami od výchozí skenované plochy;
- 2D řez v tloušťce hrotu 40 mm s vyneseními odchylkami od výchozí skenované plochy rovněž.

Polohu řezů v tloušťce hrotu 26 mm a 40 mm prezentuje obr. 98. Hodnoty na 2D řezech byly odečteny vždy ve stejných místech tak, aby mohlo být provedeno adekvátní hodnocení ojetí. Byly odečteny vždy 3 odchylky na křídlových kolejnicích a 4 odchylky na hrotu. Pro kontrolu byly odečteny také odchylky v obou žlábcích uprostřed. Všechny 3D pohledy a 2D řezy se zobrazenými odchylkami v obou sledovaných tloušťkách hrotu jsou uvedeny v příloze 3¹⁸.

¹⁸ Pozn. k 2D výstupům. U výhybky č. 3 jsou 2D řezy zrcadlově otočeny – pohled je od konce výhybky. U ostatních dvou výhybek je pohled od začátku výhybky.



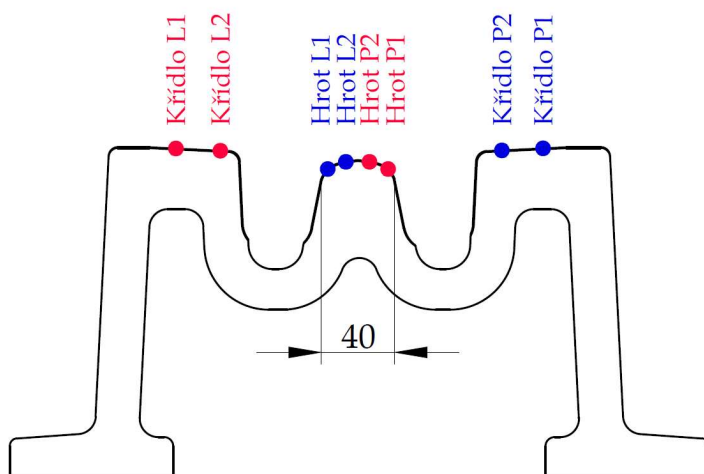
Obr. 97 Oblast 3D skenování srdcovky.



Obr. 98 Zobrazené 2D řezy v rámci celé naskenované plochy srdcovky.

Následující obr. 99 schematicky prezentuje místa odečtení odchylky a způsob pojmenování bodu. Červeně jsou označeny body pro směr poježdění vpravo a modře body pro směr poježdění vlevo (u výh. č. 3 opačně). Podle smyslu odbočení výhybky

(pravá, levá) pak jsou relevantní pro přímý směr buď body červené (výhybka levá) nebo modré (výhybka pravá).



Obr. 99 Označení sledovaných bodů na 2D řezu srdcovky.

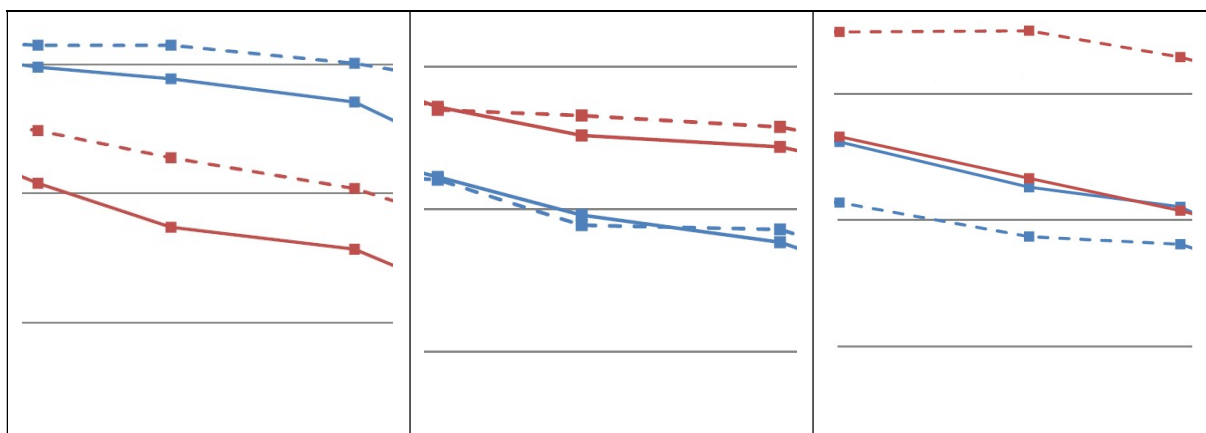
Jednotlivé odchylky byly ve všech řezech odečteny a zpracovány do tabulky. Následně byla provedena korekce zarovnání, přičemž byly použity hodnoty měřené ve dnech žlábků. O tyto hodnoty byly opraveny odchylky měřené na křídlových kolejnicích, a to prostým odečtením příslušné hodnoty, u odchylek na hrotu byla použita pro odečtení hodnota průměru z pravého a levého žlábků. Následně byly hodnoty vyneseny do grafů pro každou výhybku a pro konkrétní řez (26 mm či 40 mm).

Všechny výše uvedené grafy jsou uvedeny v příloze 3. V grafu nebyly použity hodnoty měřených odchylek na přechodu křídlové kolejnice a žlábků (bod na křídlové kolejnici nejbližší k žlábků), a to z důvodu, že na tomto bodě se dle způsobu pojezdu vytvářely převalky, resp. docházelo k minimálnímu a nestejnoměrnému opotřebení. Tento bod byl proto z tohoto hodnocení vyřazen jako málo vypovídající. Sledovány byly tedy vždy dva body na křídlové kolejnici a dva body na hrotu pro příslušný směr. Na první pohled je z grafů patrné, která místa se v projeté zátěži ojížděla rychleji, a ve kterých místech se naopak vytlačoval materiál. Dále je také na první pohled patrné, kdy proběhlo navaření a broušení a lze také nalézt bod, kdy proběhlo pouze broušení. Srdcovky vykazují typický průběh ojetí pro odlévané srdcovky z manganové austenitické oceli. V první fázi, tzv. zajetí, dojde k rychlému nárůstu opotřebení, což stabilizuje materiál (který se jakoby jednotlivými průjezdy „vykove“), čímž dojde ke zpevnění a následnému menšímu nárůstu opotřebení v projeté zátěži v průběhu dalšího životního cyklu výhybky. Ve sledovaných řezech je tento efekt nejvíce patrný na bodech hrotu hlavního dopravního směru v řezu tloušťky 40 mm, kde se už předpokládá plné nesení kola, zatímco v řezu tloušťky 26 mm je tento efekt nejvíce patrný na křídlové kolejnici převládajícího dopravního směru. Dále lze vysledovat

jisté odlišnosti, které vykazovaly obě výhybky zpružněné (č. 2 a č. 3) oproti sledované výhybce referenční č. 4 standardní konstrukce.

U výhybek **zpružněných č. 2 a č. 3** je patrné, že v řezech **tloušťky hrotu 40 mm** největší opotřebení probíhá na křídlové kolejnici v bodě blíže ke žlábků a na hrotu blíže vrcholu. Jak v hlavním, tak vedlejším dopravním směru probíhá opotřebení křídlové kolejnice a hrotu srdcovky v zásadě kontinuálně stejným způsobem. Z grafů tloušťky hrotu 40 mm obou výhybek je vidět, že plná křivka (hrot) a čárkovaná křivka (křídlová kolejnice) jdou v projeté zátěži velice podobným způsobem, přičemž je přírůstek ojetí vždy stále téměř stejný.

Výše uvedený způsob opotřebení se ale neprojevil u **výhybky č. 4 standardní konstrukce**, kde se v řezu **tloušťky hrotu 40 mm** ojížděl hrot rovnoměrněji na obou stranách, v podstatě šly obě křivky shodně. Křídlová kolejnice hlavního dopravního směru (modrá čárkovaná) zaznamenala v první fázi rychlejší nástup ojetí a v poslední fázi před vytěžením se vyrovnala ojetí obou vrcholových bodů hrotu. Křídlová kolejnice pojížděná při jízdě odbočkou naproti tomu měla po celou dobu sledování mnohem menší nárůst opotřebení (až o třetinu). Tento rozdíl je patrný při porovnání výřezů z grafu, viz obr. 105.



Obr. 100 Porovnání charakteru ojíždění srdcovek v projeté zátěži v řezu tl. hrotu 40 mm – kompletní grafy viz příloha 3.

Z hlediska porovnání obou výhybek v řezu **tloušťky 40 mm** lze tedy vyvodit závěr, že ojetí u zpružněných výhybek šlo stejným způsobem na hrotu a příslušné křídlové kolejnici v jednom dopravním směru současně, zatímco u standardní výhybky č. 4 se ojížděl hrot oboustranně nezávisle na převládajícím směru pojíždění a křídlové kolejnice se ojížděly více vlivem převládajícího způsobu pojíždění.

V šířce hrotu 26 mm se u **zpružněných výhybek č. 2 a č. 3** ojížděly nejvíce křídlové kolejnice pojížděné při jízdě přímo, což je logické z hlediska geometrie

přechodu kola, kdy v šířce hrotu 26 mm je kolo ještě plně neseno křídlovou kolejnicí. Nejmenší ojetí pak vykazují body na hrotu. Body na vrcholu hrotu se ojíždějí méně než křídlové kolejnice a bod na hrotu umístěný níže zboku vykazuje minimální ojetí nebo tvorbu převalku. Je zde patrná jakási posloupnost křivek ojetí křídlové kolejnice – ojetí hrotu odsazená o hodnotu ojetí odpovídající míře projeté zátěže. Tato posloupnost je patrná u obou zpružněných výhybek.

U výhybky **standardní č. 4** je zajímavé trochu jiné rozložení v **šířce hrotu 26 mm**. Dalo by se říci, že v poslední fázi vykazují jednu třetinu maximálního ojetí oba body méně pojížděné křídlové kolejnice. Dvě třetiny maximálního ojetí vykazují oba body na vrcholu hrotu (ojetí přímého i odbočného směru jde téměř totožně). Největší ojetí pak vykazují oba body na křídlové kolejnici pojížděné přímým směrem.

V řezu **tloušťky 26 mm** tedy dochází k následujícímu rozdílnému způsobu ojíždění u obou typů sledovaných výhybek, který je obdobný jako u tloušťky hrotu 40 mm. U zpružněných výhybek se při sledování ojetí projevila větší závislost ojetí křídlové kolejnice a hrotu srdcovky na míře a způsobu pojíždění v jednotlivých směrech. Ojetí křídlové kolejnice a příslušného bodu na hrotu se odehrává s obdobným nárůstem v průběhu provozu v daném směru částečně nezávisle na druhém pojížděném směru. U výhybky standardní vzniká větší nerovnoměrnost mezi oběma křídlovými kolejnicemi a hrotem. Hrot se ojíždí z obou stran v podstatě nezávisle na převládajícím směru pojíždění, zatímco křídlové kolejnice vykazují extrémní rozdíl v ojetí na straně pojíždění převládajícím dopravním směrem a na straně pojíždění při jízdě odbočkou.

Následně byly zhotoveny grafy **porovnávací rychlost a míru ojetí** v projeté zátěži v následujících sledovaných bodech na **všech třech srdcovkách**. Byly sledovány pouze body pojížděné hlavním (přímým) směrem:

- křídlová kolejnice, bod blíže k žlábků (P2/L2), hrot tloušťky 26 mm;
- křídlová kolejnice, bod blíže k žlábků (P2/L2), hrot tloušťky 40 mm;
- hrot srdcovky, bod blíže k vrcholu (P2/L2), hrot tloušťky 26 mm;
- hrot srdcovky, bod blíže k vrcholu (P2/L2), hrot tloušťky 26 mm.

Porovnání více pojížděných **křídlových kolejníc v tloušťce hrotu 26 mm** ukazuje, že se zpružněná srdcovka výh. č. 3 ojížděla nejrychleji, zatímco výhybka č. 2 (rovněž zpružněná) nejpomaleji (sledováno do navaření). Standardní výhybka č. 4 vykazovala ojetí přibližně uprostřed mezi oběma zpružněnými výhybkami. Zajímavé je, že výhybka č. 2, která je pojížděná primárně proti hrotu, vykazovala ojetí v tomto místě menší než výhybky pojížděné po hrotu. Tato skutečnost může být dána tím, že při jízdě proti hrotu se toto místo nachází ještě před rázem vzniklým přechodem,

zatímco u výhybek pojížděných po hrotu se jedná o místo až za rázem vzniklým přechodem.

U bodů na **hrotu v tloušťce hrotu 26 mm** vykazovaly rovněž výhybky ojetí dle principu výše, kdy při porovnání výhybek zpružněných měla srdcovka pojížděná proti hrotu menší ojetí než srdcovka pojížděná po hrotu. Zde byl charakter ojetí výhybky č. 2 téměř ve shodných hodnotách jako u výhybky č. 4. Při porovnání srdcovek s primárně stejným smyslem pojíždění vyšlo ojetí nejhůře u výhybky č. 3 (zpružněné).

U **křídlové kolejnice** pojížděné hlavním dopravním směrem v **tloušťce hrotu 40 mm**, tedy v místě, kde již obvykle přecházející kolo nese hrot, bylo ojetí křídlové kolejnice o velice podobném průběhu jak u výhybky č. 3 zpružněné, tak u výhybky č. 4 referenční. Výhybka č. 2 zpružněná, pojížděná ale v opačném smyslu, vykazovala ojetí křídlové kolejnice v menších hodnotách, přičemž v okamžiku před navařením téměř dorovnála míru ojetí u obou srdcovek výhybky č. 3 a č. 4.

V bodě na **hrotu srdcovky v tloušťce 40 mm** pak ojetí u srdcovek obou zpružněných výhybek bylo řádově o 1 mm větší v době před navařením než u výhybky č. 4 zpružněné. Ojetí hrotu v tomto řezu u zpružněných výhybek bylo velice podobné, u výhybky č. 2 nabývalo trochu větších hodnot, což opět může být dáno různým smyslem pojíždění obou zpružněných výhybek.

Celkově ze zjištěných dat **vyplývá**, že zpružnění nemělo přínos na opotřebení srdcovky, naopak v globálním pohledu došlo k většímu ojetí u zpružněných výhybek, což ve výsledku také vedlo k dřívějšímu údržbovému zásahu navaření a broušení. Kdyby nedošlo k tomuto údržbovému zásahu (nebo by byl odložen), patrně by se způsob ojíždění nezměnil. Globálně lze vysledovat trochu jiný princip úbytku materiálu na zpružněných výhybkách a na výhybce standardní. Na toto chování může mít i vliv větší roznos zatížení při zpružnění, jak je vidět z vlivu např. u výsledků z nivelace. Tato problematika byla ale zkoumána na velice malém vzorku výhybek, bude potřeba tento způsob chování dále ověřit alespoň na jednom dalším zkušebním úseku.

4.3.1.2 Měření projeté zátěže

Způsobem popsaným v kapitole 4.2.1.4 byla v průběhu celého pětiletého provozního ověřování v žst. Ústí nad Orlicí měřena projetá zátěž, k níž mohla být veškerá další měření vztahována, jednalo se tedy o velmi významnou informaci pro další vyhodnocení.

Po celém prvním roce sběru dat (což bylo za platnost GVD 2014/2015 od 14. 12. 2014 do 12. 12. 2015) proběhla validace měřiče TON 1, aby byla jistota, že měření není odchýlné od skutečnosti. Proběhlo jednoduché porovnání s daty zjištěnými ze systému Správy železnic, kde jsou udávána data z vlakopisu. Za toto období byly tedy měřičem TON1 naměřeny následující hodnoty:

- Kolej č. 1 – 28 140 879,8 hrt
- Kolej č. 2 – 32 251 839,0 hrt

Z podkladů získaných od Správy železnic byly pak za stejné období zjištěny následující informace:

- Kolej č. 1 $T_s = 28,61$ mil. hrt, $T_f = 41,84$ mil. hrt
- Kolej č. 2 $T_s = 30,99$ mil. hrt, $T_f = 45,33$ mil. hrt

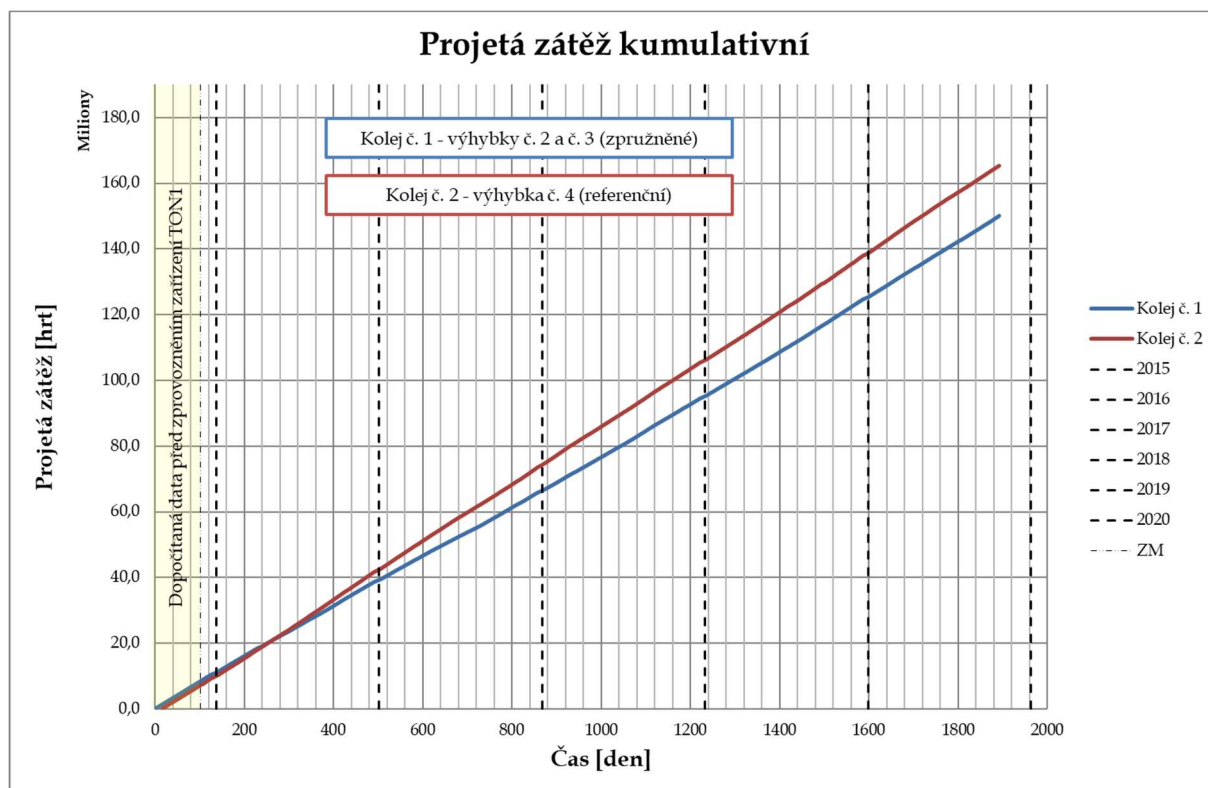
Z výše uvedeného vyplývá, že data ze zařízení TON 1 přibližně odpovídají udávaným hodnotám projeté zátěže T_s (provozní zatížení skutečné; T_f je potom provozní zatížení přepočtené [92]) poskytnutými Správou železnic. Lze tedy konstatovat, že pro potřeby hodnocení výhybek je přesnost dostatečná, jelikož rozdíly měřené v obou kolejích jsou do ± 5 %. Kolej č. 1 je v toleranci $-1,7$ %, kolej č. 2 je v toleranci $+4,1$ %. Projecté zátěže za jednotlivá období sledování jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 13 Souhrn projeté zátěže v kolejích č. 1 a č. 2 po dobu sledování.

Období	Kolej č. 1 [mil hrt]	Kolej č. 2 [mil hrt]
Od zahájení do 13. 12. 2014	9,761	8,521
GVD 2014/2015 od 14. 12. 2015	28,141	32,252
GVD 2015/2016 od 13. 12. 2015	26,997	31,599
GVD 2016/2017 od 11. 12. 2016	28,644	31,962
GVD 2017/2018 od 10. 12. 2017	29,926	32,178
GVD 2018/2019 od 8. 12. 18 do 25. 10. 19	26,928	28,995

Z výše uvedeného lze vyčíst, že globálně je v koleji č. 2 (s referenční výhybkou č. 4) vyšší projetá zátěž než v koleji č. 1 (zpružněné výhybky). Rovněž jde vidět, že sumy za jednotlivá období jsou přibližně stejná. Nárůst projeté zátěže je tedy přibližně lineární, při podrobnějším zkoumání jednotlivých dnů v roce lze vysledovat např. nižší projetou zátěž na konci kalendářního roku spojenou s obdobím Vánoc. V příloze 2 jsou pak uvedeny grafy denní projeté zátěže za jednotlivé roky. Shrnutí

projeté zátěže kumulativně je pak uvedeno v grafu na následujícím obr. 101. Vzhledem k tomu, že provoz zařízení TON 1 byl spuštěn až 27. 11. 2014 (tedy po cca 3 měsících od zprovoznění výhybek), byla data z tohoto období dopočítána z dat z vlakopisu.



Obr. 101 Projeté zátěž vyjádřená kumulativně za celé sledované období vč. odhadu před uvedením.

Data z měření projeté zátěže byla pouze podpůrným prostředkem pro lepší srovnání sledovaných veličin na výhybkách vložených v různých kolejích. Pro všechna měření byla tedy určena projeté zátěž na výhybkách pro konkrétní den měření dle informace poskytované měřičem TON 1.

4.3.2 Výsledky měření spolupracujících institucí

4.3.2.1 Měření dynamických účinků na výhybky

Podle metodiky měření popsané v kap. 4.2.2.1, resp. podle metodik [107, 108] proběhla na testovaných výhybkách následující měření tab. 14. Všechna měření tímto způsobem byla provedena pouze na výhybkách č. 3 (zpružněná) a č. 4 (referenční), výhybka č. 2 (zpružněná) nebyla do tohoto sledování zahrnuta z důvodu, že nebyla vybavena snímači v pražcovém podloží (viz kap. 4.1). Veškerá měření byla realizována spolupracující institucí VUT, v rámci této práce jsou použity výsledky pro globálního hodnocení chování výhybek zpružněných a výhybky referenční.

Dle plánu bylo měření realizováno obvykle jednou ročně, přičemž v roce 2017 bylo měření vynecháno. Poslední měření se pak uskutečnilo v roce 2019 po výměně srdcovek.

Měření na železničním svršku

Tab. 14 Seznam měřicích kampaní měření dynamických účinků na výhybce – železniční svršek.

č. a datum měření	Projetá zátěž [mil hrt]		poznámka
	kolej č. 1 výhybka č. 3	kolej č. 2 výhybka č. 4	
I - 22. 5. 2015	21,948	—	
I - 27. 5. 2015	—	22,523	
II - 6. 11. 2015	35,072	—	
II - 13. 11. 2015	—	38,053	
III - 26. 7. 2016	54,334	—	
III - 27. 7. 2016	—	60,568	
IV - 28. 8. 2018	114,596	—	
IV - 30. 8. 2018	—	127,338	
V - 19. 8. 2019	144,547	—	Po výměně srdc.
V - 22. 8. 2019	—	159,823	Po výměně srdc.

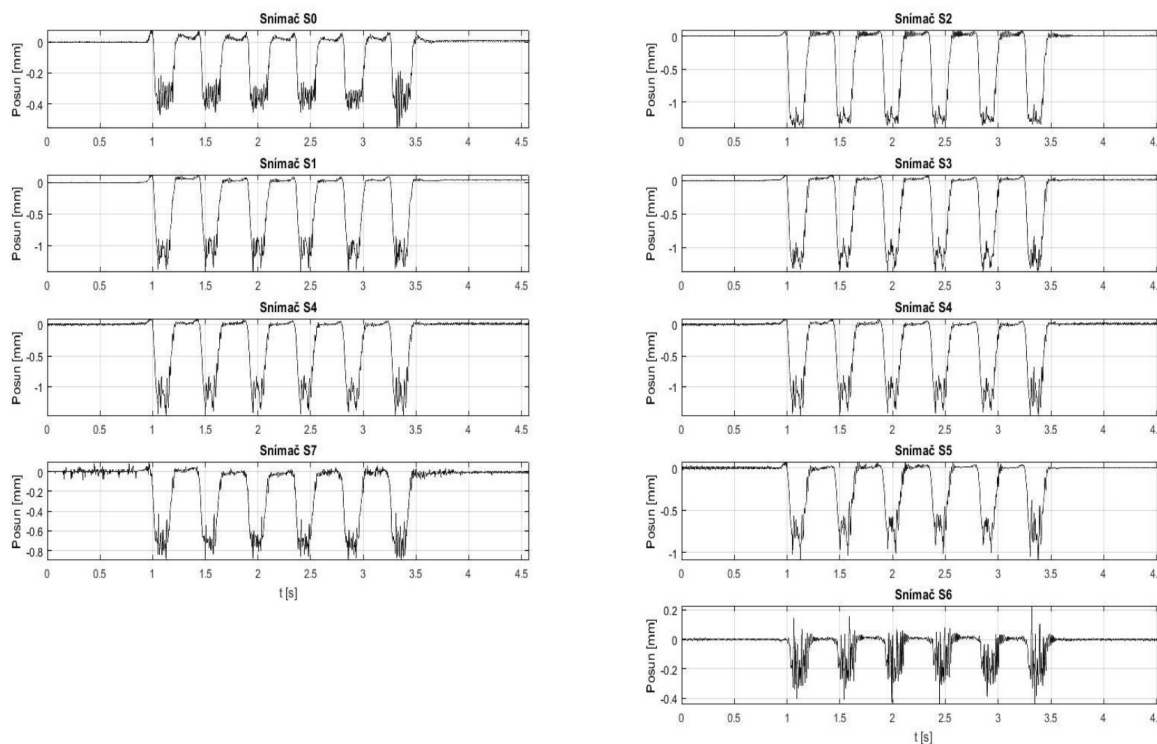
Z hlediska vyhodnocení měření na železničním svršku dle metodiky [108] budou v rámci této práce podrobněji sledovány z celkového velmi detailního a globálního vyhodnocení dynamických parametrů pouze stěžejní následující charakteristiky:

- pohybové chování pražců v oblasti srdcovky v podélném směru;
- pohybové chování pražců v oblasti srdcovky v příčném směru.

Pohybové chování pražců srdcovky je vyjádřeno maximálními zatlačenými pražců v podélném a příčném řezu. Jedná se o vyhodnocení měření snímači posunutí S0 až S7 s rozložením dle obr. 81. Výsledky byly shrnuty z celé doby provozního ověřování od roku 2014 do roku 2019. Z každé měřicí kampaně byla zpracována podrobná dílčí zpráva, tj. z roku 2015 [120], 2016 [121], 2018 [122] a 2019 [123]. V rámci této práce je provedeno shrnutí všech měření z dílčích výsledků vyhodnocení.

Při každé měřicí kampani bylo změřeno cca 20 až 30 průjezdů vlaků různých druhů. Jednalo se o osobní vlaky, rychlíky (EC, IC), ucelené jednotky řady 680 Pendolino (dopravce ČD) nebo Stadler Flirt (dopravce LeoExpress), ale také nákladní vlaky. Při průjezdu byl zaznamenán směr průjezdu a rychlost průjezdu ručním měřičem rychlosti. Primárním výstupem měření snímači posunutí jsou časové záznamy zatlačení (průhybu) při průjezdu vlaku. Na následujícím obr. 102 je uveden příklad záznamu, přičemž vlevo jsou seřazeny snímače v podélném směru a vpravo snímače v příčném směru. Z grafů jde identifikovat jednotlivé nápravy soupravy, u klasického řazení soupravy (lokomotiva a vozy) je obvykle zcela jednoznačně

identifikovatelná lokomotiva jakožto nejtěžší vozidlo soupravy s největšími hodnotami zatlačení a následně vozy. U ucelených souprav (jednotky Pendolino, Stadler Flirt) vykazují pak jednotlivé nápravy přibližně stejný průběh. Je také patrné, že u snímače S6, který je na hlavě pražce odbočné větve, dochází k odlišnému průběhu, resp. dochází u něho také ke zdvihům. To je dáno skutečností, že část pražce na straně odbočné větve není zatížena.



Obr. 102 Typický průběh záznamu ze snímače posunutí při průjezdu vlaku, zde konkrétně na srdcovce výhybky č. 3 dne 19. 8. 2019, jednotka Stadler Flirt (LeoExpress). [123]

Z těchto průběhů sestavených pro každý vlak byla vybrána maximální hodnota zatlačení. Ze všech změřených vlaků byla pak sestavena tabulka s hodnotami maximálních zatlačení, minimálních zatlačení a mediánu z každé měřicí kampaně. Tyto hodnoty jsou uvedeny v souhrnné tab. 15 obsahující všechny měřicí kampaně.

Z těchto hodnot byly připraveny přehledové grafy, které jsou uvedeny níže. Jedná se o graf průběhů zatlačení v oblasti srdcovky v podélném směru (viz obr. 103) a v příčném směru (viz obr. 105), kde byly pro přehlednost zobrazeny pouze mediány ze všech měření a zobrazeny obě výhybek pro jednodušší interpretaci stavu. Grafy jsou rovněž ve větším vyhotovení k nalezení v příloze 1.

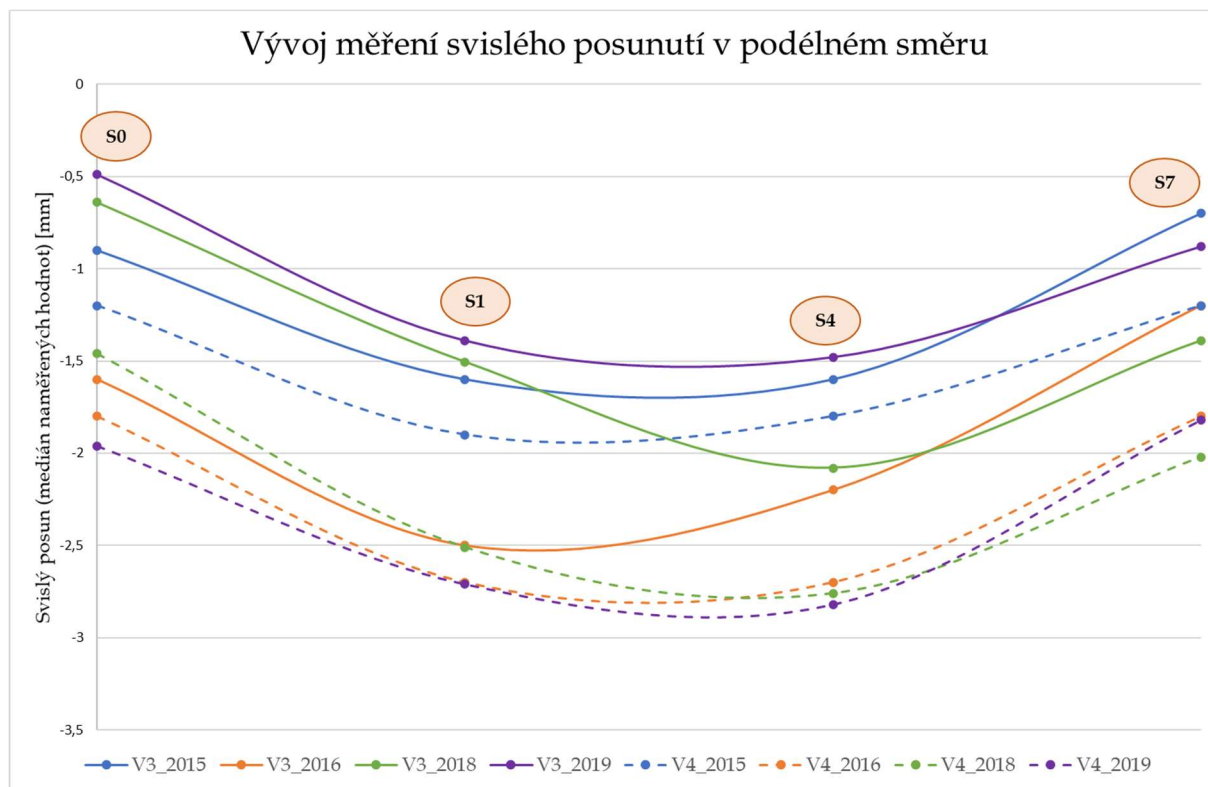
Tab. 15 Spočítaná maxima, minima a mediány z měření zatlačení [mm] snímači posunutí při všech měřicích kampaních na výhybkách č. 3 a č. 4. [120–123]

	Výh.	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Max	3 (2015)	-0,8	-1,5	-2,2	-1,5	-1,3	-0,8	-0,3	-0,5
	3 (2016)	-1,4	-1,7	-1,5	-1,5	-1,5	-1,4	-0,5	-0,9
	3 (2018)	-0,39	-1,24	-1,27	-1,57	-1,77	-1,41	-0,36	-0,54
	3 (2019)	-0,35	-1,26	-0,97	-1,31	-1,4	-0,96	-0,31	-0,82
	4 (2015)	-0,9	-1,4	-2,3	-1,4	-1,4	-1,2	-0,8	-1
	4 (2016)	-1,4	-1,7	-1,4	-1,7	-1,6	-1,8	-1	-1,3
	4 (2018)	-0,96	-1,67	-1,05	-1,52	-1,8	-1,79	-1,61	-1,21
	4 (2019)	-1,72	-2,48	-1,9	-2,41	-2,37	-1,8	-1,35	-1,56
Medián	3 (2015)	-0,9	-1,6	-2,4	-1,6	-1,6	-1	-0,5	-0,7
	3 (2016)	-1,6	-2,5	-2,5	-2,2	-2,2	-1,8	-0,8	-1,2
	3 (2018)	-0,64	-1,505	-1,545	-1,89	-2,08	-1,665	-0,51	-1,39
	3 (2019)	-0,49	-1,39	-1,49	-1,38	-1,48	-1,05	-0,37	-0,88
	4 (2015)	-1,2	-1,9	-2,5	-1,8	-1,8	-1,5	-1	-1,2
	4 (2016)	-1,8	-2,7	-2,8	-2,7	-2,7	-2,2	-1,2	-1,8
	4 (2018)	-1,46	-2,51	-2,74	-2,62	-2,76	-2,15	-1,87	-2,02
	4 (2019)	-1,96	-2,71	-2,79	-2,54	-2,82	-2,22	-1,67	-1,82
Min	3 (2015)	-1,1	-1,8	-2,7	-1,8	-1,8	-1,2	-0,5	-1
	3 (2016)	-1,8	-2,8	-2,9	-2,5	-2,5	-2	-1	-1,4
	3 (2018)	-0,79	-1,81	-1,65	-2,05	-2,33	-1,92	-0,66	-1,64
	3 (2019)	-0,69	-1,66	-1,72	-1,47	-1,67	-1,15	-0,54	-0,96
	4 (2015)	-1,4	-2,1	-2,7	-2	-1,9	-1,7	-1,2	-1,3
	4 (2016)	-2,1	-3	-3,3	-3	-3,1	-2,6	-1,5	-2,2
	4 (2018)	-1,86	-2,88	-3,1	-3,1	-3,32	-2,54	-2,17	-2,61
	4 (2019)	-2,38	-3,08	-3,14	-2,78	-3,12	-2,39	-2,05	-1,96

Provede-li se hodnocení a porovnání změřených posunů na všech snímačích pro obě výhybky, lze z hodnot uvedených v [121–123] zjistit, že jsou hodnoty zatlačení naměřené na výhybce č. 4 obecně vyšší, a to o více než 1 mm. Je také možno vyvodit, že rozdíly mezi nejvyššími a nejnižšími hodnotami na jednotlivých snímačích jsou u výhybky č. 4 (referenční) vyšší než u výhybky č. 3 (zpružněná). Na výhybce č. 3 jsou tyto rozdíly v intervalu 0,2 až 0,8 mm, u výhybky č. 4 jsou rozdíly 0,4 až 1,2 mm. Z této skutečnosti lze usoudit, že u výhybky č. 4 je patrně horší kontakt se šterkem kolejového lože než u výhybky č. 3.

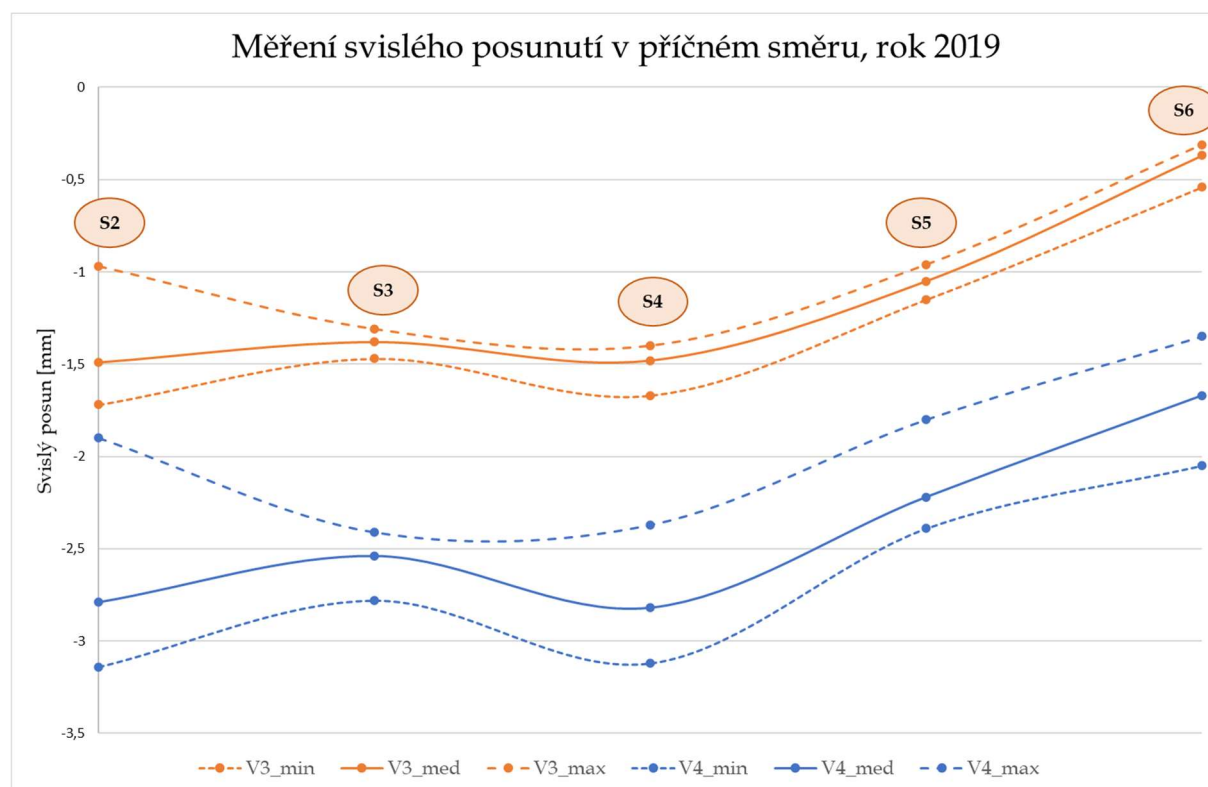
Z hlediska výsledků v **podélném směru** lze obecně říci, že průběh maximálních zatlačení je předpokladatelný a jde vidět, že částečně kopíruje průběh v podélném směru výsledky z nivelace bez zatížení. Největší zatlačení jsou identifikována v oblasti přechodu kola z jazyka na křídlovou kolejnici (snímač S4), případně na pražci v oblasti hrdla srdcovky (snímač S1). Je rovněž vidět, že místo maximálního zatlačení se časem mění, což může být dáno aktuálním stavem podbití jednotlivých pražců. Dále je také

patrné, že výhybka č. 4 (referenční) vykazuje vyšší hodnoty zatlačení při stejné skladbě vlaků. U výhybky č. 3 (zpružněná) bylo identifikováno přibližně o 1 mm až 1,8 mm menší zatlačení ve všech řezech po celou dobu měření. Ve výhybce č. 4 jsou také při podrobnější zkoumání zjištělné větší rozdíly mezi nejmenšími a největšími zatlačeními na jednotlivých snímačích.



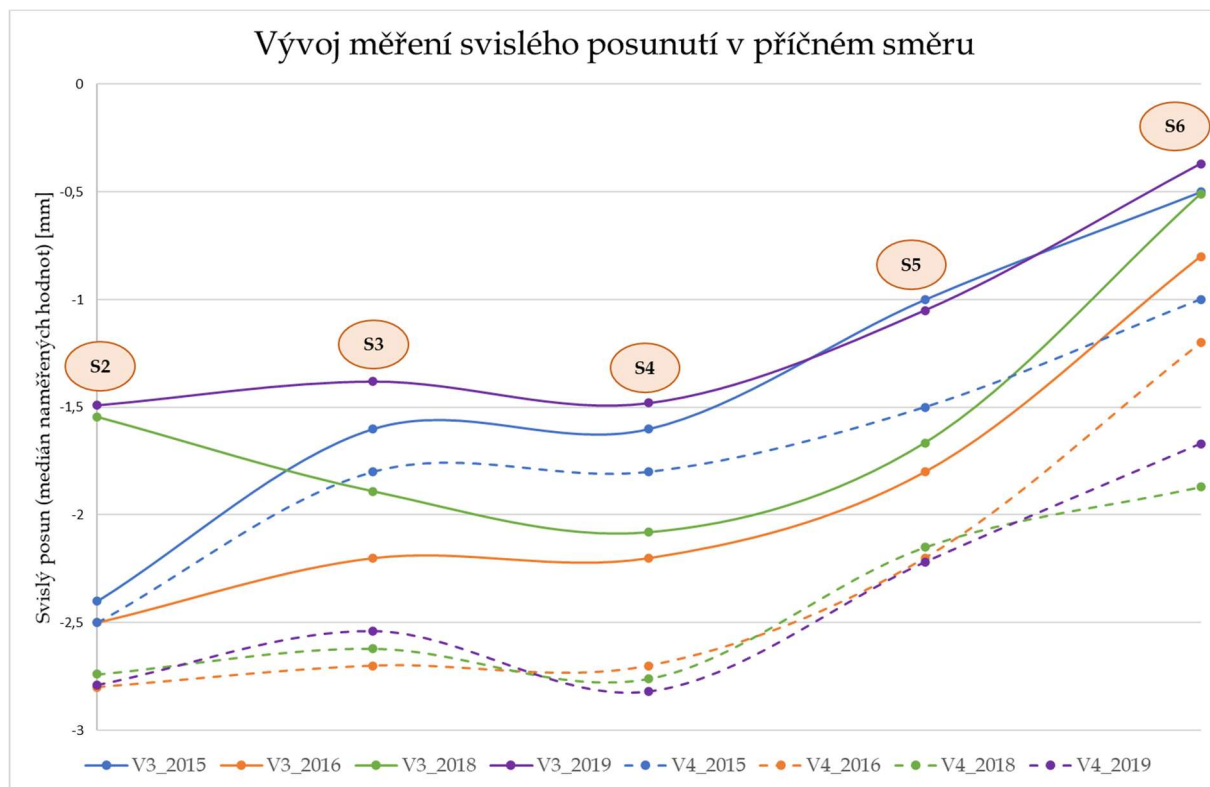
Obr. 103 Vývoj měření zatlačení v oblasti srdcovky v podélném směru (výhybka č. 3 plnou čarou, výhybka č. 4 čárkovanou čarou). [120–123]

Na následujícím grafu (obr. 105) je potom znázorněna situace i v **příčném směru**. Odbočná větev je na grafu znázorněna vpravo a přímá větev vlevo. Snímače zleva jsou tedy na hlavě pražce přímé větve (S2), snímač v ose koleje přímé větve (S3), snímač pod srdcovkou v místě přechodu kola (S4), snímač v ose koleje odbočné větve (S5) a snímač na hlavě pražce odbočné větve (S6). Budou-li se zkoumat minimální a maximální hodnoty a medián v rámci jedné měřicí kampaně (viz obr. 104), dospěje se k zajímavým poznatkům. Zatímco průhybová křivka vzniklá z minimálních hodnot zatlačení ukazuje očekávaný tvar, kdy maximální zatlačení bude v ose koleje přímé větve výhybky, medián a maximální zatlačení mají tvar poněkud neočekávaný, kdy maximální zatlačení je na hlavě pražce přímé větve. Obě výhybky přitom mají podobný charakter chování, rozdílem však je, že u výhybky č. 4 (referenční) jsou průhyby větší. Je obtížné zcela přesně identifikovat příčinu tohoto jevu, je možné, že kraje relativně vysokého náspu, na němž jsou výhybky umístěny, sedají rychleji a dochází tedy k poruše pražcového podloží na vnějších okrajích výhybek.



Obr. 104 Ukázka průběhu minimálních a maximálních hodnot zatlačení a mediánu na obou výhybkách v příčném směru v roce 2019. [123]

Pokud se zhodnotí vývoj měřených průhybů v čase za všechny měřicí kampaně, jak ukazuje graf mediánů zatlačení pro obě výhybky na obr. 105, je vidět, že u výhybky č. 3 (zpružněná) bylo největších hodnot mediánů dosaženo v roce 2016, zatímco nejmenších hodnot mediánů posunů bylo dosaženo v roce 2019 při posledním měření. Je potřeba si také povšimnout, že v roce 2018 má medián naměřených hodnot na výhybce č. 3 očekávaný tvar křivky (jako jediná), což je ale obtížně zdůvodnitelné, jelikož poslední podbití od tohoto měření bylo necelý rok před měřením, a navaření srdcovky, které se událo několik měsíců před měřením by patrně nemělo mít až tak významný vliv na charakter průhybové křivky. Je potřeba také zmínit, že poslední měření bylo provedeno po výměně srdcovek a průhybová křivka má opět ne příliš očekávaný tvar. Je také zajímavé, že výhybka č. 4 měla v průběhu sledování stabilnější průběh, mimo prvního měření vycházel průběh mediánu zatlačení velmi podobně. Při srovnání obou výhybek je na první pohled vidět, že zatlačení výhybky č. 4 po celou dobu nabývaly větších hodnot než u výhybky č. 3 zpružněné. Největší rozdíl je identifikovatelný na snímáči pod hrotem srdcovky v roce 2019, kdy rozdíl činí až 1,3 mm.



Obr. 105 Vývoj měření zatlačení v oblasti srdcovky v příčném směru (výhybka č. 3 plnou čarou, výhybka č. 4 čárkovanou čarou). [120–123]

Z hlediska měření pohybového chování srdcovky prostřednictvím svislých zatlačení na charakteristických místech pražců lze říci, že výhybka č. 3 (zpružněná) vycházela významně lépe než výhybka č. 4 (referenční), a to po celou dobu sledování. Dále byly podle metodiky sledovány na železničním svršku ještě zrychlení pomocí instalovaných akcelermetrů. Z analýzy vibrací vyplynulo následující rozdílné chování výhybky č. 3 a č. 4. U výhybky zpružněné č. 3 bylo dosaženo nejvyšších hodnot vibrací na křídlové kolejnici (tj. snímač A4Z). U výhybky referenční č. 4 bylo naopak dosaženo nejvyšších vibrací na snímačích na pražci u srdcovky (A3Z) a ve šterku kolejového lože přímo pod srdcovkou (A0Z).

Pražcové podloží

Měření v kolejovém loži a v železničním spodku proběhlo v níže uvedených termínech dle metodiky [107] a podle stejné metodiky následně proběhlo vyhodnocení. Měření na železničním spodku obnášelo měření snímači instalovanými v pražcovém podloží. Jednalo se o tříosé akcelermetry instalované do kamene, tzv. měřicí kameny, a tlakové snímače. Podrobně viz kap. 4.1 Popis zkušebního úseku. Snímače byly již při stavbě instalovány do výhybky č. 3 a č. 4 ve stejných řezech:

- výměnová část, oblast závěru;
- výměnová část, oblast kluzných stoliček;

- srdcovková část, pod hrotem;
- běžná kolej za výhybkou.

Tab. 16 Seznam měřicích kampaní měření dynamických účinků na výhybce – pražcové podloží.

č. a datum měření	Projetá zátěž [mil hrt]		poznámka
	kolej č. 1 výhybka č. 3	kolej č. 2 výhybka č. 4	
I – 9. 7. 2015	25,545	–	
I – 17. 7. 2015	–	27,079	
II – 5. 11. 2015	34,990	37,326	
III – 29. 6. 2016	52,498	58,251	
IV – 21. 8. 2018	113,996	126,501	
V – 17. 7. 2019	141,855	156,745	Po výměně srdc.

Výsledky jsou velice obsáhlé a byly podrobně publikovány ve zprávách [124–126]. Pro účely této práce jsou nejdůležitější finální výstupy z tohoto měření, proto bude pojednání v této věci soustředěno zejména na závěry vzhledem k porovnání zpružněné a referenční výhybky.

Byly zpracovány seznamy všech měřených vlakových souprav při každé měřicí kampani vč. zaznamenané rychlosti průjezdu. Z každého vlaku jsou v příloze publikovaných zpráv uvedeny přehledové grafy odezev snímačů na průjezdů vlaku, a to jak akcelerometrů, tak tlakových snímačů pro výhybku č. 3 a pro výhybku č. 4. U výstupů z měřicích kamenů byly spočítány amplitudová frekvenční spektra a absolutní hodnota z jednotlivých os akcelerometrů.

Z tlakových snímačů byly vypočtena maxima a minima pro jednotlivé průjezdy vlakových souprav. U měřených hodnot byla odstraněna případná stacionární hodnota, u snímačů zrychlení byla odstraněna hodnota tíhového zrychlení, u tlakových snímačů byla odstraněna hodnota ze statické hmotnosti vrstvy.

Byla také spočítána hodnota RMS, tzv. hodnota efektivního zrychlení. Z hlediska fyzikální podstaty se jedná o energii signálu, dá se tedy říci, že jde o vyjádření míry škodlivosti měřeného signálu. Hodnota RMS byla spočítána pouze pro snímače zrychlení.

Pro vzájemné hodnocení obou výhybek byly použity vždy stejné nebo obdobné typy souprav, které projely přes obě výhybky obdobnou rychlostí. Obvykle se jednalo o následující soupravy:

- rychlík kategorie EC nebo IC s lokomotivou řady 380 dopravce ČD;
- souprava Stadler Flirt dopravce LeoExpress;
- jednotka Alstom Pendolino dopravce ČD;
- jednotka Siemens Viaggio Comfort dopravce ČD nebo ÖBB;

- rychlík kategorie IC s lokomotivou řady 163 dopravce RegioJet.

Z hlediska hodnocení v časové oblasti všech sledovaných parametrů pražcového podloží lze za celé období sledování zdůraznit následující poznatky:

- **V řezu 1** (výměna, oblast závěrů) v roce 2016 vyšla z porovnání hodnoty RMS u některých typů souprav lépe výhybka č. 3 a u některých souprav lépe výhybka č. 4. Některé soupravy byly zcela srovnatelné. Totožná situace byla i u minimálních a maximálních hodnot. Stejně výsledky přineslo měření i v roce 2018 a v roce 2019 po výměně jazyka a opornice byl nepatrný rozdíl v obou výhybkách, kdy u výhybky č. 4 bylo dosaženo o trochu menších hodnot RMS, nicméně u maxim a minim byly výhodnější hodnoty identifikovány naopak u výhybky č. 3. Z hlediska srovnání maximálních hodnot dynamických tlaků bylo dosaženo příznivějších hodnot pro výhybku č. 4, nicméně rozdíl je velmi malý.
- **V řezu 2** (výměna blíže ke kořeni jazyka) v roce 2016 a 2018 byla velmi podobná situaci v řezu 1. U většiny vlaků vycházely hodnoty RMS, maxim a minim velmi podobně, u některých vlaků nepatrně příznivěji pro výhybku č. 4. Měření v roce 2019 přineslo lepší výsledky pro výhybku č. 4, rozdíl byl ale opět poměrně malý až zanedbatelný. Pouze z měření akcelerometrů v příčném směru vycházely lepší hodnoty ve prospěch výhybky č. 3. U měřených tlaků byla i v roce 2019 situace podobná řezu 1.
- **V řezu 3** (oblast srdcovky) v roce 2016 vyšla u většiny zjištěných hodnot RMS, maxim a minim lépe výhybka č. 4, pouze u několika vlaků vyšla lépe výhybka č. 3. Tato situace byla stejná jak u měření zrychlení měřícími kameny, tak z hodnot z tlakových snímačů. Stejná situace byla i v roce 2018 a i v roce 2019 po výměně srdcovek. Rozdíly však vycházely většinou ve velmi malých hodnotách.
- **V řezu 4** (běžná kolej za výhybkou) byly výsledky většinou opačné. V roce 2016 vyšla lépe u většiny vlaků výhybka č. 3 a trochu hůře výhybka č. 4. Rozdíly však byly opět poměrně malé. Významnou změnu nepřineslo ani měření v roce 2018. V roce 2019 byly výsledky téměř srovnatelné u obou výhybek, o něco menší naopak byly některé hodnoty u výhybky č. 4. Dynamické tlaky na pláni tělesa železničního spodku a zemní pláni v roce 2019 vyšly o něco příznivěji pro výhybku č. 4.

Celkově lze říci, že hodnocení v časové oblasti nepřineslo významné rozdíly mezi oběma výhybkami, dalo by se říci, že výsledky byly srovnatelné. Významný vliv na tyto hodnoty neměly ani údržbové zásahy jako výměna jazyka a opornice u výhybky č. 4 a výměna srdcovky u obou výhybek. V čase se výhybky z tohoto hlediska chovaly stejnoměrně, žádné významné změny se v průběhu sledování neprojevíly. [124–126]

Ve **frekvenční oblasti** bylo hodnocení zaměřeno na výstupy z akcelerometrů se zaměřením na svislý (tedy dominantní) směr. Bylo sledováno, jakou odezvu mají vybrané vlakové soupravy v jednotlivých řezech.

- Při všech měřicích kampaních byly vidět rozdíly ve sledovaných amplitudových spektrech, což bylo dáno zejména odlišností konstrukce srdcovky a kluzných stoliček.
- V roce 2016 a 2018 bylo zjištěno, že spektra s významnými frekvenčními složkami do přibližně 200 Hz byla identifikována u obou výhybek. U řezu č. 1 a č. 2 jsou spektra v zásadě srovnatelná pro obě výhybky. Situace je ale jiná u výhybky č. 3 se zpružněním srdcovky, kde jsou hodnoty amplitudového spektra vyšší než u výhybky č. 4.
- V roce 2019 byly rovněž u frekvenčních amplitudových spekter zjištěny v některých řezech rozdíly. Hodnoty amplitudového spektra u výhybky č. 3 v řezu 1 byly vyšší a frekvenční pásmo užší (rozdíl ale relativně malý). Stejná situace byla v řezu 2. Výhybka č. 3 má v řezu 3 méně významných špiček v signálu, ale ostrých. Opačná situace je v řezu 4 (běžná kolej), kde jsou vyšší hodnoty špiček u výhybky č. 3.

Měření dynamických parametrů v pražcovém podloží proběhlo v roce 2015, 2016, 2018 a 2019. Hodnocení bylo provedeno v časové a frekvenční oblasti. V časové oblasti se neprojevil významný rozdíl mezi výhybkami, dokonce ani údržbové zásahy nepřinesly zásadní změny v hodnocení. Častěji vycházely lepší hodnoty u výhybky č. 4 (referenční), tyto rozdíly byly ale poměrně malé až zanedbatelné. Lze tedy konstatovat, že z hlediska hodnocení v časové oblasti jsou obě výhybky vzájemně srovnatelné. Při zkoumání frekvenční oblasti byly zjištěny jisté rozdíly, které jsou patrně dány odlišností v konstrukčním řešení systémů upevnění. Nelze ale jednoznačně určit, zda zjištěné rozdíly ve sledovaných amplitudových spektrech mají pozitivní nebo negativní vliv na konstrukci výhybky jako takovou a na případné údržbové zásahy.

Vzhledem k velmi malým zjištěným rozdílům mezi oběma výhybkami v průběhu sledování pražcového podloží nelze jednoznačně prokázat přínos zpružnění ve výhybkách. Lze konstatovat, že ani údržbové zásahy jako výměna jazyka a opornice u výhybky č. 4 a navaření a následná výměna srdcovek obou výhybek neměly zásadní vliv na sledované parametry. Naopak lze říci, že jistý vliv mohla mít samotná instalace výhybek a kvalita stavby pražcového podloží, jelikož zjištěné rozdíly se v čase nijak zásadně neměnily a byly srovnatelné i se sledovaným řezem v běžné koleji za oběma výhybkami.

4.3.2.2 Měření dynamické odezvy na ložiskové skříni lokomotivy

Na základě metodiky popsané v kap. 4.2.2.2 bylo provedeno v průběhu provozního ověřování výhybek vložených do zkušebního úseku celkem 9 standardních měřicích kampaní dynamické odezvy na kolejovém vozidle (lokomotivě) a 2 měřicí kampaně nestandardní (souhrn viz tab. 17). Všechna měření realizovala Univerzita Pardubice, přičemž výsledky byly uvedeny ve výzkumných zprávách za každý rok měření. [114–117]

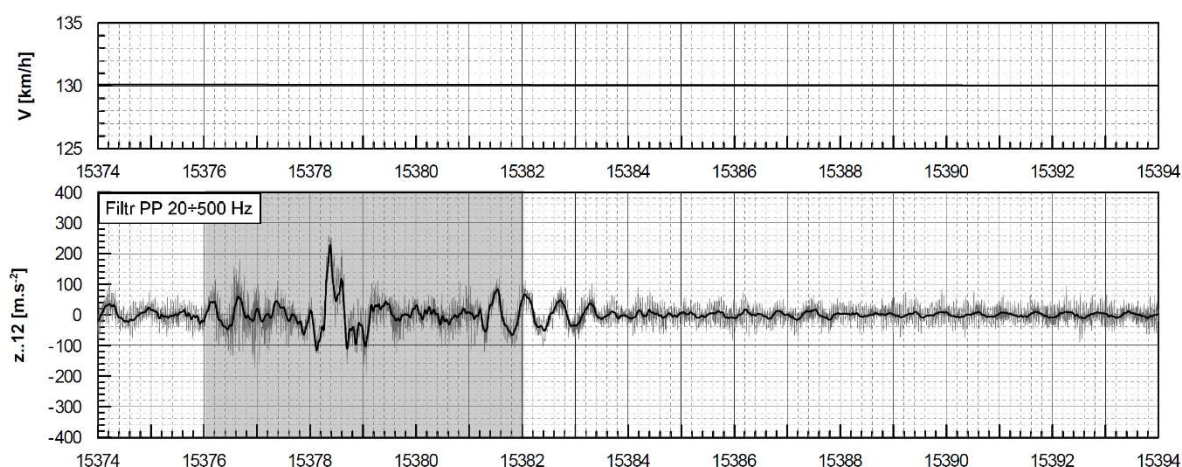
Tab. 17 Seznam měřicích kampaní měření zrychlení na ložiskové skříni lokomotivy. [117]

Kampan	Měsíc a rok	Rychlost při průjezdu kol. č. 1/kol. č. 2 [km/h]
Standardní kampaň Lokomotiva Škoda 109E (řada 380)	XI/2014	141/131
	V/2015	129/131
	XI/2015	131/128
	VII/2016	131/130
		131/129
	XI/2016	130/131
	VIII/2017	130/130
	XI/2017	130/132
	V/2018	130/123
	IX/2018	130/130
Nestandardní kampaň Lokomotiva s tlapově uloženým motorem	V/2017	131/131
		131/130
	V/2017	129/131
		130/131

Jako standardní měřicí kampaň jsou označeny měřicí průjezdy, které byly realizovány stále stejným způsobem se stejným typem lokomotivy po celou dobu sledování výhybek. V roce 2017 bylo využito příležitosti vyzkoušet měření na lokomotivě s tlapově uloženým motorem a mezně ojetými jízdními obrysy kol před soustružením a poté ihned po soustružení, aby byl zjištěn vliv stavu jízdního obrysu kola na měřené parametry.

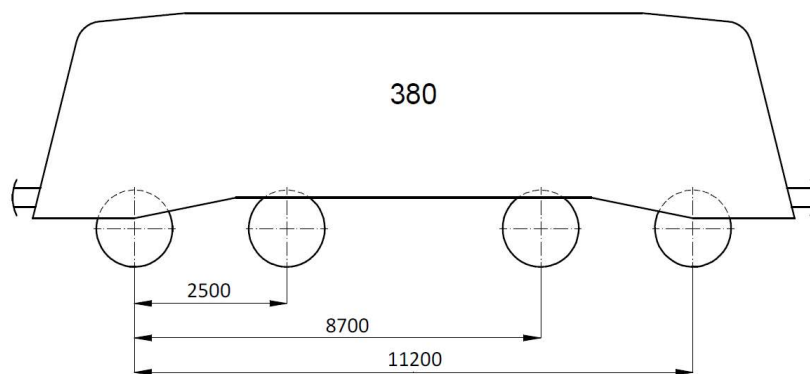
Podle metodiky [113] byla provedena výše uvedená měření a následně vyhodnocena. Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení probíhalo následujícím způsobem. Zařízením na lokomotivě jsou měřeny časové průběhy signálů zrychlení a rychlost jízdy celou dobu jízdy lokomotivy. Nefiltrované i filtrované (pásmová propust 20 až 500 Hz) časové průběhy obsahující průjezd celou výhybkou (tzn. časově vyjádřeno cca 3 až 4 s) byly vyexportovány do samostatných souborů. K jednotlivým průjezdům byla vypočtena dráha odpovídající měřenému času při průměrné rychlosti v daném intervalu výhybky. Na následujícím obrázku je uveden příklad průběhu filtrovaného i nefiltrovaného (šedou barvou na pozadí

filtrovaných) signálu a příslušného průběhu rychlosti. Průjezd srdcovkou (oblast v délce 6 m) je v průběhu vyznačena šedým stínováním. Tyto signály jsou pak dále zpracovávány při hodnocení srdcovky. [114–117]



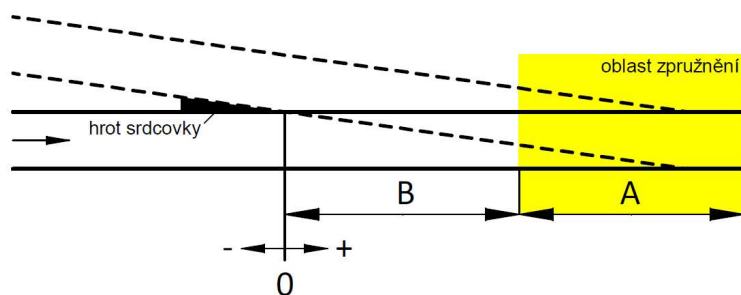
Obr. 106 Ukázka průběhu filtrovaného a nefiltrovaného průběhu svislého zrychlení na výhybce č. 2 dne 26. 5. 2018 při průjezdu směrem Č. Třebová rychlostí 130,1 km.h⁻¹. Signál je konkrétně z ložiskové skříně u kola ozn. „12“, což je první náprava vlevo ve směru jízdy. [117]

Vzhledem k tomu, že jsou měřeny signály na všech nápravách, vzniká tím posunutí jednotlivých úseků, které odpovídá vzdálenosti mezi dvojkolími měřeného vozidla, jak je patrné z následujícího obrázku.



Obr. 107 Vzájemná vzdálenost mezi dvojkolími lokomotivy řady 380. [117]

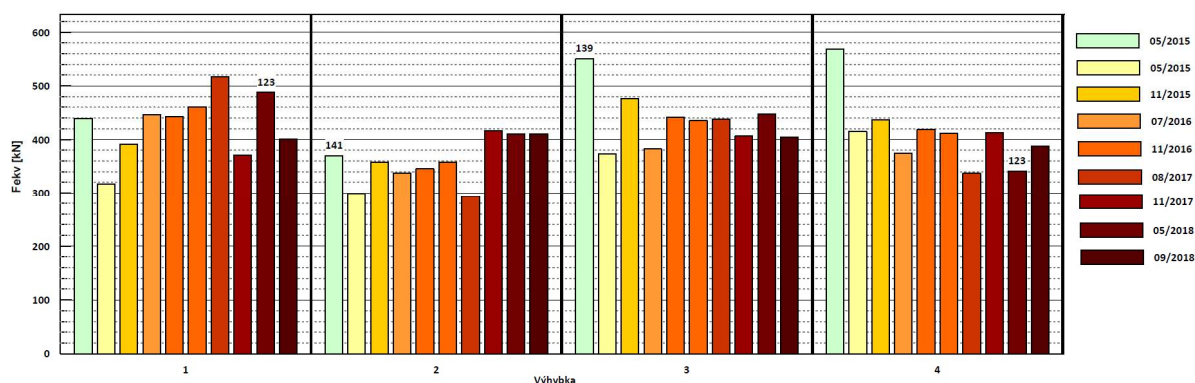
Z průběhů zrychlení v 6metrových úsecích (viz obr. 106) jsou pak vypočteny průběhy rychlostí a výchylek ve svislém směru z důvodu, aby mohlo být nalezeno místo odpovídající přechodu kola z hrotu na křídlovou kolejnici (resp. naopak). Tato hodnota je lokálně v rámci výhybky uvažována jako souřadnice 0 a od ní se odvíjí odměření oblasti výměnové části výhybky, začátku výhyby, konce výhybky a eventuálně dalších potřebných míst, viz obr. 108. U výhybky tv. 1:12-500-I (tj. všechny hodnocené výhybky č. 2 až č. 4 v žst. Ústí nad Orlicí) odpovídá kóta A délce 15,05 m a kóta B 22,96 m.



Obr. 108 Lokální souřadný systém ve výhybce, žlutě vyznačena hodnocená oblast výměny (kóta A) reprezentuje zpružněné (nebo nezpružněné) upevnění výměny; kóta B vzdálenost začátku (nebo konce) hodnocené oblasti výměny. Obrázek odpovídá konkrétně situaci u výhybky č. 2 v žst. Ústí nad Orlicí. [117]

Princip měření a vyhodnocení je konkrétně uveden v příslušné kap. 4.2.2.2. Bylo tedy hodnoceno konkrétně ekvivalentní zatížení při průjezdu srdcovkovou částí výhybky a dynamická odezva vozidla při průjezdu oblastí kluzných stoliček ve výměnové části výhybky (hodnocený parametrem je tzv. očekávaná hodnota zrychlení $OH_{z...}$, vysvětlení viz kap. 4.2.2.2).

Výsledky měření v **oblasti srdcovky**, tj. ekvivalentní zatížení od jednotlivých dvojkolí, nejlépe vystihuje následující souhrnný sloupcový graf průměrů z maximálních hodnot ekvivalentního zatížení. Jednotlivé grafy pro hodnocené výhybky jsou pak uvedeny v příloze 1.



Obr. 109 Průměry z maximálních hodnot ekvivalentního zatížení od jednotlivých dvojkolí při průjezdu srdcovkovými částmi výhybek 1 až 4. [117]

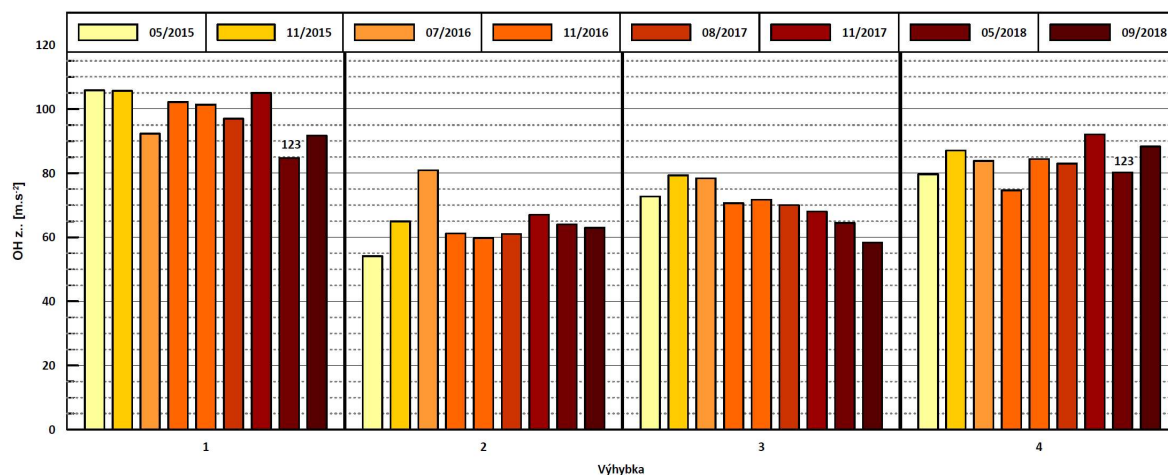
Z hlediska měření srdcovky lokomotivou lze porovnáním dat vyvodit následující závěry¹⁹:

- pouhým porovnáním průměrných absolutních hodnot měřeného ekvivalentního zatížení při standardních kampaních bez ohledu na provedenou údržbovou činnost vychází nejlépe s nejnižší hodnotou ekvivalentního zatížení

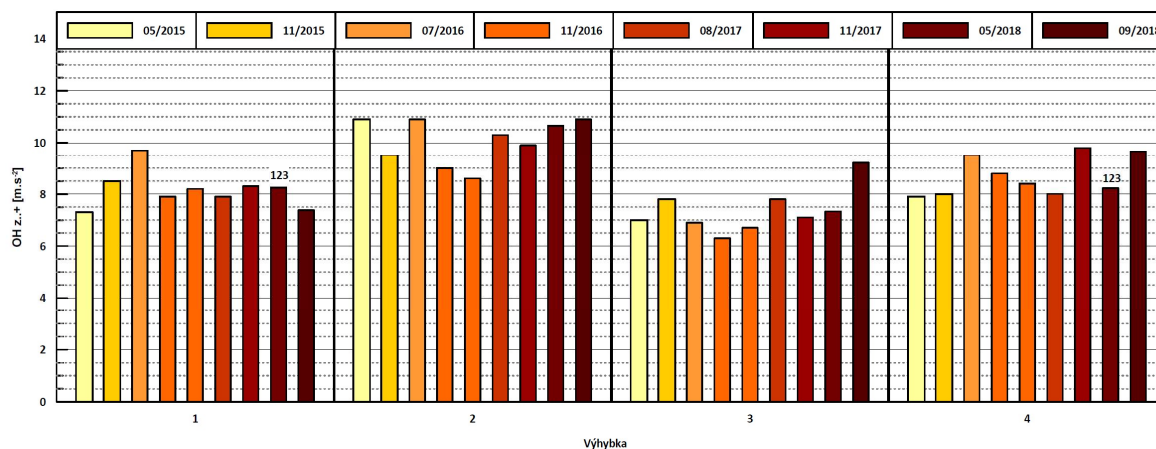
¹⁹ Částečně přímo citováno z literatury [117]

- výhybka č. 2 zpružněná, která byla pojížděna proti hrotu s průměrnou hodnotou 360 kN; následují výhybka č. 4 referenční s průměrnou hodnotou 410 kN, dále výhybky č. 1 standardní s průměrnou hodnotou 428 kN a nakonec výhybka č. 3 zpružněná, pojížděná po hrotu, s průměrnou hodnotou 438 kN;
- vezmou-li se v potaz údržbové zásahy, lze konstatovat, že podbití provedené v březnu 2015 mělo jednoznačný přínos vedoucí k významnému snížení hodnot ekvivalentního zatížení, přičemž největší změna byla zaznamenána u výhybky č. 3 (rozdíl 177 kN). Nejmenší rozdíl byl pak u výhybky č. 2 (71 kN).
 - u výhybky č. 1 od podbití v březnu 2015 docházelo k postupnému nárůstu hodnot ekvivalentního zatížení, který se zastavil po podbití v srpnu 2016.
 - po údržbovém zásahu u výhybky č. 2 v květnu 2017 (navaření, podbití) došlo k významnému snížení hodnoty ekvivalentního zatížení; po podbití v říjnu 2017 však hodnota ekvivalentního zatížení vzrostla a následně se stabilně držela ve vyšších hodnotách;
 - u výhybky č. 3 lze vysledovat příznivý vliv údržbových zásahů, kdy po podbití v říjnu 2017 došlo k mírnému snížení hodnot ekvivalentního zatížení, rovněž tak po opravě vad navařením v červnu 2018;
 - po opravě vady srdcovky výhybky č. 4 navařením v červnu 2018 došlo k nárůstu hodnoty ekvivalentního zatížení;
 - celkově vykazovala **nejlepší chování** s nejnižšími hodnotami ekvivalentního zatížení srdcovka zpružněné **výhybky č. 2**, a to zejména v letech 2015 až 2017;
 - vyšší hodnoty ekvivalentního zatížení u srdcovky výhybky č. 3 jsou přisuzovány problému v geometrii koleje před vjezdem do srdcovkové části výhybky, kde se vyskytovala evidentní „rampa“, která je patrná z měření výšek temen kolejnicových pásů;
 - měření nestandardní kampaní v květnu 2017 s lokomotivou před soustružením kol (s mezně ojetým jízdním obrysem) a ihned po soustružení s reprofilovaným jízdním obrysem přineslo ne zcela očekávané výsledky;
 - při porovnání výhybek vzájemně dopadly **nejlépe** před reprofilací **obě výhybky zpružněné** s průměrnými hodnotami 85 a 88 kN, hůře obě výhybky standardní (resp. referenční) s hodnotami 97 a 103 kN; po reprofilaci byla situace stejná, nejnižší hodnoty vykazovaly výhybky č. 2 a č. 3 (67 a 73 kN), vyšší hodnoty byly změřeny na srdcovkách výhybek č. 1 a 4 (93 a 111 kN);
 - při porovnání vlivu reprofilace ekvivalentním zatížením bylo zjištěno, že vliv je relativně malý nebo dokonce v jednom případě zcela opačný. Rozdíl se pohyboval v řádu 5 až 18 kN, u výhybky č. 4 došlo dokonce k nárůstu ekvivalentního zatížení po reprofilaci o 5 kN. Lze tedy říci, že vliv aktuálního jízdního obrysu při porovnávání hodnot z různých lokomotiv stejného typu s různým aktuálním stavem jízdních obrysů je relativně malý a odchylka se pohybuje do 10 %.

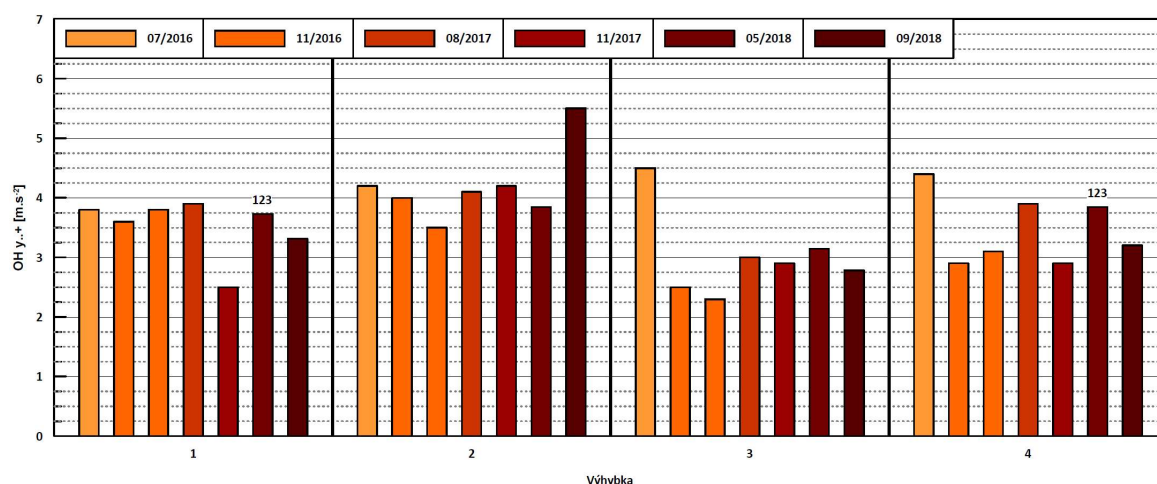
Výsledky měření v **oblasti výměny** byly pak hodnoceny pomocí spočítaného parametru tzv. očekávané hodnoty zrychlení. Ta byla zjišťována jednak na ložiskové skříni dvojkolí (stejně jako v případě srdcovky) a také na podvozku vozidla ve svislém směru OH_z .. a od roku 2016 také v příčném směru, tj. OH_y .. Níže jsou uvedeny výsledné sloupcové grafy porovnávající jednotlivé výhybky, další podrobnější grafy jsou uvedeny v příloze 1.



Obr. 110 Očekávaná hodnota zrychlení na ložiskové skříni dvojkolí při průjezdu výměnou. [117]



Obr. 111 Očekávaná hodnota svislého zrychlení na 1. podvozku při průjezdu výměnou. [117]



Obr. 112 Očekávaná hodnota příčného zrychlení na 1. podvozku při průjezdu výměnou. [117]

Z hlediska měření výměnové části lokomotivou lze porovnáním očekávaných hodnot zrychlení na podvozku vozidla vyvodit následující závěry²⁰:

- pouhým porovnáním průměrných očekávaných hodnot zrychlení **na ložiskové skříni** je vidět, že obě zpružněné výhybky mají hodnoty souvisle řádově menší než nezpružněné výhybky č. 1 a 4. Konkrétně mají průměrnou hodnotu očekávaného zrychlení výhybky zpružněné č. 2 a 3 v hodnotách 63 a 58 m.s⁻² a u výhybek č. 1 a 4 v hodnotách 92 a 88 m.s⁻². Průměrně je tedy očekávaná hodnota zrychlení na podvozku o téměř 40 % nižší u zpružněných výhybek;
- u obou výhybek zpružněných a u výhybky referenční č. 4 je patrné snížení očekávané hodnoty zrychlení na ložiskové skříni po podbití v srpnu 2016;
- pouhým porovnáním průměrných očekávaných hodnot svislého zrychlení **na podvozku** bez vlivu údržbových zásahů je na první pohled patrné, že nejmenších hodnot po celou dobu měření stabilně vykazovala výhybka č. 3 se zpružněním s podložkami pryžovými Renogum (7,3 m.s⁻²). Výhybky standardní pak vykazovaly hodnoty 8,0 až 9,0 m.s⁻² a nejvyšších zrychlení bylo dosaženo u výhybky č. 2 (zpružnění kluzných stoliček s podložkami Vossloh Cellentic®) s průměrnou hodnotou 10,1 m.s⁻²;
- porovnáním průměrných očekávaných hodnot příčného zrychlení bez vlivu údržbových zásahů je pak situace obdobná. Nejnižší hodnoty očekávaného zrychlení byly zjištěny u zpružněné výhybky č. 3 (3,0 m.s⁻²), výhybky standardní č. 1 a 4 měly shodně očekávané příčné zrychlení v hodnotě 3,5 m.s⁻² a výhybka zpružněná č. 2 měla průměrnou hodnotu očekávaného příčného zrychlení 4,2 m.s⁻²;
- z hlediska údržbových zásahů, které na průjezd výměnou mohou mít významný vliv připadá v úvahu pouze podbíjení oblasti výměny nebo výměna jazyka a opornice; eventuálně broušení kolejnic;

²⁰ Částečně přímo citováno z literatury [82]

- lze konstatovat, že podbíjení snížilo hodnotu očekávaného zrychlení na podvozku (příčného i svislého) v řádech 0,5 až 2,0 m.s⁻² (např. při podbíjení v roce v srpnu 2016);
- výměna jazyka a opornice výhybky č. 4 v květnu 2017 měla minimální přínos z hlediska očekávané hodnoty příčného zrychlení, snížení bylo o 1,6 m.s⁻²;
- broušení nemělo významný vliv na očekávanou hodnotu svislého ani příčného zrychlení.

Celkově lze z měření na lokomotivě hodnotit, že zpružnění jak výměny, tak srdcovky u výhybek nemá zcela jistě žádný negativní vliv na projíždějící vozidla, v některých případech se naopak projevila pozitiva, v některých případech významnější.

Z pohledu průjezdů srdcovkami lze nejlépe hodnotit srdcovku zpružněné výhybky č. 2; naopak zpružněná srdcovka výhybky č. 3 vycházela nejhůře, přičemž tuto skutečnost lze zdůvodnit známou nepravidelností v geometrii koleje před vjezdem do výhybky.

Z hlediska průjezdu výměnou je nutno dynamickou odezvu hodnotit z pohledu působení na ložiskovou skříň vozidla a na podvozek. Při porovnání výhybek z hlediska dynamické odezvy na ložiskové skřini vycházejí nejlépe obě zpružněné výměnové části výhybek č. 2 a č. 3, zatímco významně hůře vycházejí výměnové části standardních výhybek č. 1 a č. 4. Z pohledu působení dynamické odezvy na podvozek byly nejmenší hodnoty zjištěny opět u jedné ze zpružněných výhybek (č. 3), u výhybky zpružněné č. 2 byla zjištěna ale dynamická odezva na podvozku nejvyšší. Vliv této disproporce není znám, je možné, že vliv na tuto skutečnost mohou mít i mnohem měkčí podložky Cellentic® (oproti podložkám Renogum ve výhybce č. 3), jejichž vyšší pružnost se projeví příznivě na ložiskové skřini, ale negativně se projeví na rámu podvozku vozidla.

4.3.2.3 Měřicí vůz železničního svršku CTD

Po dobu sledování zkušebního úseku se zpružněnými výhybkami byly ze strany CTD (dříve TÚDC) poskytována data z jednotlivých průjezdů měřicího vozu. Ten v dotčeném úseku jel vždy 3× ročně, a to na jaře (obvykle březen), v létě (obvykle červenec) a na přelomu podzimu a zimy (obvykle listopad). Za celé 5leté sledování proběhla tedy následující měření (celkem 16 měření v každé koleji):

- **v koleji č. 1:** I - 25. 11. 2014; II - 3. 4. 2015; III - 27. 7. 2015; IV - 24. 11. 2015; V - 15. 3. 2016; VI - 26. 7. 2016; VII - 28. 11. 2016; VIII - 21. 3. 2017; IX - 25. 7. 2017; X - 28. 11. 2017; XI - 27. 3. 2018; XII - 23. 7. 2018; XIII - 3. 12. 2018; XIV - 19. 3. 2019; XV - 23. 7. 2019; XVI - 27. 11. 2019;

- **v koleji č. 2:** I – 28. 11. 2014; II – 10. 4. 2015; III – 30. 7. 2015; IV – 3. 12. 2015; V – 18. 3. 2016, VI – 2. 8. 2016; VII – 6. 12. 2016; VIII – 28. 3. 2017; IX – 28. 7. 2017; X – 5. 12. 2017; XI – 5. 4. 2018; XII – 31. 7. 2018; XIII – 11. 12. 2018; XIV – 26. 3. 2019; XV – 31. 7. 2019; XVI – 5. 12. 2019.

Pro přehledné zobrazení poskytovaných dat z měřicího vozu železničního svršku a následně pro jejich jednodušší interpretaci byly vytvořeny grafy následujících veličin:

- rozchod koleje (RK);
- převýšení (PK);
- podélná výška levá (VL);
- podélná výška pravá (VP);
- zborcení koleje na měřické základně 3 m;
- zborcení koleje na měřické základně 6 m;
- zborcení koleje na měřické základně 12 m.

V grafech byly mimo barevně odlišených křivek průběhů jednotlivých veličin také vyznačeny provozní a mezní provozní odchylky (většinou pouze stupeň AL, v případě významného překročení stupně AL také stupeň IL). Pro jasnou identifikaci místa ve výhybce byly v grafu vyznačeny také významné body výhybky (ZV, KV, hrot srdcovky, oblast zpružnění srdcovky, oblast zpružnění výměny) a také byla do grafů vložena schémata výhybek s označenými čísli pražců pro přesnější určení případného kritického místa. Všechny grafy jsou k dispozici v příloze 5. Hodnocení jednotlivých veličin je uvedeno níže.

Rozchod koleje (RK)

Měření **rozchod koleje (RK)** má u všech 3 zkoumaných výhybek po celou dobu sledování obdobných charakter průběhu podél výhybky. V zásadě lze říci, že hodnoty nevybočují ze stanovených provozních odchylek AL pro jednotlivé oblasti výhybky (pouze mírně u výhybky č. 2 podrobně viz dále).

U **výhybky č. 2** byl výchozí stav rozchodu koleje relativně dobrý, mez AL byla mírně překonána do plusu v oblasti mezi prvním a druhým závěrem a mírně rovněž do plusu v oblasti srdcovky. Obě tyto odchylky byly řádově do 2 mm a v krátké délce. Další měření (II a III) se charakterem neliší, přičemž RK se globálně zlepšil přiblížením ke jmenovité hodnotě, kritická místa mezi prvním a druhým závěrem se lokálně zhoršovala (v oblasti přibližně dvou pražců 15-006 a 15-007), v srdcovce došlo k mírnému zlepšení situace, až téměř přiblížení hodnotě stupně AL. Další dvě měření (IV a V) ukázala mírné zhoršení v oblasti kluzných stoliček za druhým závěrem (cca +4 mm) a rovněž zhoršení ve výměnovém styku (bod ZV), kde hodnoty dosáhly meze AL (+5 mm). Další měření (VI až IX) byla opět charakterem podobná, mírné zhoršení

nastalo za druhým závěrem ve výměnové části, ale nepřesáhlo mez sledování (stupeň AL). Ve výměnovém styku došlo ale naopak ke zlepšení (cca +4 mm). Měření X ukázalo potom lokální skokový nárůst rozchodu koleje v oblasti srdcovky za koncem odlitku, a to až do hodnoty +9 mm, přičemž problém se týkal cca 3 pražců (15-068 až 15-070). Další měření držela stále charakter předchozích měření s tím, že některá měření vykazovala nárůst (do +6 mm) v oblasti za druhým závěrem (VIII, XIV), lokální nárůst zjištěný v měření X již nebyl zjištěn, ale byl v srdcovce zjištěn opět lokální nárůst v oblasti hrotu do cca +8 mm při měření XIII, který byl v menší míře střídavě identifikován i při měření II a IV. Obdobný stav byl pak zjištěn i posledními měřeními XV a XVI. Celkově lze hodnotit rozchod koleje ve výhybce č. 2 jako akceptovatelný pro dané rychlostní pásmo s občasnými lokálními nárůsty rozchodu koleje. Záporné rozchody koleje ve výhybce nebyly identifikovány vůbec. V oblasti zpružnění výměny byl po celou dobu měření charakter průběhu rozchodu koleje konzistentní, přičemž lze vysledovat zejména za druhým závěrem mírný nárůst.

U **výhybky č. 3** je globálně situace mírně lepší. Zcela minimálně některá měření přesahují meze sledování (AL), např. měření III mezi prvním a druhým závěrem u pražce 15-006, kde bylo měřeno cca -3,5 mm, dále měření XIV u prvního závěru, kde bylo měřeno lokálně +5,5 mm a v oblasti srdcovky u měření III a IV, kde bylo v oblasti jednoho až dvou pražců (15-058) naměřeno až +9 mm. Lze ale vysledovat, že podél výhybky je rozchod koleje v relativně úzkém, přibližně 2 mm, pásu, přičemž rozchody koleje v oblasti kluzných stoliček byly v mnohem širším pásu (cca 4 mm).

U referenční **výhybky č. 4** lze situaci považovat za velice podobnou výhybce č. 3. Rozchod koleje přesáhl mez sledování pouze lokálně ve dvou místech výhybky za celou dobu měření. Jednalo se o oblast výměnového styku, kde mez AL přesáhla měření V až IX. Přibližně v oblasti hrdla srdcovky potom byla mez sledování AL překročena výrazně při měření VI až IX. Maximální změřená hodnota byla cca +9 mm při měření VI. Opět jako v předchozím případě se hodnoty podél výhybky za celou dobu měření pohybují v pásu 2 mm, a to až na oblast výměny za druhým závěrem, kde je opět pás v šířce cca 4 mm.

Převýšení koleje (PK)

Další hodnocenou veličinou bylo **převýšení koleje** ve výhybce. Na měření převýšení je pěkně vidět změna ve zpracování dat měřicím vozem, kdy od měření X (podzim 2017) jsou vykreslené křivky na první pohled hladší.

U **výhybky č. 2** je převýšení proměnlivé po délce a hodnoty se vyskytují v konzistentním pásu cca 10 mm. V celé posuzované délce odchylky v převýšení nevybočují z meze sledování AL. Ve výchozím stavu měla výhybka nulové převýšení v oblasti srdcovky, zbytek výhybky byl v převýšení průměrně cca +3 mm, tzn.

výhybka byla mírně natočena v příčném řezu směrem dolů z náspu, což mohlo svědčit i o nepravdivém sedání hrany náspu tělesa. Dále je identifikovatelná lokální významnější odchylka v oblasti druhého závěru, což může svědčit o nedostatečném podepření žlabového pražce, který měl rovněž tendenci se natáčet směrem z náspu. Výhybka se celkově z hlediska převýšení pak postupem času natáčela konzistentně tak, že celá výhybka při posledních měřeních ležela v záporném převýšení, přičemž největší hodnoty převýšení byly v srdcovce, kde bylo měřeno až -12 mm. Při posledním měření byla výhybka tedy již natočena opačně, a to ve sklonu k sousední koleji č. 2 (resp. spád směrem k protihlukové stěně).

Výhybka č. 3 měla globální průběh převýšení velice podobný výhybce č. 2. Prvním měřením bylo zjištěno převýšení blížící se 0 s mírnou tendencí do plusových hodnot v oblasti výměny (do $+5$ mm). Ta tedy byla mírně skloněna směrem k hraně náspu. Stejně jako u výhybky č. 2 se v průběhu sledování situace otočila, kdy posledními měřeními bylo identifikováno pouze záporné převýšení s nejvyššími hodnotami v oblasti srdcovky (do -12 mm), výhybka byla tedy natočena směrem k protihlukové stěně.

Výhybka č. 4 měla ve výchozím stavu převýšení v oblasti výměny blížící se 0, ve střední části a srdcovce bylo indikováno převýšení přesahující $+5$ mm (skloněno k protihlukové stěně). Další měření znamenaly mírnou změnu situace, kdy převýšení ve výměně začalo nabývat plusových (řádově 3 až 5 mm), zatímco střední část a srdcovka se zlepšila, hodnoty nabývaly vesměs do $+5$ mm (pouze lokálně přesahovaly do 6 mm). Průběžně se projevoval skok v převýšení v oblasti hrotu srdcovky (tam se vlivem zatlačování výšky kolejnicového pásu vedoucího přes srdcovku převýšení blížilo 0 po celou dobu). Tento stav se držel obdobně až do měření X (5. 12. 2017). V tomto měření došlo jednak ke zjevné úpravě algoritmu výpočtu hodnot (hladší poskytované křivky, patrné ze všech měření), ale také se převýšení přesunulo bez významné změny charakteru křivky dolů. Výměna se následně pohybovala v záporných hodnotách do -5 mm a střední část a oblast srdcovky byly přibližně kolem 0. Došlo tedy z hlediska měřených hodnot jakoby k celému natočení výhybky. Podbíjení dle dostupných informací zde mezi těmito měřeními nebylo realizováno, z hlediska údržbových zásahů došlo pouze k výměně jazyka a opornice. Následující měření téměř přesně kopírovalo stav před odchýlným měřením X, a z dalších měření je patrné zhoršení, kdy výhybka měla dále tendence se natáčet k protihlukové stěně, což je indikováno zvětšujícím se převýšením do plusových hodnot při stejném charakteru křivky. Od jarního měření se stav začal opět zlepšovat a poslední měření docela vycházejí nejlépe z celého sledovaného období (od -5 mm do $+5$ mm). Po celou dobu sledování nebyla překročena mez AL.

Podélná výška levá a pravá (VL, VP)

Byla rovněž sledována podélná výška levá a pravá. Zde bylo realizováno porovnání s výsledky nivelace, přičemž zásadní rozdíl v obou měřeních je, že nivelace je stav bez zatížení, zatímco měřicí vůz měří při zatížení železničním vozidlem. Porovnání obou způsobu měření však lze udělat pouze orientačně, jelikož měřicí vůz poskytuje data po 0,25 m, zatímco nivelace byla dělána obecně po 3 m. Některé odchylky tedy nelze porovnání odhalit.

Podélná výška **výhybky č. 2** v oblasti výměny a střední části nepřesáhla mez AL, po většinu doby sledování vycházela do cca ± 4 mm. Lokální závada se vyskytla pouze u žlabového pražce výhybky, ani tam nebyla dosažena mez AL. V srdcovce byla u obou kolejnicových pásů indikována závada u hrotu srdcovky, kdy u pravého kolejnicového pásu (u přídržnice) byla mírně překročena mez AL při měření VI, u levého kolejnicového pásu byla u více měření mez AL překročena a při měření VI byla dokonce na kolejnicovém páse jdoucí přes srdcovku překročena mez IL.

U **výhybky č. 3** se výška levá i výška pravá držely po celou dobu ve stejném charakteru s minimálními odchylkami v průběhu, křivka je tedy po celou dobu sledování konzistentní. Výkyvy nepřesahují v žádném místě meze AL, výměna má relativně rovnoměrný průběh (do cca ± 3 mm), vzdálenější část střední části a srdcovka pak mají v obou kolejnicových pásech zvlnění třemi významnějšími vlnami (do 5 mm). Ve výšce pravé je pouze lokální zhoršení i ve výměně v oblasti závěru do -6 mm, což je způsobeno patrně nevyváženou hmotou přírubového přestavníku upevněného na žlabový pražec.

U **výhybky č. 4** nebyla situace významně odlišná oproti výše uvedenému stavu ostatních výhybek, u srdcovky docházelo k postupnému zhoršování stavu v oblasti srdcovky, kdy měřením XII bylo u pravého kolejnicového pásu překročeno -5 mm a posledními měření došlo téměř k dosažení meze AL. U levého kolejnicového pásu (přes srdcovku) došlo dokonce měřením XIV a dalšími k mírnému lokálnímu překročení meze AL.

Zborcení koleje (ZK, měřické základny 3, 6, 12 m)

Zborcení koleje na všech třech zkoumaných měřických základnách (3, 6 a 12 m) u všech sledovaných výhybek neukázalo významné abnormality, ve všech případech byla většina hodnot daleko od meze AL. Mírné lokální odchylky (nepřesahující hodnotu AL) se vyskytly v místě poruch GPK popsanych výše – jednalo se zejména o srdcovky a místo žlabového pražce, resp. závěru. Hodnoty ZK na měřické základně 3 m byly ve většině případů do $\pm 2 \text{ mm.m}^{-1}$ (mimo zmíněné lokální poruchy), a to u všech 3 výhybek. Obdobně tomu bylo u hodnot spočítaných na měřické základně 6 m,

kdy většina hodnot ZK nepřesáhla $\pm 1,5 \text{ mm.m}^{-1}$ a také u měřické základny 12 m, kde nebylo většinou dosaženo hodnoty $\pm 1 \text{ mm.m}^{-1}$.

Stručné zhodnocení výstupů z měřicího vozu

Níže je uvedeno stručné hodnocení všech sledovaných veličin měřicím vozem z pohledu porovnání všech třech sledovaných výhybek.

Z hlediska **celkového hodnocení rozchodu koleje** změřeného měřicím vozem lze konstatovat, že všechny 3 sledované výhybky zpružněné i referenční nevybočují z běžně měřených hodnot. Lokální překročení rozchodu koleje v oblasti srdcovky může být dáno také metodikou snímání rozchodu koleje, kde z důvodu přerušení pojížděné hrany mohou být měřeny rozchody koleje nesprávně. U všech výhybek byl také identifikován větší rozptyl hodnot rozchodu koleje ve výměnové části za druhým závěrem, nelze tedy říci, že by odlišné konstrukční řešení kluzných stoliček mělo vliv na vývoj rozchodu koleje v čase. Větší pás hodnot v této oblasti bude patrně dán tím, že je rozchod měřen v pohyblivé části jazyka, kde může mít na měření vliv i míra dotlačení jazyka do jazykových opěrek dle toho, kolik vlaků projelo výhybkou před samotným měřením.

Převýšení se po celou dobu sledování drželo obvykle do $\pm 10 \text{ mm}$ u všech sledovaných výhybek, přičemž ani lokálně nebylo dosaženo meze AL. Charakter průběhu převýšení se po celou dobu sledování neměnil, zajímavé je, že v průběhu času docházelo k plynulému natáčení výhybek. Zatímco u výhybek č. 2 a č. 3 byl výchozí stav převýšení blízký projektovanému stavu, tedy 0 mm , výhybky se časem natáčely se sklonem k sousední koleji. Natáčení tedy probíhalo na stranu odbočných větví, což se zdá být logické vzhledem k větší hmotnosti výhybky na této straně a neznačí to poruchu v železničním spodku. Výhybka č. 4 měla naopak tendenci se natáčet v průběhu sledování k protihlukové stěně na kraji náspu, což by mohlo značit mírnou poruchu v železničním spodku, resp. ujíždění svahu s protihlukovou stěnou. Výhybka č. 4 nicméně končila sledování s relativně vyrovnaným převýšením do $\pm 5 \text{ mm}$, tedy při závěru sledování došlo ke zlepšení stavu.

Sledovaná **podélná výška pravého a levého kolejnicového pásu** neukázala významné rozdíly mezi jednotlivými výhybkami. Vyskytly se pouze lokální závady, které byly zjištěny již i z měření metodou nivelace temen kolejnicových pásů. U všech výhybek se jednalo zejména o propady v oblasti srdcovky, kde některá měření ukázala i dosažení nebo překročení meze AL, a dále také propady v oblasti závěrů (resp. žlabových pražců). Globálně lze v průběhu podélné výšky rovněž vysledovat jistou souvislost s výsledky měření metodou nivelace, kde je ovšem měřen stav bez zatížení.

Zborcení koleje sledované na 3 měřických základnách (3, 6 a 12 m) neukázalo významné odchylky ani u jedné ze sledovaných výhybek. Všechny výhybky z hlediska vývoje zborcení lze považovat za totožné.

4.3.3 Celkové hodnocení zkušebního úseku

Pravidelné sledování **výškové polohy temen kolejnicových pásů** obou výhybek metodou nivelace přineslo stěžejní informace o stavu výhybek z hlediska trvanlivosti geometrických parametrů koleje a míry sedání v projeté zátěži. Toto vyhodnocení přineslo cenné informace zejména ve vztahu k četnosti provádění údržbových zásahů vztahujícími se k úpravě geometrie koleje (podbíjení). Byly vyhodnoceny odchylky od projektované výškové nivelety, převýšení koleje a sedání v projeté zátěži pro jednotlivé části výhybek. Všechny tyto veličiny jsou vztaženy k nezátíženému stavu výhybek (oproti měřicímu vozu). Odchylky od projektované výškové polohy přinesly informace zejména o charakteru a vývoji závad ve výškovém průběhu. Ukázaly zejména rozdílný způsob průběhu deformace kolejnicového pásu v oblasti srdcovky, kdy zpružněné výhybky mají deformaci na delší vzdálenosti a v menší hodnotě průhybu, zatímco výhybka nezpružněná má tuto deformaci v užším pásu a výškově výraznější. Převýšení koleje vycházelo po celou dobu u všech sledovaných výhybek konzistentně bez významnějších změn v charakteru nebo natočení výhybky (na rozdíl od výstupů z měřicího vozu). Za stěžejní výstup se dá považovat vyhodnocení míry sedání jednotlivých výhybek v projeté zátěži. Zde se ukázalo zcela jasně, že zpružněné výhybky sedají až o 40 % méně než standardní referenční výhybka, přičemž obě zpružněné výhybky vykazaly podobný průběh. Pokud by se toto chování zpružněných výhybek potvrdilo i u případných dalších zkušebních úseků, lze to pokládat za **hlavní přínos zpružnění – prodloužení intervalu podbíjení**.

Za účelem zjištění více informací o stavu srdcovek probíhalo v pravidelných dvouročních intervalech **3D skenování pojížděných ploch srdcovek**. Výsledky ze zkoumaného ojetí přinesly informace o trochu jiném způsobu ojíždění srdcovek u zpružněných výhybek a jiném způsobu u referenční výhybky se standardním upevněním srdcovky. Tento jiný charakter ojíždění srdcovek ale nepřinesl vyložení pozitivní efekt s ohledem na zpružněné výhybky, právě naopak, v době před navařením srdcovek ve zpružněných výhybkách bylo ojetí na těchto srdcovkách řádově o 1 mm větší než u referenční výhybky. V důsledku je ale zpružnění pevné srdcovky pro aplikaci ve vysokorychlostních tratích málo relevantní, jelikož se předpokládá použití výhradně srdcovek s pohyblivými hroty, které z hlediska průjezdu vozidla a jeho působení na výhybku odpovídají více výměnové části výhybky.

V průběhu celého 5letého sledování zkušebního úseku probíhalo kontinuální **měření projeté zátěže** pomocí měřičů projeté zátěže TON 1 vyvinutými v DT. To se ukázalo jako velice přínosná věc při sledování, jelikož každá z kolejí, v níž byly vloženy sledované výhybky, měla jinou roční projetou zátěž. Hodnocení tedy v čase by nebylo zcela relevantní, jelikož za 5 let provozu byl již rozdíl v obou kolejích v řádu 10 mil. hrt. Díky možnosti stanovení přesné projeté zátěže za konkrétní den bylo ke konkrétním údržbovým zásahům a pravidelným měřením dopočítána přesná celková projetá zátěž projetá od zprovoznění příslušné výhybky.

Měření **dynamických účinků** na železničním svršku a na železničním spodku, které zprostředkovalo na zkušebním úseku VUT, bylo realizováno v průběhu provozního ověřování celkem v 5 měřicích kampaních. Při měření na železničním spodku byly využity snímače, které do pražcového podloží byly instalovány již v průběhu stavby. Jednalo se o měřicí kameny (3osé akcelerometry) a tlakové snímače od firmy Geokon na zemní pláni a pláni tělesa železničního spodku. Měření tlaků nepřineslo významné rozdíly mezi oběma výhybkami, identifikované rozdíly byly tak malé, že je lze spíše přisuzovat stavu pražcového podloží a aktuálnímu stavu výhybky. Vyhodnocení šíření vibrací ve frekvenční oblasti ukázalo jisté rozdíly v řezu srdcovky, což lze přisuzovat odlišnosti v konstrukci upevnění, resp. realizovanému zpružnění. Lze tedy z hlediska pražcového podloží konstatovat, že obě výhybky jsou v zásadě srovnatelné a žádný významný přínos zpružnění se neprojevil. Z hlediska měření na železničním svršku byla pozornost soustředěna zejména na pohybové chování pražců, které ukázalo největší rozdíly mezi oběma výhybkami. Měření prokázalo, že pohyby jak v podélném, tak příčném směru v oblasti srdcovky jsou řádově mnohem menší u výhybky č. 3 zpružněné než u výhybky č. 4 referenční, a to v hodnotě 1,0 až 1,5 mm. To lze považovat za jednoznačný přínos zpružněné výhybky. Dále byl na železničním svršku zjišťován přenos vibrací, přičemž byly zjištěny rozdílná místa výskytu měřených maxim u výhybky zpružněné a výhybky referenční, což lze přisoudit rozdílnosti konstrukčního řešení upevnění.

Měření na lokomotivě, které bylo provedeno spolupracující organizací UPCE, doplnilo do sledování velmi přínosné informace z pohledu projíždějícího vozidla. To je z hlediska výhybek a jiných konstrukcí železničního svršku také velmi důležité, protože neméně důležitým cílem je také vyvinout výhybky, které budou poskytovat komfort cestujícím a budou příznivě působit na vozidla. V rámci vyhodnocení byl problém rozdělen na dvě zvlášť posuzované oblasti – na oblast srdcovky a oblast výměny (kluzných stoliček). Výsledky vyhodnocení na srdcovce ukázaly nejlepší chování srdcovky výhybky č. 2 zpružněné, která je pojížděna dokonce proti hrotu. Naopak hůře než srovnávací výhybka referenční dopadla druhá zpružněná výhybka č. 3, nicméně tento stav je přisuzován ke vzniklé „rampě“ před vjezdem do výhybky ve směru pojíždění, což může negativně ovlivnit kinematiku jízdy vozidla. Při

nestandardní kampani vozidlem před reprofilací a po reprofilaci kol ale nejlépe dopadly obě zpružněné výhybky. Hodnocení výměnové části výhybky bylo provedeno na ložiskové skříni lokomotivy a na podvozku. Na ložiskové skříni lokomotivy měly průměrné očekávané hodnoty zrychlení obě zpružněné výhybky menší než porovnávané výhybky referenční, řádově až o téměř 40 %. Naopak při porovnání průměru z očekávaných hodnot zrychlení na podvozku vykazovala nejmenší hodnoty zpružněné výhybka č. 3, zatímco nejvyšších hodnot zrychlení bylo zjištěno u zpružněné výhybky č. 2. To ukázalo zajímavou informaci z pohledu zpružnění, jelikož ve výhybce č. 2 byly použity měkčí podložky než u výhybky č. 3. Je tedy možné, že z hlediska vozidla byly použité podložky již příliš měkké. Závěrem z měření na lokomotivě lze konstatovat, že zpružněné výhybky po dobu sledování působily na projíždějící vozidlo lépe než výhybky standardní konstrukce.

Výstupy z **měřicího vozu železničního svršku CTD** poskytly cenná data z globálního sledování výhybek pod zatížením. Ekvivalentem měřených veličin byly hodnoty z provedeného měření výšek metodou přesné nivelace, avšak tyto hodnoty byly bez zatížení vozidlem. Byly sledovány veličiny rozchod koleje, podélná výška levého a pravého kolejnicového pásu, převýšení a zborcení koleje na základně 3, 6 a 12 m. Měření po celou dobu neukázalo významné rozdíly mezi oběma sledovanými typy výhybkových konstrukcí (zpružněná/standardní výhybka). Obecně se průběžně projevovaly lokální závady v oblasti pevných srdcovek a v oblasti žlabových pražců, a to u všech sledovaných veličin. Nebylo však ve většině případů dosaženo meze AL, pouze výjimečně byla mez AL překročena a naprosto ojediněle dosáhla nějaká z veličin meze IL. Lze tedy říci, že zpružněné výhybky se z hlediska měřicího vozu neodchylovaly od standardní konvenční konstrukce výhybky. Při návrhu vysokorychlostních výhybek je ale potřeba reflektovat místa s největším výskytem poruch, což jsou žlabové pražce a pevné srdcovky. Pevné srdcovky jsou u výhybek vysokorychlostních nahrazeny obvykle pohyblivými, což částečně řeší tento poznatek, nicméně se ukazuje, že bude potřeba řešit problematiku žlabových pražců stávající konstrukce, které se z hlediska svého konstrukčního provedení jeví pro vysokorychlostní provoz jako slabé místo v rámci celé výhybky.

Celkově lze výhybky porovnat následovně. Za celou dobu sledování nevykazovaly zpružněné výhybky neobvyklé chování, vč. nadměrného výskytu vad nebo potřeby častější údržby, což lze jako první důležitou věc hodnotit velmi pozitivně. Z hlediska očekávaných přínosů se neprojevalo vše zcela očekávaně, nicméně lze významné přínosy u zpružněných výhybek přesto identifikovat:

- měření výškového průběhu potvrdilo příznivější deformaci v oblasti srdcovky u zpružněných výhybek než u výhybky standardní. Tato deformace také nabývala mnohem menších hodnot;

- vyhodnocené sedání zcela jednoznačně prokázalo přínos zpružnění u obou zpružněných výhybek. Dlouhodobější trvanlivost GPK ve zpružněných výhybkách také potvrdilo odložení prvního podbíjení v těchto výhybkách. Lze tedy očekávat benefit v oddálení potřeby podbíjení a větší stálosti GPK;
- měření průhybů na pražci při průjezdu vozidla (resp. pohybového chování pražců) v oblasti srdcovky ukázalo rovněž významný přínos, kdy tyto pohyby byly významně menší u výhybky zpružněné než u výhybky referenční;
- měření odezvy na ložiskové skříní lokomotivy identifikovalo jasný přínos zpružnění v oblasti výměnové části obou zpružněných výhybek;
- měření odezvy na ložiskové skříní lokomotivy v oblasti srdcovky ukázalo přínos u výhybky č. 2, přestože byla (oproti referenční výhybce č. 4) pojížděna proti hrotu (u srdcovky výhybky č. 3 se předpokládá vada geometrie před výhybkou, která ovlivňuje výsledky v srdcovce v. č. 3);

Nepříznivě pro zpružněné výhybky vyšlo pouze sledování ojetí srdcovky, což vyústilo také v dřívější navaření obou srdcovek zpružněných výhybek. Srdcovky byly následně vyměněny všechny po cca 4 letech provozu, přičemž původní srdcovky ZPT (odlévaný monoblok z manganové austenitické oceli) byl u výhybek č. 3 a č. 4 zaměněn za srdcovku ZPTZ (zpevněnou výbuchem). Vyvstaly oprávněné diskuze, zda zpružnění instalované do systému upevnění má při přechodu kola vůbec na pojížděnou plochu významný vliv. Je známo z teorie rázových sil při průjezdu srdcovkou (viz kap. 2.1.10), že na sílu P1, která trvá krátce, dosahuje významných hodnot a ovlivňuje zejména pojížděnou plochu, nemá vliv tuhost kolejnice a tuhost podloží. Tyto tuhosti mají vliv až na rázovou sílu P2, která trvá déle, dosahuje mnohem menších hodnot a ovlivňuje také systémy upevnění, pražce a pražcové podloží. Z uvedeného je tedy zřejmé, že přínos zpružnění se může projevit až u rázové síly P2, která má účinky na celou oblast srdcovky, proto se přínos projevil zejména ve větší stabilitě GPK, pohybech pražců apod. a nikoliv na pojížděné ploše srdcovek.

5 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ NA ZÁKLADĚ ZJIŠTĚNÉ STATICKÉ A DYNAMICKÉ ODEZVY

V průběhu let 2011 až 2014 bylo v DT navrženo zpružněné upevnění do výhybek standardních v optimalizované formě se zpružněním oblasti výměny a oblasti srdcovky. Toto řešení je bez významnějších úprav aplikovatelné pro všechny koridorové výhybky s pevnými srdcovkami jakéhokoliv typu (ZMB 3, ZPTZ apod.). Toto řešení bylo následně **provozně ověřeno s pozitivními výsledky** (viz kap. 4.3.3). Vyvstala ale pochybnost o prosté aplikovatelnosti tohoto řešení do výhybek vysokorychlostních, které obsahují jisté odlišnosti, např. jiné přestavné a závěrové systémy, mnohem komplikovanější srdcovku s pohyblivým hrotem apod. Proto bylo přistoupeno k výpočtovému prověření vysokorychlostní výhybky a následný návrh zpružnění systémů upevnění obdobným způsobem jako u standardní konvenční výhybky. Jako reprezentantem pro tento návrh byla vybrána první vysokorychlostní výhybka navržená v České republice, a sice výhybka tvaru J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS.

Postup dílčích činností vedoucích k dosažení cíle „Určení statické a dynamické odezvy VR výhybky“ a „Návrh konstrukčního řešení zpružnění VR výhybky“ popisuje tato kapitola. Jednotlivé dílčí činnosti postupu jsou znázorněny na následujícím schématu, viz obr. 113.

V části 5.1 Metodika zpracování je popsán způsob přípravy 3D modelu vysokorychlostní výhybky, a to vč. modelování jednotlivých konstrukčních prvků. Dále je zde popsáno, jakým způsobem byl model připraven pro výpočtové modelování a stručně je zde uvedeno, jak byl proveden výpočet v sw. ANSYS. Je zde také uveden předběžný návrh zpružnění vysokorychlostní výhybky vycházející z provedené rešerše (viz kap. 2.2 a 2.3) a ze zkušeností z provozního ověřování a testování na zkušebním úseku v žst. Ústí nad Orlicí (viz kap. 4).

Následuje kapitola 5.2 Dosažené výsledky, kde jsou uvedeny jednak výsledky z provedeného výpočtového modelování na modelu původní výhybky, jednak na modelu s modifikovanými systémy upevnění se zpružněním. Nakonec je uveden finální návrh systémů upevnění se zpružněním do vysokorychlostní výhybky včetně doporučení pro uvedení do praxe.

Vlastním příspěvkem v této části je zejména **příprava podkladů pro výpočtový model**. Ta se netýkala pouze samotného 3D modelování, ale také podrobného popisu jednotlivých konstrukčních prvků, zejména systémů upevnění, přestavných a závěrových systémů, konstrukčního řešení srdcovky apod. To bylo důležité z hlediska správného vytvoření geometrického výpočtového modelu z hlediska aplikace

správných vazeb mezi jednotlivými prvky. Samotné FEM modelování bylo pak provedeno na VUT. Následovala **interpretace výsledků a návrh konstrukčního řešení zpružnění**, což bylo opět vlastním příspěvkem do této činnosti. Po výpočtu na modelu výhybky se zpružněním prováděného opět na VUT proběhl **vlastní finální návrh podložek** do zpružněných systémů upevnění.



Obr. 113 Postup dílčích činností vedoucích k dosažení cíle.

5.1 METODIKA ZPRACOVÁNÍ

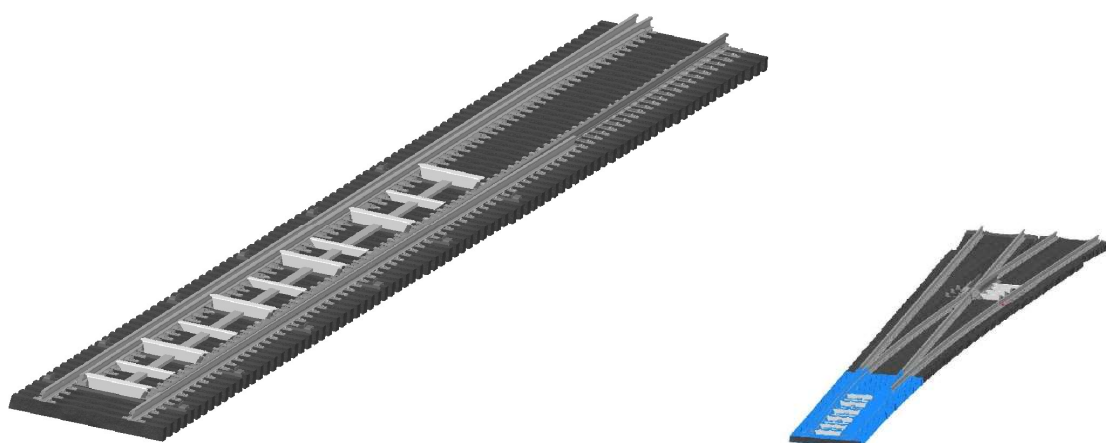
5.1.1 Vytvoření podkladu pro výpočtový model

Pro určení statické a dynamické odezvy byl sestaven 3D model celé výhybky tvaru J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS vč. úseku běžné koleje před a za výhybkou. Sestavení modelu bylo provedeno v 3D modelovacím softwaru Autodesk Inventor a následně byl model ještě upraven v sw. PTC Creo. Výhybka byla vymodelována velice podrobně vč. všech systémů upevnění. Byly zjednodušeně vymodelovány také

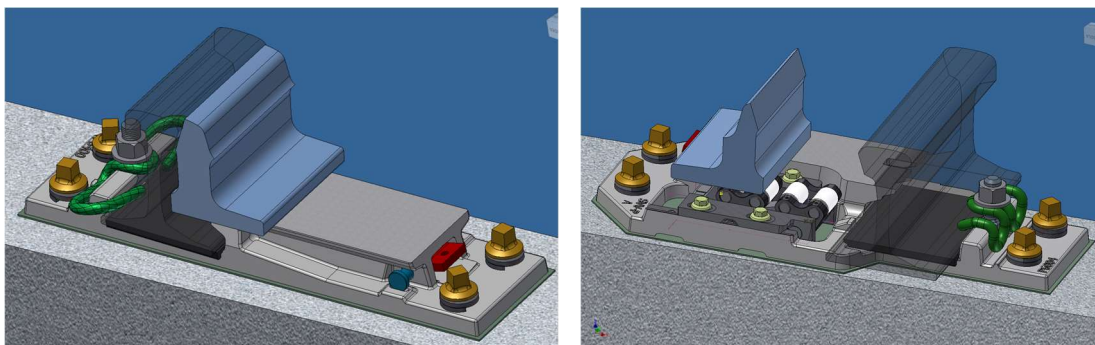
přestavné a závěrové systémy DTZ 6/3, které byly ale následně převedeny na soustředěné hmoty v těžišti zařízení a umístěny do příslušného místa na pražec. Výsledný 3D model vysokorychlostní výhybky je znázorněn na obr. 114 až obr. 120, které zobrazují jednotlivé části vysokorychlostní výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS. [127] Modelován byl rovněž úsek běžné koleje před a za výhybkou, a to konkrétně s pražci B 91 S/1 a upevněním Vossloh W 14 (svěrka Skl 14).

Z hlediska celého modelu jsou nejsložitější část srdcovková a část výměnová. Části střední (celkem dvě vzhledem k délce) a dodatky před a za výhybku nejsou z hlediska konstrukčního řešení významně odchylné od běžných výhybek. Konstrukční řešení všech systémů upevnění vychází z upevnění „KS“, tj. žebrová podkladnice s pružnými svěrkami od firmy Vossloh. Pod patami kolejnic jsou užity podložky pod patu kolejnice z pryže (typ R65) a upevnění podkladnice k pražci je provedeno standardním pražcovým šroubem s dvojitém pružným kroužkem.

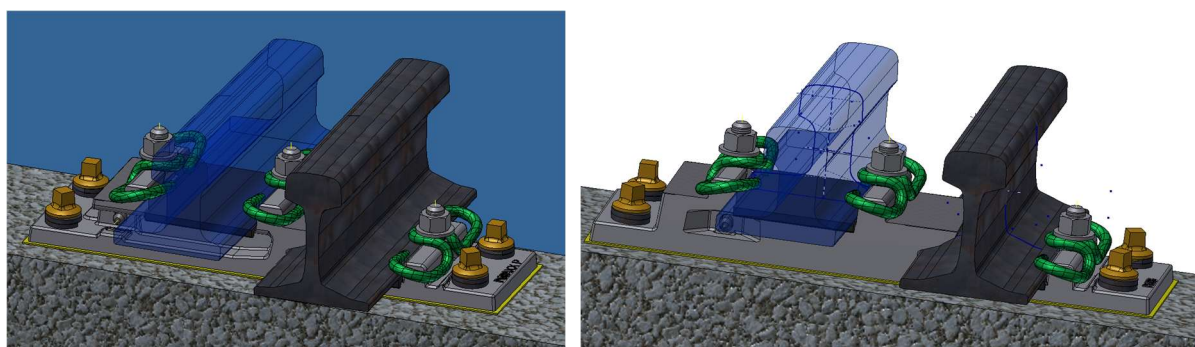
Ve výměnové části (obr. 114) jsou nejhojněji použity kluzné stoličky, a to obvyklé konstrukce s pérovou sponou (viz kap. 2.2.2 a obr. 34) v odlévaném provedení. Dále se vyskytují ve výměně také integrované válečkové stoličky typu SVV (viz obr. 115). Překování jazykové kolejnice na standardní širokopatný profil je až před koncem výměnové části výhybky (překování může být realizováno až tam, kde se vlezou paty obou kolejnic vedle sebe). Ohyb jazykové kolejnice je realizován přibližně ve třetině délky výměnové části od konce. Za ohybem v poslední třetině výměnové části proto již nejsou umístěny kluzné stoličky, ale tzv. patrové podkladnice, které umožňují upevnění jazykové kolejnice v plném profilu (viz obr. 116). Výměnová část dále obsahuje také jazykové opěrky, opěrky proti putování jazyka (celkem 3 ks na každé straně) a speciální prodloužené podkladnice pro přestavné a závěrové systémy.



Obr. 114 Zhotovený 3D model výměnové části výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor. V modelu jsou patrné i přestavné a závěrové systémy DTZ 6/3. [127]

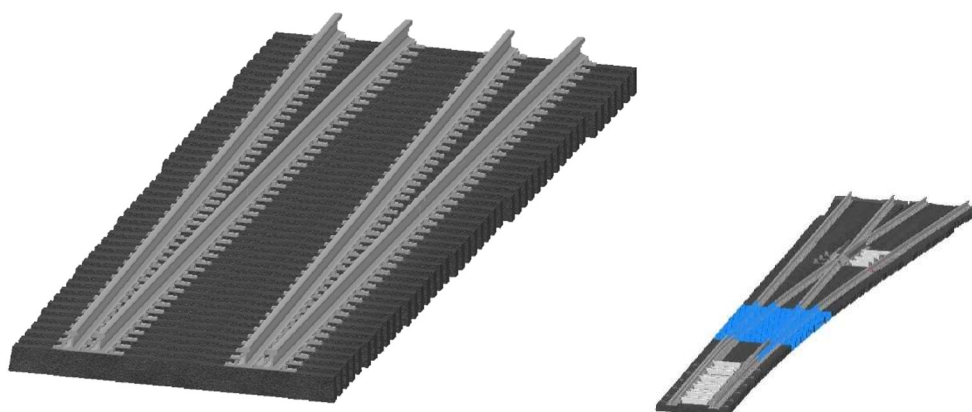


Obr. 115 Zhotovený 3D model kluzné stoličky P6000 a integrované válečkové stoličky SVV-PA.

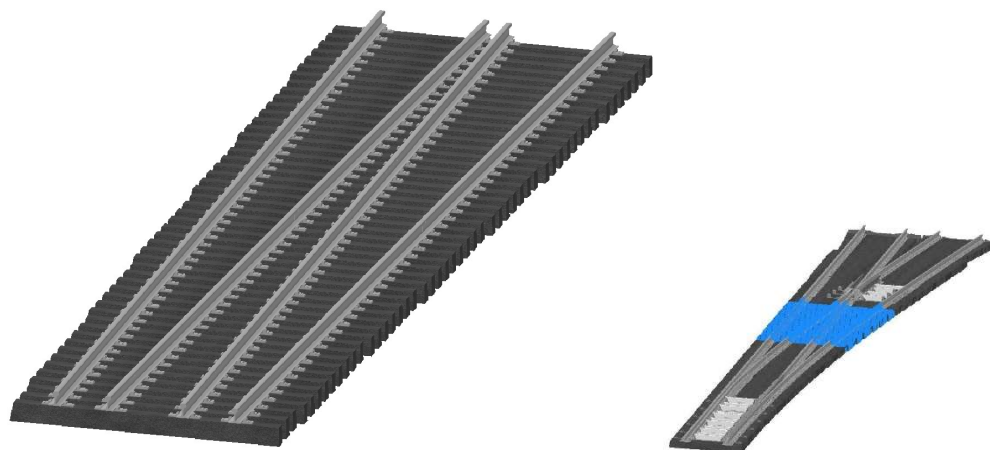


Obr. 116 Zhotovený 3D model patrové podkladnice P60A41 až P60A48 a P60B41 až P60B48.

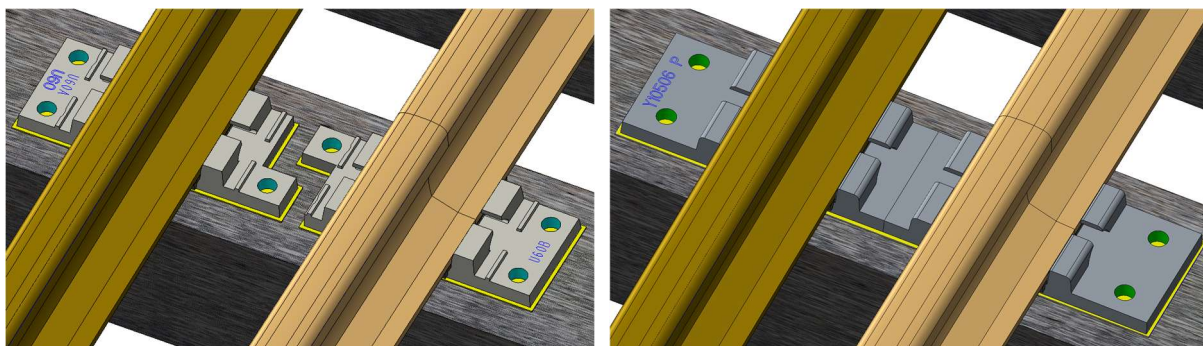
Ve středních částech výhybky (viz obr. 117 a obr. 118) jsou užity v zásadě standardní systémy upevnění typu „KS“. Pouze v místě sbíhajících se kolejnic jsou použity atypicky upravené podkladnice tak, aby se buď vešly vedle sebe celé podkladnice (viz obr. 119 vlevo) nebo v případě, že by byly podkladnice již tak blízko, že by nebylo možno upevnit podkladnice z vnitřní strany mezi kolejnicemi pomocí pražcových šroubů, použije se již jedna společná základová deska pro upevnění obou kolejnicových pásů s upevněním k pražci pouze vně (viz obr. 119 vpravo). Tyto úpravy se nacházejí jak u styku střední části s výměnovou částí (vnější kolejnice), tak u styku střední části se srdcovkovou částí (středové kolejnice).



Obr. 117 Zhotovený 3D model první střední části výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor. [127]



Obr. 118 Zhotovený 3D model druhé střední části výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor. [127]



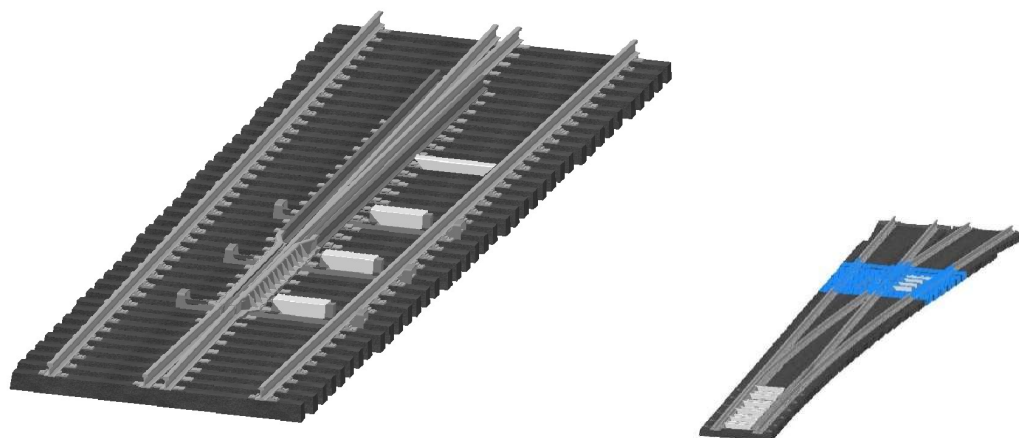
Obr. 119 Příklady atypických podkladnic střední části výhybky.

Srdcovková část výhybky (viz obr. 120) je pak v zásadě nejkomplikovanější částí celé výhybky, a to jak z pohledu konstrukce systémů upevnění, tak z pohledu výskytu dalších nezbytných konstrukčních prvků. Velice složitá je zejména konstrukce pohyblivé srdcovky v odlévaném rámu a řešení jejich systémů upevnění, jak je patrné z obr. 121 a obr. 122.

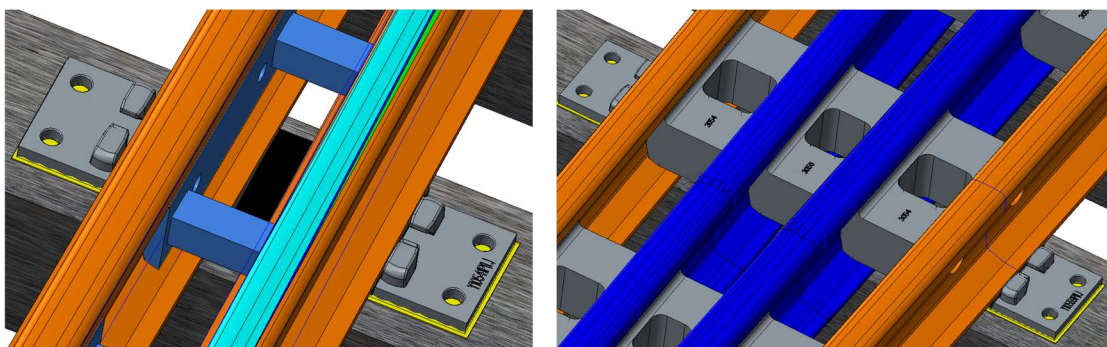
Srdcovka je konstruována s odlévaným rámem z bainitické oceli s přivařenými přípojnými kolejnicemi směrem ke střední části a s přivařenými křídlovými kolejnicemi standardního širokopatního profilu pokračujícími směrem ke konci výhybky. Krajní kolejnice jsou řešeny standardně bez použití přídržnic vzhledem k nepřerušené pojezděné hraně. Globálně upevnění vychází rovněž z upevnění „KS“ s tím, že v oblasti srdcovky bylo navrženo mnohem více atypických systémů upevnění, které se od výchozího upevnění „KS“ liší již významně.

V srdcovkové části se také vyskytuje několik dalších konstrukčních prvků. Z důvodu zajištění přenosu sil z bezstykové koleje jsou mezi křídlovými kolejnicemi a hrotem navrženo celkem 5 robustních vložek na každé straně hrotu. Za odlévaným rámem se pak také nacházejí hrotové opěrky zajišťující oporu hrotu při přestavení. Byly vymodelovány rovněž přestavné a závěrové systémy DTZ 6/3 včetně snímače

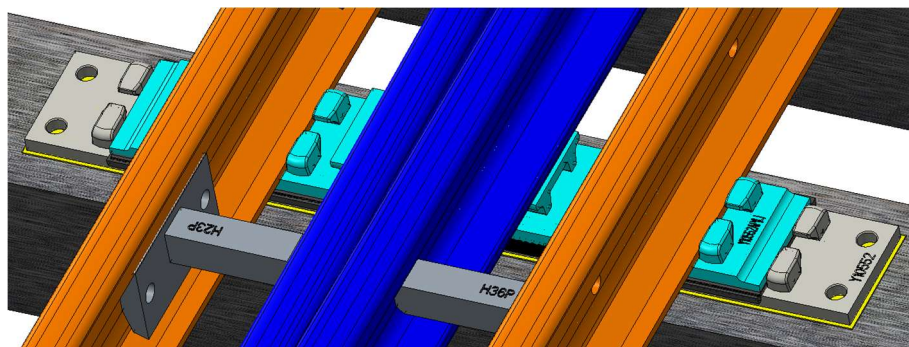
rozřezu, které byly následně do výpočtového modelu vloženy jako soustředěné hmotnosti do těžiště zařízení.



Obr. 120 Zhotovený 3D model srdcovkové části výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor včetně přestavných a závěrových systémů DTZ a snímače rozřezu. [127]



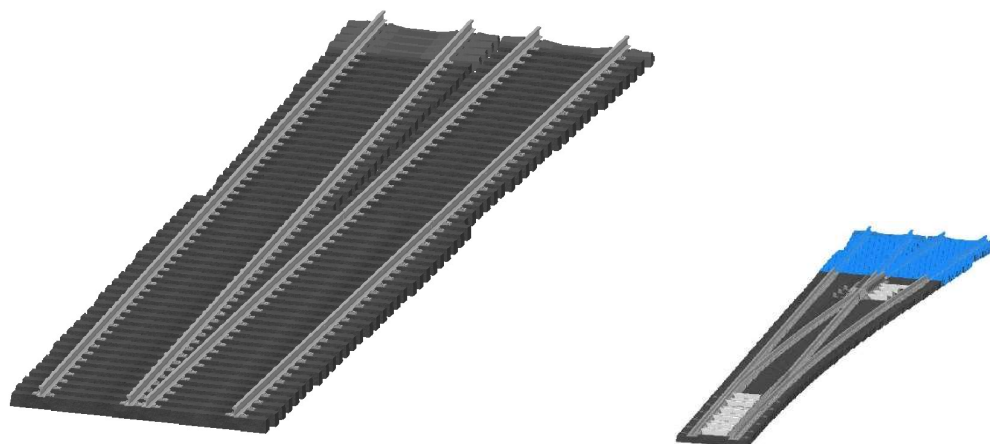
Obr. 121 Ilustrativní obrázek systémů upevnění před odléváním rámem PHS a za odléváním rámem PHS vč. patrných vložek.



Obr. 122 Ilustrativní obrázek systému upevnění za odléváním rámem PHS v místě pohybujícího se hrotu na kluzné desce vč. patrných hrotových opěrek.

Poslední modelovanou částí výhybky byla doplňující část za výhybkou se společnými pražci vč. přechodu na pražce běžné koleje B91S/1 (viz obr. 123). Konstrukční řešení dodatku odpovídá řešení středních částí, tedy jedná se v zásadě o standardní systémy upevnění typu „KS“, vč. atypických v místě začátku doplňující

části. Zde jsou navrženy atypicky upravené žebrové podkladnice tak, aby je bylo možno umístit vedle sebe.



Obr. 123 Zhotovený 3D model doplňující části (společné pražce a krátké výhybkové pražce) za výhybku J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor. [127]

Zhotovený 3D model byl nakonec vyexportován do souboru umožňujícího načtení do sw. ANSYS. Nezbytnou součástí modelu byl také detailní popis konstrukčního řešení včetně materiálového popisu jednotlivých prvků a všech komponentů systémů upevnění.

5.1.2 Vytvoření konečně prvkového modelu pro analýzu

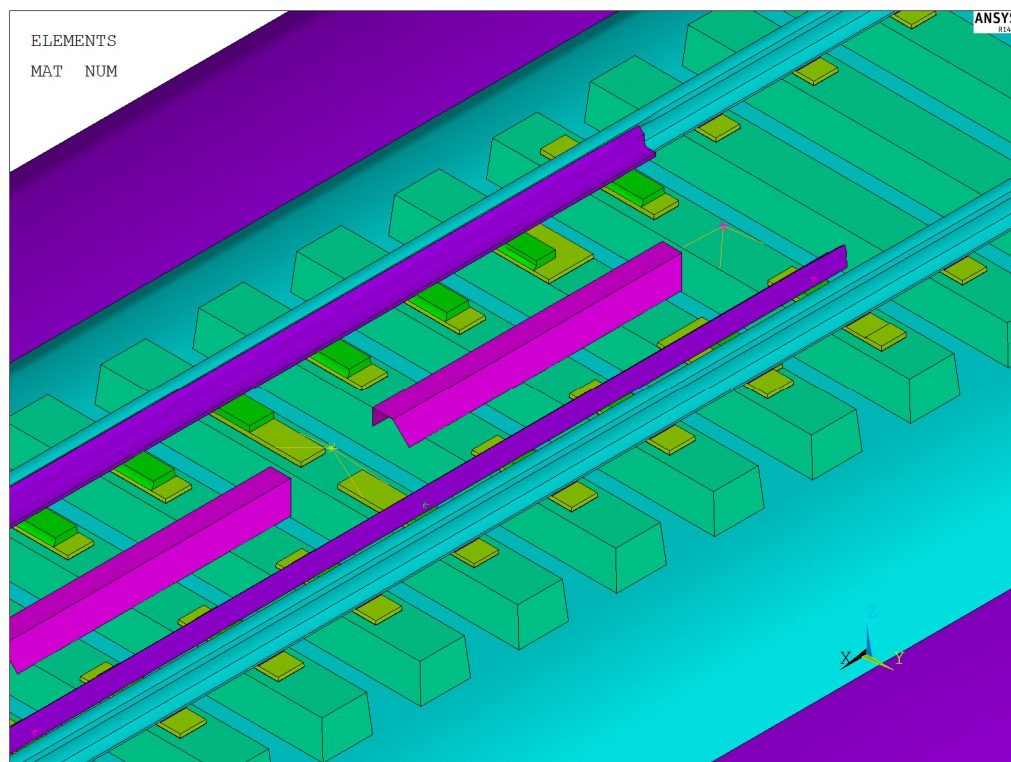
Na zpracování statické a dynamické odezvy se podílel zejména Ústav stavební mechaniky Fakulty stavební VUT v Brně²¹, se kterým bylo v této věci úzce spolupracováno. [128]

Zhotovený 3D model stávajícího konstrukčního řešení vysokorychlostní výhybky byl převeden do formátu ACIS, což je formát vhodný pro import do prostředí sw. ANSYS. Model uložený ve formátu ACIS zahrnuje trojrozměrné geometrické informace ve standardním formátu textového souboru. Soubory formátu SAT potom dále obsahují trojrozměrné geometrické informace o výhybce (objemy, plochy, křivky, body). [128]

Po importu do prostředí sw. ANSYS bylo provedeno zjednodušení detailně vymodelované výhybky (viz kap. 5.1.1) tak, aby bylo zajištěn při optimálním zjednodušení stále uspokojivý výsledek. Jedná se konkrétně o vyloučení a odstranění nepotřebných detailů v geometrii výhybky, tak aby byla snížena vytiženost a datová náročnost geometrického modelu. Způsob zjednodušení je patrný z následujícího obrázku (obr. 124), z něhož je patrné zejména zjednodušení tvaru systémů upevnění

²¹ doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.; prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.

(kvádry), energotunelu (spojovací prvek mezi jednotlivými závěry a snímači kontroly) a závěrů (bod patrný v oblasti přerušení energotunelu). [128]



Obr. 124 Ukázka zjednodušení oblasti začátku výhybky po importu do sw. ANSYS. [128]

Dále byly před samotným výpočtem provedeny úpravy spojené se zavedením vnitřních omezujících podmínek (spojení konstrukčních částí, modelování šroubů, svěrek a podružných detailů) a úpravy umožňující doplnit model o navazující části před a za výhybkou včetně nosných vrstev pod kolejovým roštem. [128]

Geometrický model výhybky včetně navazujícího úseku běžné koleje před a za výhybkou byl rozšířen o model vrstvy šterku kolejového lože a části zemního tělesa, kterým je simulována tuhost železničního spodku. V modelu je výhybka postavena do přímého směru. Pro modelování průjezdu vozidla odbočnou větví je zapotřebí model příslušným způsobem upravit ve výměnové a srdcovkové části. [128]

Orientace výpočtového modelu v prostoru sw. ANSYS je zvolena následujícím způsobem. Jedná se o pravotočivý systém souřadnic, kde osa x představuje osu pojížděné koleje hlavního dopravního směru (přímé větve), kladný směr je shodný se směrem simulovaného pojezdu, tzn. od začátku výhybky směrem ke konci výhybky. Osa y tvoří spolu s osou x půdorysnou plochu; přímá kolejnice (bude označována PKP) má kladné znaménko souřadnice y a k ní souběžná kolejnice (bude označována jako $|ZV;PV|$, $|PV;PS|$ a $|PS;KV|$, vysvětlení viz obr. 134) má záporné znaménko osy y . Kladná poloosa z směřuje vzhůru. Počátek systému souřadnic je zachován podle 3D

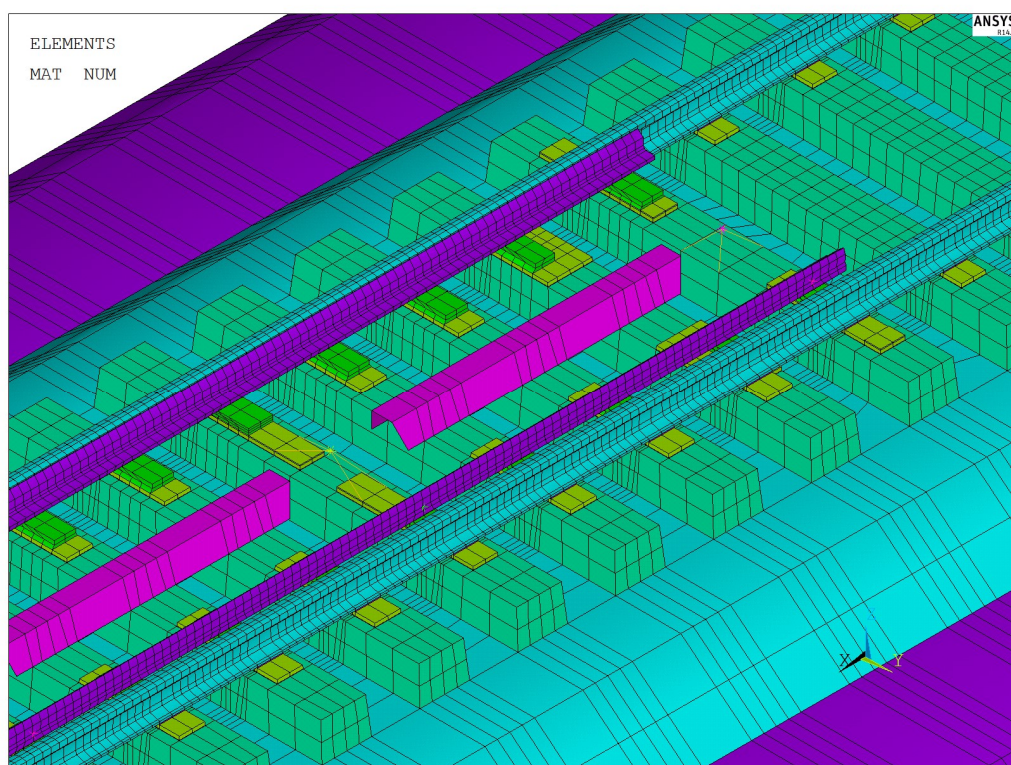
CAD modelu (viz kap. 5.1.1). Modelovaná jízdní dráha je v celkové délce 213,50 m. V systému souřadnic se jedná o interval $x = -144,44$ m až $x = 69,06$ m. Uvedeným souřadnicím odpovídá podélná osa koncových prážců kolejového roštu. Modelovaný kolejový rošt klasické kolejnice v přímé před výměnovou částí výhybky má délku 24,58 m (oblast x od $-144,44$ m po $-119,86$ m). Za srdcovkou částí výhybky je kolejový rošt dlouhý 23,99 m (oblast $x = 45,07$ m po $x = 69,06$ m). V oblasti $x = -119,26$ m až $x = 44,47$ m jsou průběžné kolejnice upevněny na výhybkové pražce. Dále lze ještě uvést souřadnici významných bodů výhybky, hrot jazyka je v souřadnici $x = -114,66$ m a hrana pohyblivého hrotu srdcovky je na souřadnici $x = -3,265$ m. [128]

5.1.3 Postup určení statické a dynamické odezvy

V této podkapitole jsou zmíněny stěžejní informace k použitým konečným prvkům při výpočtovém modelování, dále informace ke způsobu modelování svěrek systémů upevnění a materiálových vlastností pružných prvků a rovněž informace ke způsobu modelování pražcového podloží výhybky.

5.1.3.1 Použití konečných prvků

Výpočtový model ve výsledku sestává z řady typů prvků v sw. ANSYS, označení typů prvků odpovídá tomuto systému [129, 130]. Prostorové části (kolejnice, srdcovka, jazyky, pražce, vrstvy pražcového podloží, některé ocelové části uložení a podložky pod patu kolejnice) jsou modelovány prostorovými čtyřuzlovými konečnými prvky typu *SOLID45*. Kryty energotunelu jsou modelovány stěnodeskovými prvky typu *SHELL181*. Svěrky upevnění jsou modelovány zjednodušeně pomocí prvků typu *COMBIN14*. Přídavné hmotnosti zastupující hydraulické závěry a přestavníky a moduly kontroly jsou modelovány soustředěnými hmotnostmi s využitím prvku typu *MASS21*. Tento prvek je uchycen pomocnými prutovými prvky *BEAM188* tak, aby poloha těžiště byla zachována. Pružné uložení zohledňující okolní části zemního tělesa je modelováno povrchovými prvky typu *SURF154*. Přenos sil z jazyka na kluzné stoličky je realizován prvky *LINK8*. Výpočtový model je tvořen celkem 700 313 prvky lokalizovanými 934 574 uzly. Řešená soustava má 2 672 690 stupňů volnosti. Ukázka výpočtového modelu s vytvořenou sítí konečných prvků je na následujícím obr. 125. [128]



Obr. 125 Ukázka výpočtového modelu s vytvořenou sítí konečných prvků v oblasti začátku výhybky.
[128]

5.1.3.2 Modelování svěrek a použité materiálové modely

Upevnění kolejnic k pražcům je realizováno pomocí pružných svěrek typu Vossloh (mimo pérové spony v kluzné stoličce, které jsou konstrukce DT). Tuhostní charakteristiky svěrek jsou definovány pracovními diagramy. Převážně se jedná o bilineární závislost síly na posunutí. Konkrétně byly použity následující svěrky a upevňovadla s příslušnými charakteristikami:

- svěrka Skl 24 (tuhost svěrky $k_{Sk124} = 0,625 \text{ MN.m}^{-1}$, síla ve svěrce 10 kN); nejběžnější standardní svěrka v rámci celé výhybky;
- svěrka Skl 12 (tuhost svěrky $k_{Sk112} = 0,87 \text{ MN.m}^{-1}$, síla ve svěrce 10 kN) je běžně použita pro upevnění k přídržnici, konkrétně ve VR výhybce je užita v místech, kde se konstrukčně nevleze svěrka Skl 24;
- kalibrované pérové spony u kluzných stoliček (tuhost $k_{ps} = 8,333 \text{ MN.m}^{-1}$, síla ve svěrce -10 kN);
- svěrka Skl 14 (tuhost $k_{Sk114} = 0,769 \text{ MN.m}^{-1}$, síla ve svěrce 10 kN). Tato svěrka se vyskytuje v upevnění běžné koleje, kde je upevnění Vossloh W14 na pražcích B 91 S/1.
- pružný kroužek Fe 6 na vrtulích (tuhost $k = 25 \text{ MN.m}^{-1}$).

Modelování svěrek je provedeno pomocí náhradních prvků mající svislou tuhost. Převážně jsou svěrky modelovány třemi prvky typu COMBIN14, pérové spony

v kluzné stoličce jedním prvkem. Použitý prvek umožňuje zadat osovou tuhost a počáteční sílu v prvku.

Důležitým prvkem, který má vliv na výpočet tuhosti jízdní dráhy ve výhybce jsou také pružné podložky pod patu kolejnice. Výhodou pro zadání parametrů byly již nabyté zkušenosti z předchozího výpočtového modelování při řešení standardní koridorové výhybky [44, 131, 132]. Tuhostní vlastnosti podložek byly převzaty z dostupných materiálů a laboratorních zkoušek. Parametry podložek R65 a WU-7 jsou uvedeny v tab. 18. Materiálem obou typů podložek je pryž, která se vyznačuje nelineárním chováním. Laboratorními zkouškami lze ověřit svislou tuhost podložek v závislosti na rychlosti zatěžování. Tím je pak dána statická a dynamická tuhost podložek (laboratorní zkoušky viz dále kap. 6).

Tab. 18 Tuhostní vlastnosti pryžových podložek.

Typ podložky	R65 (Renogum)	WU-7 (Rubena)
Statická tuhost k_{stat}	88,38 kN.mm ⁻¹	56 kN.mm ⁻¹
$k_{\text{dyn}} / k_{\text{stat}}$	2,41	3,16
Dynamická tuhost k_{dyn}	213,00 kN.mm ⁻¹	176,96 kN.mm ⁻¹

Ve výpočtovém modelu jsou podložky modelovány prostorovými prvky s izotropními materiálovými vlastnostmi. Svislá tuhost byla přepočítána na modul pružnosti, viz tab. 19, přičemž součinitel příčné kontrakce ν u podložek R65, WU-7 a podložek z Penefolu je zanedbán (je téměř roven nule). Z tabulky je patrné, že u používaných podložek je značný rozdíl mezi dynamickou a statickou tuhostí. Uvedený poměr v tuhostech je v souladu s provedenými zkouškami. [128]

Tab. 19 Materiálové vlastnosti podložek zadané v modelu.

Typ podložky	R65 (Renogum)	WU-7 (Rubena)	Penefol 900
Modul pružnosti E_{stat}	23,570 MPa	13,822 MPa	0,8 GPa
$k_{\text{dyn}} / k_{\text{sta}}$	2,41	3,16	1
Modul pružnosti E_{dyn}	56,804 MPa	43,678 MPa	0,8 GPa
Spec. hmotnost ρ	1400 kg.m ⁻³	1400 kg.m ⁻³	930 kg.m ⁻³

Výhybkové pražce a pražce B 91 S jsou vyrobeny z předpjatého betonu. Ve výpočtovém modelu se materiál betonu modeluje jako lineární izotropní bez zahrnutí předpětí v pražcích. Předpokládá se, že pražec je vyroben z betonu třídy C50/60. Tomuto betonu s výztuží odpovídá sečný modul pružnosti $E_{\text{cm}} = 37$ GPa, součinitel příčné kontrakce $\nu_c = 0,20$ a specifická hmotnost $\rho_c = 2500$ kg.m⁻³. Ve výpočtu byl sečný modul mírně zvětšen na hodnotu $E_{\text{cmdyn}} = 39$ GPa. [128]

5.1.3.3 Uložení kolejového roštu a okrajové podmínky

Důležitou součástí modelu není jen výhybka jako taková, ale v případě zkoumání tuhosti jízdní dráhy musí být správně popsáno a vymodelováno pražcové podloží, tedy šterk kolejového lože, konstrukční vrstva a zemní těleso. Model uložení kolejnicového roštu tedy sestává konkrétně ze tří lineárně pružných nehmotných vrstev. Tuhost každé vrstvy je stanovena tak, aby pokles paty kolejnice byl v předepsaných mezích (viz kap. 2.1.4). Ve výpočtu se uvažuje hodnota 1,5 mm pokles paty kolejnice v oblasti běžného uspořádání koleje nad krátkým výhybkovým pražcem od působící kolové síly 112,5 kN při uvážení statických tuhostí podložek. Horní vrstva pražcového podloží je šterkové kolejové lože tl. 350 mm. Ta je charakterizována modulem pružnosti $E = 160$ MPa a součinitelem příčné kontrakce $\nu = 0,35$. Střední vrstva tl. 200 mm, tedy vrstva zastupující konstrukční vrstva, je charakterizována modulem pružnosti $E = 600$ MPa a součinitelem příčné kontrakce $\nu = 0,45$. Spodní vrstva (zemní těleso) je uvažována v tloušťce 1 m a je popsána modulem pružnosti $E = 360$ MPa a součinitelem příčné kontrakce $\nu = 0,35$. Hodnoty modulů charakterizují tuhost při dynamickém namáhání kolejové trati a jsou voleny tak, aby relativní zatlačení při pojezdu odpovídalo reálným hodnotám. Spodní dvě vrstvy jsou na vnějších stranách překryty pružnými plošnými prvky zohledňující tuhost okolního prostředí. Hodnoty tuhosti řídí pokles modelu železniční koleje. Ve výpočtech horizontálně umístěné povrchové prvky mají tuhost vyjádřenou součinitelem $k_{Wver} = 5$ MPa.m⁻¹ a podél svisle umístěné prvky mají tuhost $k_{Whor} = 0,5$ MPa.m⁻¹. Pokles kolejového roštu je dále ovlivněn volbou zavedení vodorovných vazeb v uzlech povrchových prvků na spodní ploše modelu zemního tělesa. Toto dovoluje snížit počet stupňů volnosti. [128]

5.1.3.4 Postup výpočtu statické odezvy

Při statické analýze je potřeba získat příčinkovou čáru svislého posunutí hlav kolejnic, po kterých se předpokládá pojezd vozidla. Hledá se statická odezva pro zatížení jednou nápravou s kolovými silami 112,5 kN. Síla odpovídá hmotnosti čtyřnápravového vozidla 90 t při uvážení gravitačního zrychlení 10 m.s⁻². Řešení vyžaduje provést výpočty dvou zatěžovacích stavů. V prvním zatěžovacím stavu se řeší statická odezva od působení vlastní tíhy kolejového roštu a působících sil ve svérkách uzlů upevnění. V druhém zatěžovacím stavu k těmto silám přistupuje zatížení kolovými silami. Každá kolová síla je zadána diskrétními hodnotami dvou sil působících v uzlech na hlavě kolejnice. Vzhledem k tomu, že uvedený výpočet je lineární, potom výsledný hledaný průhyb od působících kolových sil lze získat z rozdílu odezev druhého zatěžovacího stavu a prvního zatěžovacího stavu. Vzhledem k značným rozdílům v tuhostech podložek při statickém a dynamickém zatížení je nutno uvedený výpočet provést pro oba případy tuhosti podložek. Řešení

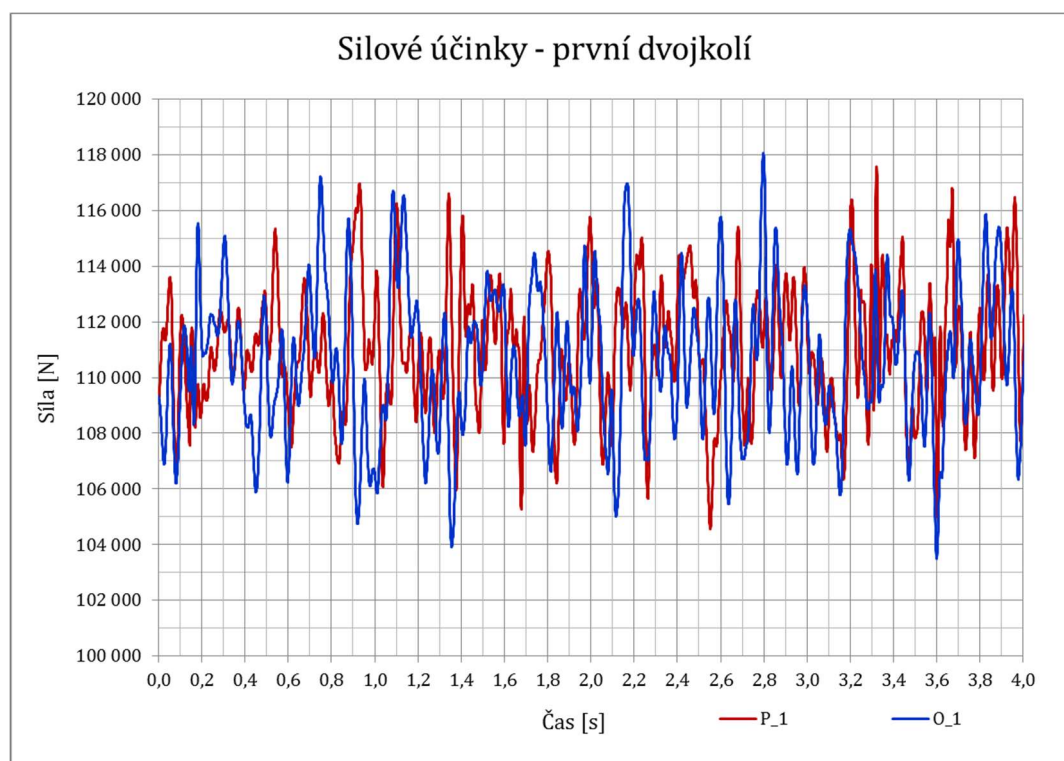
s podločkami s tuhostmi odpovídajícími statickému zatížení je potřebné pro naladění tuhosti nejnižší podkladní vrstvy železničního spodku. Řešení s podločkami s tuhostmi odpovídajícími dynamickému zatížení je podkladem pro následné určení interaktivních silových účinků mezi vozidlem a kolejí. [128]

Výpočet je opakován v závislosti na rozsahu modelu. Kolové síly nejsou umísťované do všech možných míst podél koleje, ale pouze v místech nad jednotlivými pražci. I tak je třeba řešit 1 + 354 zatěžovacích stavů pro oba případy tuhosti podloček. Kolové síly jsou postupně přikládány ve svislém směru na temeno hlavy (na dva uzly modelu). V polohách odpovídajících průjezdu v oblasti jazyka, jsou síly poměrově přikládány na jazyk a kolejnici v závislosti na teoretické poloze kola vůči kolejnici. [128]

5.1.3.5 Postup výpočtu dynamické odezvy

Pro výpočet dynamické odezvy bylo do úlohy zavedeno vozidlo následujícím způsobem. Na UPCE²² byly dodány jako podklad výsledky statické odezvy výhybky (tuhost jízdní dráhy vyjádřená průhybem). Dále bylo zvoleno vozidlo, které bude simulačně výhybkou projíždět, konkrétně šlo o lokomotivu řady 380 dopravce ČD (hmotnost 90 t). Bylo potřeba také zavést do simulace nerovnosti jízdní dráhy vznikající provozem. Jako vstup z hlediska nerovností posloužila dříve měřená data z průjezdu přes dosud nejštíhlejší vloženou výhybku č. 3 v žst. Poříčany (tvar J60-1:26,5-2500-PHS). Nerovnosti byly přizpůsobeny délce výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS. Pro průjezd byla uvažována konstantní rychlost 160 km.h⁻¹. S výše uvedenými vstupy byl proveden simulační výpočet, jehož výsledkem byl průběh sil při průjezdu výhybkou pro všechna 4 dvojkolí simulované lokomotivy (ilustrativně pro první dvojkolí viz obr. 126).

²² doc. Ing. Jaromír Zelenka, CSc.



Obr. 126 Budící síly od prvního dvojkolí během průjezdu vozidla výhybkou. Křivka P_1 je kolejnicový pás jdoucí přímou opornicí, O_1 je kolejnicový pás jdoucí přímým jazykem a přes srdcovku. [128]

Výpočet byl proveden přímou integrací pohybových rovnic. V každém časovém kroku výpočtu byly vnášeny síly od osmi kol s časovým přírůstkem odpovídajícím změně polohy o 50 mm v kladném směru osy x . Při tvorbě modelu pojížděných částí byla tímto predikována vzdálenost uzlů a tím i velikost prvků ve směru globální osy x . Byla snaha dodržet co nejvěrněji uvedenou vzdálenost. Roznos sil v oblastech přechodu kola z opornice na jazyk a z křídlové kolejnice (resp. z rámu PHS) na pohyblivý hrot byl zohledněn lineárním náběhem (popis lineárního řešení přechodu podrobněji viz 5.2.1.2). Výpočet odpovídá dynamickým tuhostem podložek.

Dynamický výpočet byl řešen v 4 000 časových okamžicích v absolutních souřadnicích. To znamená, že při řešení je zahrnut vliv dynamiky včetně statického zatížení. Pro získání „čisté“ dynamické odezvy je možné v případě lineárního výpočtu odečíst statickou odezvu včetně staticky působících kolových sil od celkové odezvy. Tím je pak získán výsledný hledaný průhyb pouze od působících dynamických složek kolových sil.

5.1.4 Předběžný variantní návrh konstrukčního řešení zpružnění

V kap. 5.1.1 byl popsán stávající stav konstrukčního zpracování výhybky, který nijak nereflektuje změny v tuhosti jízdní dráhy (viz kap. 2.1.8 a dále výsledky v kap. 5.2). Po získání výsledků výpočtového modelování stávajícího stavu je tedy potřeba navrhnout předběžný způsob zpružnění v systému upevnění, které bude vstupovat

do další fáze výpočtového modelování s upravenými systémy upevnění. Hlavní inspirací pro návrh zpružnění byla provedená rešerše způsobů zpružnění (viz kap. 2.2 a 2.3) se zohledněním výsledků vyhodnocení zkušebního úseku s výhybkami se zpružněním v žst. Ústí nad Orlicí (viz kap. 4.3). Byly tedy navrženy následující způsoby zpružnění typických uzlů upevnění ve vysokorychlostní výhybce.

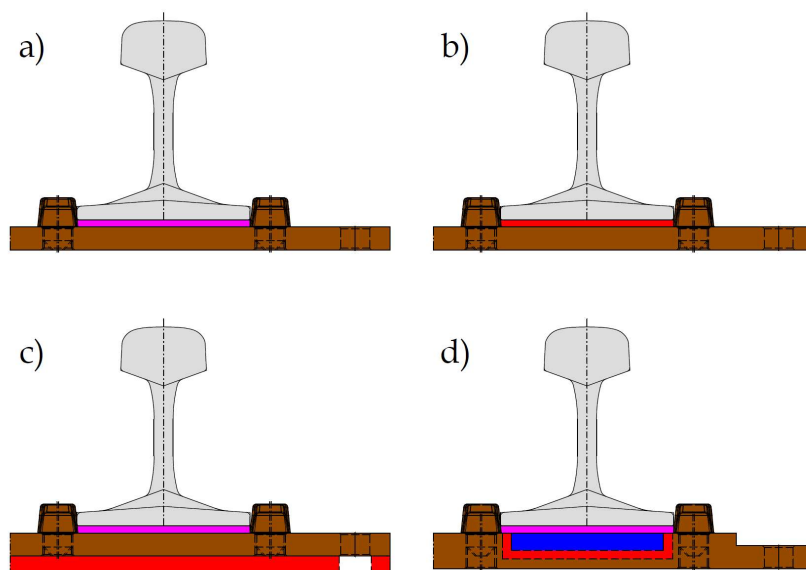
Ve **výměnové části** bude použita již navržená zpružněná kluzná stolička typu KSN20, která se osvědčila v provozu v žst. Ústí nad Orlicí. Vzhledem k tomu, že není navržena integrovaná válečková stolička se zpružněním kluzné plochy (resp. je otázkou, zda by z hlediska správné funkce válečkového zařízení bylo zpružnění vůbec možné navrhnout), jsou v celé oblasti kluzných stoliček uvažovány pouze kluzné stoličky standardní bez válečkových stoliček SVV-PA. Pro účely této práce se předpokládá, že by byly následně použity místo integrovaných válečkových stoliček válečkové stoličky mezipražcové, což je ekvivalentní řešení. Podložka pod opornici, resp. pod kluznou plochu, se uvažuje ve stejné tloušťce jako v případě návrhu pro konvenční výhybky. Výpočtem druhé fáze bude tedy laděna pouze potřebná tuhost (resp. modul pružnosti) podložky v tomto systému upevnění.

Ve **střední části** se nepředpokládá žádná významná změna v konstrukčním řešení systémů upevnění, v případě potřeby modifikace tuhosti lze zaměnit stávající podložku pod patu kolejnice, která je užita pryžová, za podložku z nějakého modernějšího materiálu (jako např. Cellentic® nebo Sylodyn®, viz kap. 2.4).

Nejproblematictější z celé výměnové části se jeví **srdcovková část** výhybky, a to z hlediska komplikovaného řešení systémů upevnění, které bylo nastíněno v kap. 5.1.1. Pro přehlednost návrhu byly systémy upevnění v srdcovkové části rozděleny do tzv. typických uzlů upevnění, které vykazují velkou konstrukční podobnost a liší se pouze např. polohou kolejnice nebo vzdálenostmi mezi žebry.

Obecně bylo uvažováno s následujícími možnostmi zpružnění napříč všemi typickými uzly upevnění, což je demonstrováno na standardním systému upevnění „KS“, viz obr. 127. Upevnění a) reprezentuje stávající způsob, kde jediným zpružňujícím prvkem je podložka pod patu kolejnice. Upevnění b) potom reprezentuje nejjednodušší možný způsob modifikace zpružnění takový, že dojde k prosté náhradě podložky pod patu kolejnice za jinou podložku o potřebné tuhosti. Upevnění c) potom vychází ze systémů upevnění používaných pro pevnou jízdní dráhu, viz např. kap. 2.3.1, kde je popis upevnění Vossloh 336. Jedná se o zpružnění podložkou pod podkladnicí. Tento způsob upevnění ale vyžaduje speciální uchycení podkladnice tak, aby bylo zajištěno stálé předpětí mezi pražcovým šroubem a horní plochou podkladnice. Způsob d) pak vychází zcela přesně z návrhu zpružnění použitého na

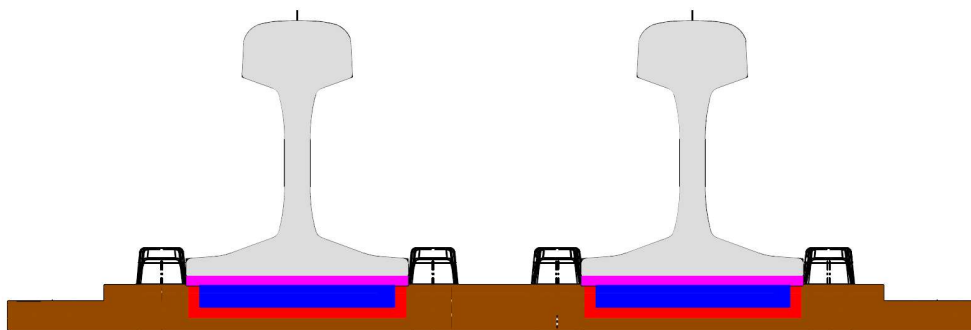
zpružněných konvenčních výhybkách provozně ověřovaných v žst. Ústí nad Orlicí, podrobně viz kap. 2.2.2.



Obr. 127 Demonstrace možných způsobu zpružnění – pružné prvky znázorněny fialově (běžně používaná pryžová podložka) a červeně (podložka s optimalizovanou tuhostí).

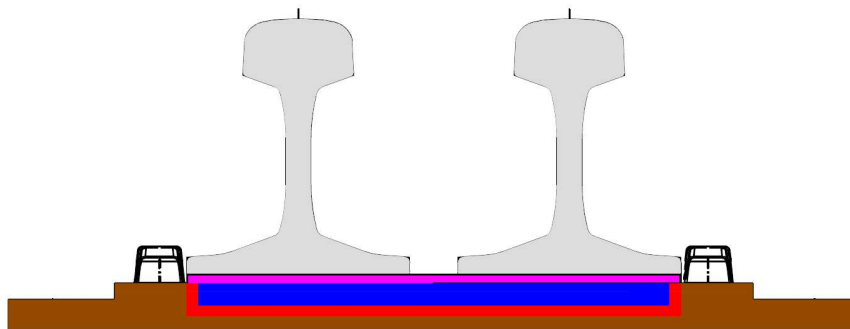
Na základě rešerše a odborné diskuze byly nakonec vybrány následující způsoby zpružnění pro jednotlivé typické uzly upevnění v oblasti srdcovky, které dále vstupovaly do výpočtu. Byla snaha zachovat konzistenci s řešením použitým u konvenčních výhybek, do modelu bylo tedy tam, kde to bylo možné, použito řešení dle systému upevnění UNO3718 (viz kap. 2.2.2), tj. dle výše uvedeného obrázku způsob d). Tloušťka podložky byla uvažována 8 mm.

V **typickém uzlu upevnění č. 1** je navržen způsob zpružnění dle uzlů upevnění pod srdcovku výhybky J60-1:12-500, tj. dle varianty d). Hlavním zpružňujícím prvkem je rozvinutelná podložka s roznášecí deskou. Jedná se o uzly upevnění na pražcích 19-182 až 19-185 a 19-217 až 19-220. Skladba je patrná z obrázku níže.



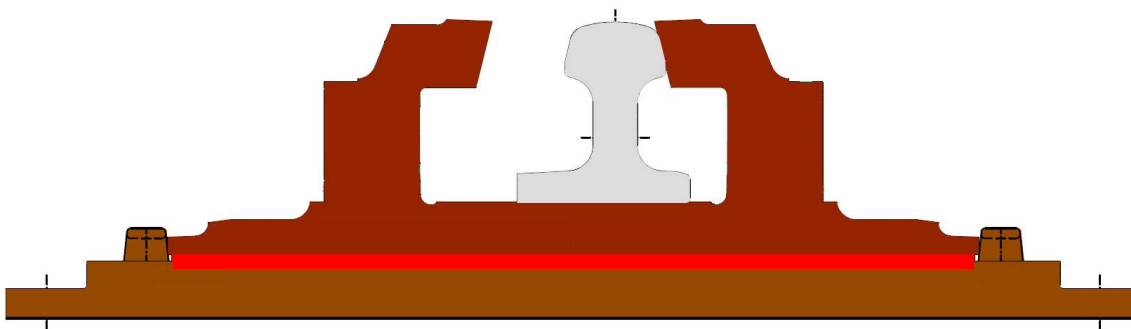
Obr. 128 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 1.

V **typickém uzlu upevnění č. 2** je navržen způsob zpružnění dle uzlů upevnění pod srdcovku výhybky J60-1:12-500, tj. dle varianty d). Hlavním zpružňujícím prvkem je rozvinutelná podložka s roznášecí deskou. Jedná se uzly upevnění na pražcích 19-186 až 19-190. Skladba je patrná z obrázku níže, modifikace je v zásadě pouze v tom, že roznášecí deska je společná pro oba kolejnicové pásy.



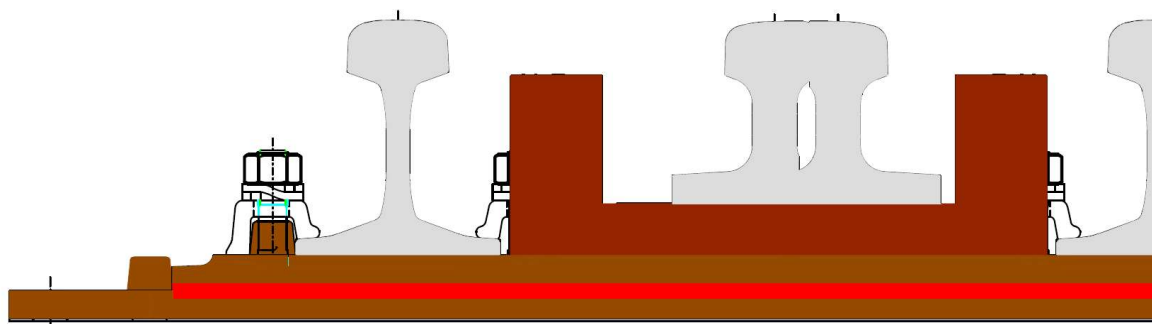
Obr. 129 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 2.

V **typickém uzlu upevnění č. 3** se uvažuje způsob zpružnění zjednodušený oproti variantě zpružnění výhybky J60-1:12-500. Předpokládá se dostatečně tuhá deska spočívající na pružné podložce. To znamená, že v tomto způsobu zpružnění se již nebude vyskytovat ocelová roznášecí deska. Jedná se o uzly upevnění na pražcích 19-191 až 19-197. Umístění podložky je patrné z obrázku níže. Zde je uvažováno použití podložky o tloušťce 8 mm, pro zachování stejné konstrukční výšky systému upevnění se předpokládá vytvoření zahluubení na úložné ploše podkladnice.



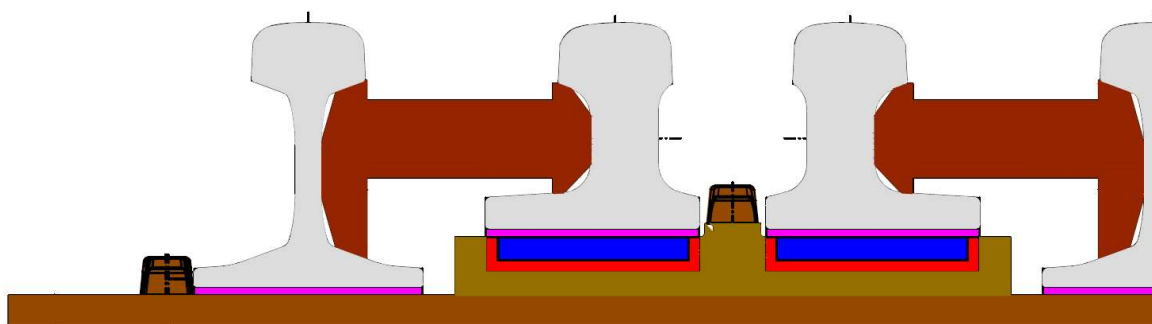
Obr. 130 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 3.

V **typickém uzlu upevnění č. 4** se uvažuje opět způsob zpružnění zjednodušený oproti variantě zpružnění výhybky J60-1:12-500. V uzlu upevnění se uvažuje opět dostatečně tuhá deska spočívající na pružné podložce. Použití ocelové roznášecí desky tímto ztrácí smysl. Jedná se o uzly upevnění na pražcích 19-198 až 19-210. Jednotlivé vrstvy jsou patrné z obrázku níže.



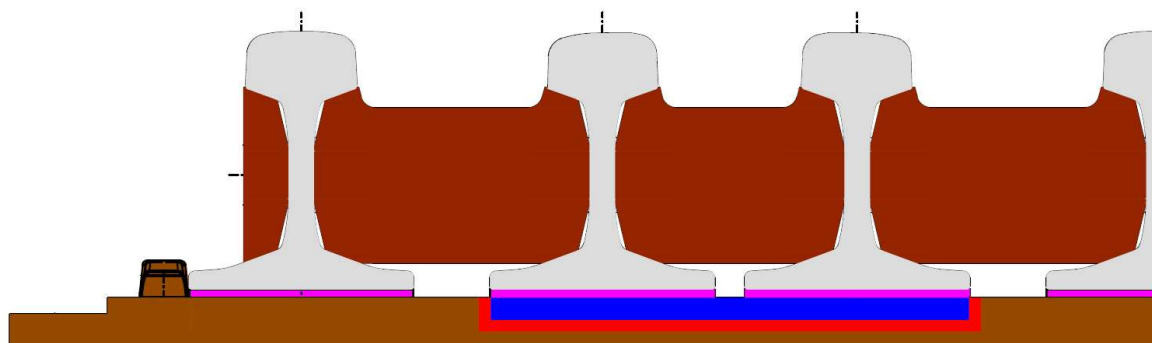
Obr. 131 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 4.

Typický uzel upevnění č. 5 je pouze na jediném pražci, a to na pražci 19-211. Jedná se o první uzel upevnění, ve kterém je hrot PHS pevně uchycen v příčném směru. Předpokládá se aplikace zpružnění ze zpružněné výhybky J60-1:12-500 pod jazykovými kolejnicemi. Předpokladem, aby tento uzel upevnění fungoval, je dostatečná poddajnost ocelových vložek.



Obr. 132 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 5.

V **typickém uzlu upevnění č. 6** je aplikován způsob zpružnění ze zpružněné výhybky J60-1:12-500. Je potřeba prověřit, zda ocelové vložky zajišťující příčnou polohu kolejnice, jsou dostatečně ve svislém směru poddajné, aby zpružnění mohlo být pouze pod středovými pojížděnými kolejnicemi (krajní křídlové kolejnice jsou nepojížděné). V opačném případě by musely být zpružněny všechny 4 kolejnicové pásy. Skladba je patrná z následujícího obrázku.



Obr. 133 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 6.

5.1.5 Úpravy na výpočtovém modelu se zahrnutím zpružnění

Výše uvedené systémy upevnění byly následně implementovány do modelu vysokorychlostní výhybky se zpružněním. U výše uvedených systémů upevnění nebyly vytvořeny nové 3D modely, zpružnění bylo vymodelováno přímo v sw. ANSYS zjednodušeně.

U všech ostatních systémů upevnění mimo kluznou stoličku (kde byla použita zpružená KSN20) bylo zpružnění zohledněno změnou tuhosti stávající pružné podložky tloušťky 6 mm. Při modelování výhybky byly některé části zjednodušeny, popřípadě nebyly modelovány. Výpočtový model je tvořen 710 006 prvky lokalizovanými 946 385 uzly. Řešená soustava má 2 847 304 stupňů volnosti. [133]

Nejprve byl tedy proveden výpočet na stávající výhybce bez zpružnění, výsledky jsou uvedeny v následující kapitole 5.2. Výše uvedený předběžný návrh zpružnění v systémech upevnění vysokorychlostní výhybky byl následně použit při druhé fázi výpočtu na zpružené výhybce vč. optimalizace tuhosti podložek. Výsledky výpočtu druhé fáze vč. finální diskuze nad výsledným konstrukčním řešením jsou rovněž uvedeny v následující kap. 5.2 Dosažené výsledky.

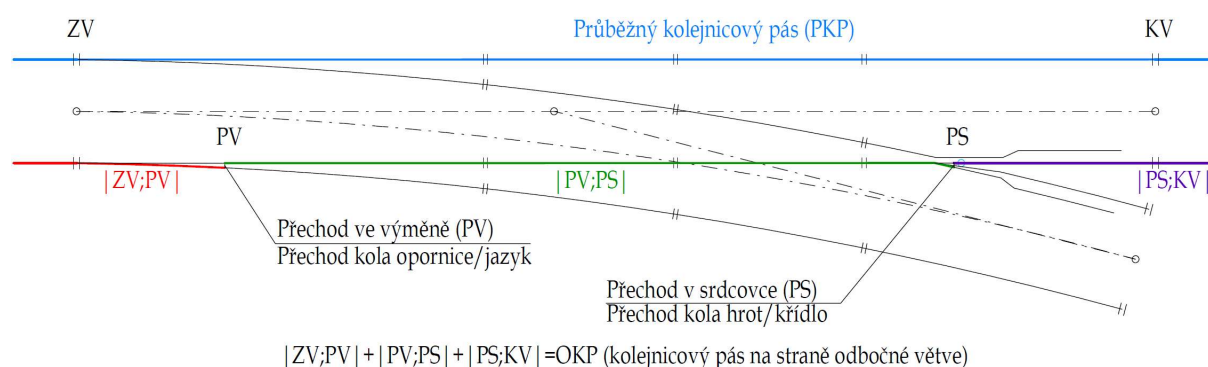
5.2 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

V předcházející kapitole 5.1 Metodika zpracování byl průřezově popsán celkový postup výpočtového modelování za účelem zjištění tuhosti kolejové jízdní dráhy ve vysokorychlostní výhybce. Prvním krokem bylo vytvoření 3D modelu výhybky, následovalo převedení do sw. ANSYS, kde byl vytvořen geometrický model, pak proběhly činnosti samotného výpočtového modelování a následně bylo navrženo zpružnění, které bylo zpětně implementováno do výpočtového modelu.

Výsledky z výpočtového modelování, tj. tuhosti kolejové jízdní dráhy, jsou v zásadě tedy dvojí. Nejprve byl spočítán stav původní výhybky bez navrženého zpružnění a následoval výpočet s navrženým zpružněním. Naprosto zásadními výsledky jsou grafy tuhosti kolejové jízdní dráhy těchto dvou případů, které jsou uvedeny v této kapitole. Tuhost jízdní dráhy je v těchto grafech vyjádřena poklesovou křivkou hlavy kolejnice obdobným způsobem, jako tomu bylo v případech dříve v rámci standardních výhybek, viz rešerše obr. 18 a obr. 19. Mimoto jsou v této kapitole okrajově uvedeny také 3D zobrazení výsledků výpočtového modelování.

Stěžejním výsledkem této kapitoly je konkrétní návrh zpružnění, který popisuje použití podložek o konkrétních charakteristikách do vybraných systémů upevnění vysokorychlostní výhybky.

Pro výsledky tuhosti podél výhybky je v rámci celé kapitoly použita konvence dle obrázku níže (obr. 134). Zde uvedené grafy budou vyjadřovat tuhost jízdní dráhy pouze přímým směrem výhybky. Modře je znázorňován průběžný kolejnicový pás (PKP), tj. přímá opornice a kolejnice protilehlá srdcovce. Červeně, zeleně a fialově jsou pak znázorněny příslušné úseky kolejnicového pásu protilehlé k modrému kolejnicovému pásu. Červeně je konkrétně uveden první úsek od úseku koleje před výhybkou a část ohnuté opornice do místa přechodu kola z opornice na jazyk (tj. „PV“ – přechod výměna). Pokračuje zelený kolejnicový pás od přechodu ve výměně dále po přímém jazyku, středové kolejnice až po místo přechodu kola z hrotu na křídlovou kolejnici v srdcovce PHS (tj. po bod „PS“ – přechod srdcovka). Posledním úsekem je fialová křivka, která reprezentuje kolejnicový pás od přechodu v srdcovce po bod konec výhybky a dále za výhybku.



Obr. 134 Barevné označení kolejnicových pásů použité v následujících grafech.

5.2.1 Výsledky výpočtu na výhybce se stávajícími systémy upevnění

U výsledků výhybky stávajícího provedení bez zpružnění jsou výsledky rozděleny do dvou částí. V první části jsou okomentovány výsledky výpočtového modelování statické odezvy z hlediska výstupů sw. ANSYS. Následuje komentář ke grafům tuhosti kolejové jízdní dráhy. Poslední částí je komentář k dynamické odezvě a její implementace do výpočtového modelu.

5.2.1.1 Výsledky výpočtu statické odezvy

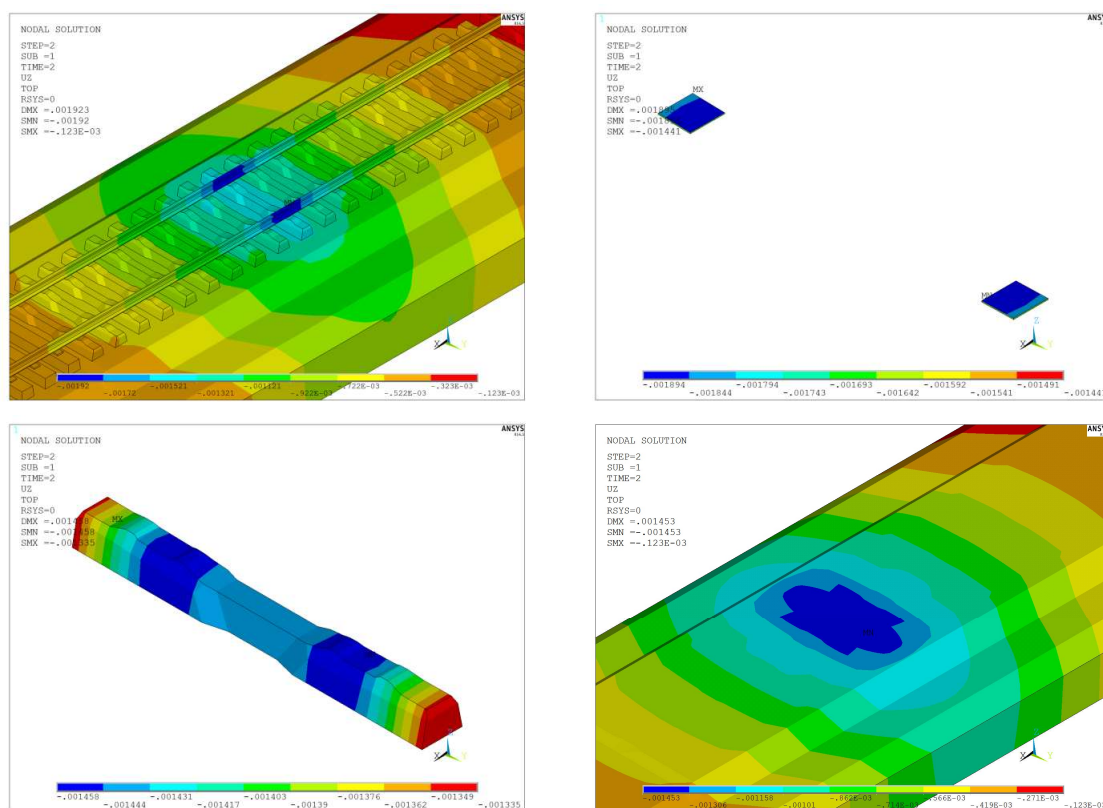
Výsledkem výpočtů jsou pole složek posuvů, složek přetvoření a složek napětí. Současně jsou vypočteny reakce, přičemž lze dále určit hlavní přetvoření, hlavní napětí a další veličiny. Celkem bylo vyřešeno 355 zatěžovacích stavů.

Ukázku funkčnosti modelu ukazují ukázky pole složek svislého posunutí u_z , které je z hlediska tuhosti kolejové dráhy stěžejní (obr. 135 až obr. 138). Níže jsou uvedeny výsledky pro dvojici svislých kolových sil ($2 \times 112,5$ kN) působících v oblasti pražců před výhybkou a ve výhybce. Je uvažován model se statickými hodnotami

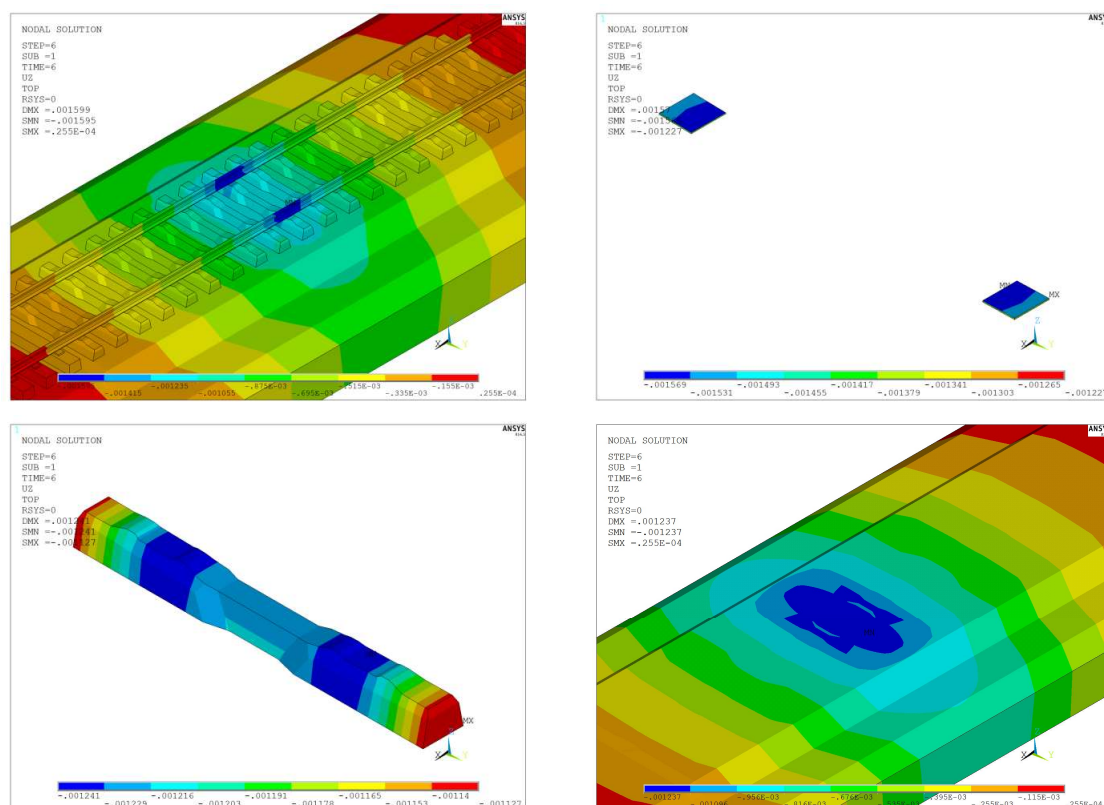
tuhostí podložek a s vodorovnými vazbami v uzlech povrchových prvků na spodní ploše modelu zemního tělesa. Tuhost modelu uložení (řízení tuhostí pomocné nejnižší vrstvy v železničním spodku) byl naladěn na pokles kolejnic od uvedených sil v mezích 1,5 až 1,6 mm.

Jak bylo uvedeno dříve (kap. 5.1.3.4), výpočet se provádí pro dva zatěžovací stavy. V prvním zatěžovacím stavu zatížení odpovídá vlastní tíze kolejového roštu a silovému působení ve svérkách. Hmotnost dalších vrstev se neuvažuje, ty plní pouze funkci pružného uložení. Ve druhém zatěžovacím stavu na rozdíl od prvního zatěžovacího stavu působí navíc v příslušném místě kolové síly. Odezva na působení pouze kolových sil je získána z rozdílu uvedených zatěžovacích stavů.

Na obr. 135 jsou uvedeny výsledky výpočtu druhého zatěžovacího stavu pro oblast pražců B 91 S, kdy poloha kolových sil je na souřadnici $x = -125,26$ m, tj. kolové síly působí nad desátým pražcem před prvním výhybkovým. Průhyb u_z hlavy kolejnice dosahuje 1,920 mm. Pro doplnění je uvedeno přemístění podložek (vpravo nahoře), přemístění pražce (vlevo dole) a pokles šterkového lože (vpravo dole). Pole posunutí u_z od zatížení pouze kolovými silami je zobrazeno na obr. 136. Svislý posun u_z hlavy kolejnice je roven 1,595 mm. V místě pod podložkou 1,227 mm a pod pražcem 1,241 mm. [128]

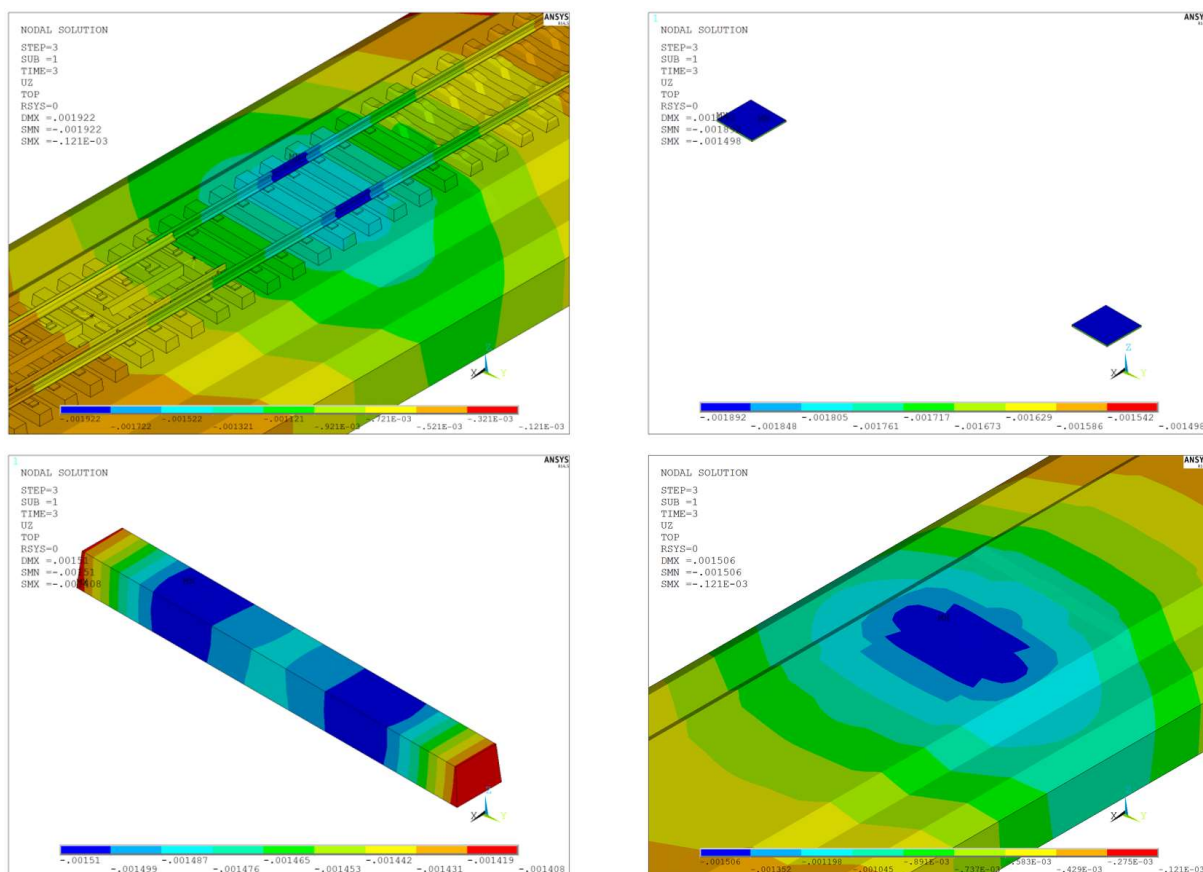


Obr. 135 Pole složky posunutí u_z pro druhý zatěžovací stav – vlastní tíha roštu, síly ve svérkách a kolové síly, poloha působíště sil $x = -125,26$ m. [128]



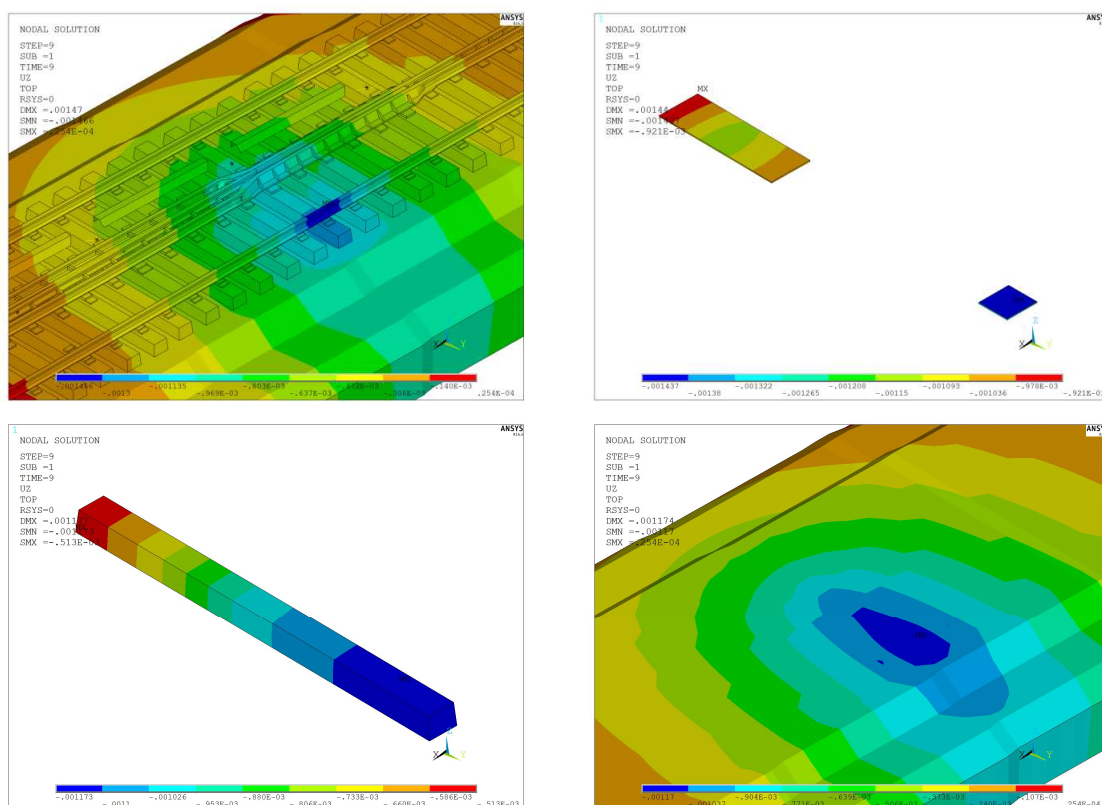
Obr. 136 Pole složky posunutí u_z od kolových sil, poloha působišť sil $x = -125,26$ m. [128]

Stejným způsobem jsou výsledky zpracovány pro oblast výhybky, kde kolejnice jsou uloženy standardním způsobem. Na obr. 137 je uvedeno pole svislých posunutí u_z pro druhý případ zatížení. Svislý posuv hlavy kolejnice dosahuje 1,922 mm. Na obr. 137 je zobrazeno pole posunutí u_z od kolových sil. V místě pod kolejnicí je svislý posun 1,545 mm, pod podložkou 1,223 mm a pod pražcem 1,231 mm. [128]



Obr. 137 Pole složky posunutí u_z pro druhý zatěžovací stav – vlastní tíha roštu, síly ve svěrkách a kolové síly, poloha působitě sil $x = -117,46$ m. [128]

Na následujícím obr. 138 pak je ilustrativně uvedena obdoba obr. 136, ale pro oblast srdcovky s pohyblivým hrotem. Jedná se rovněž o pole posunutí u_z od zatížení pouze kolovými silami.



Obr. 138 Pole složky posunutí u_z od kolových sil, poloha působišť sil $x=0,143$ m [93]

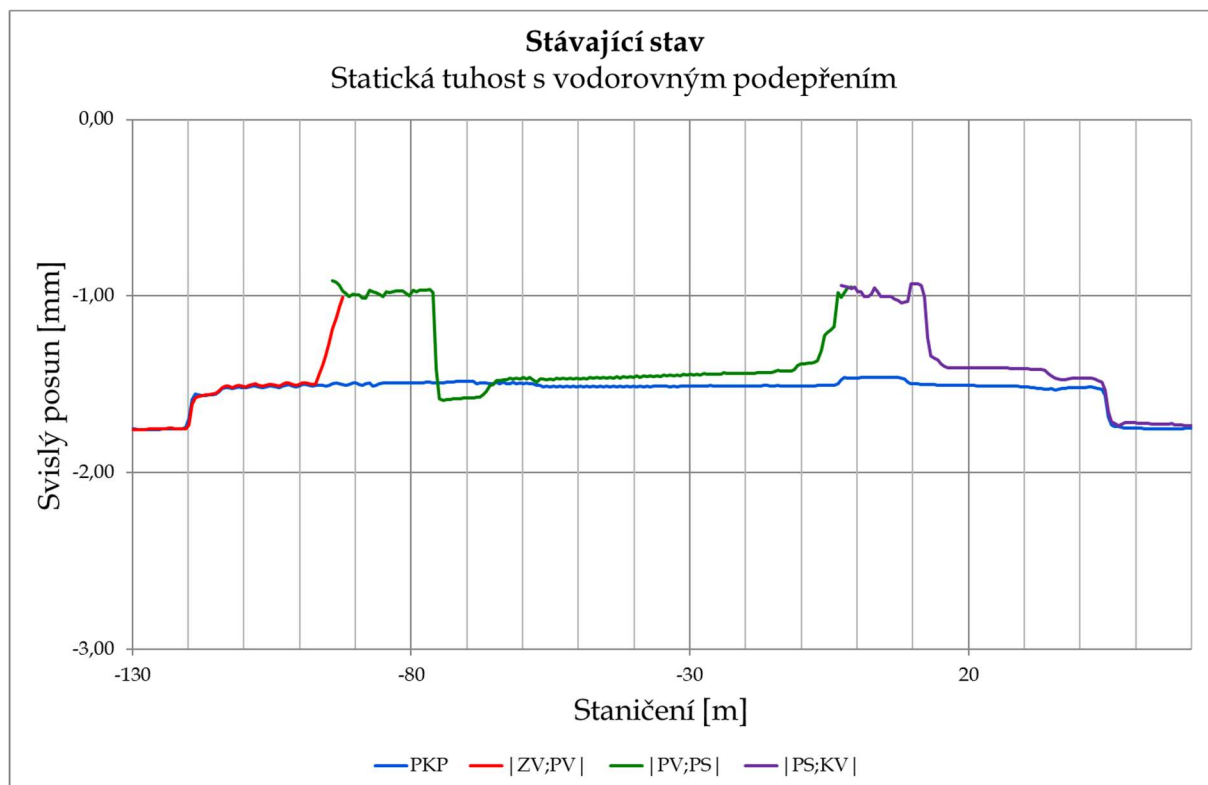
5.2.1.2 Výsledky výpočtu statické odezvy

Při sestavování grafů tuhosti kolejové jízdní dráhy byla věnována větší pozornost místům přechodů kola z jednoho prvku výhybky na druhý. Ve výhybce jsou takové přechody dva, první je přechod kola z jazyka na opornici (resp. naopak) a z křídlové kolejnice (rám srdcovky) na pohyblivý hrot (resp. naopak). Oba přechody byly modelovány obdobně následujícím způsobem. Byla určena oblast (délka), na které kolo přejde z jednoho prvku na druhý. V této oblasti bylo pak lineárně rozděleno působení síly při přechodu z jednoho prvku na druhý. Ve výměně se jednalo o úsek v souřadnicích od $x = -96,9$ m, kde byla celá kolová síla ještě na hlavě opornice, do $x = -90,6$ m, kde byla již celá kolová síla na jazyku. Obdobně byl vytvořen lineární přechod kolové síly v oblasti srdcovky, konkrétně od souřadnice $x = -3,265$ m na křídlové kolejnici po $x = +0,2$ m na pohyblivém hrotu.

Princip výpočtu je v zásadě takový, že se určuje průhyb kolejnic v závislosti na poloze kolových sil. Číselné hodnoty průhybů pod kolovými silami se z prostředí ANSYS exportují do tabulkového editoru MS Excel pro další zpracování.

Výsledný graf průhybů kolejnic pro případ podložek se statickými tuhostmi je uveden na obr. 139. Grafy tvoří spojnice mezi 354 body a odpovídají zatížení dvěma kolovými silám jedné nápravy ($2 \times 112,5$ kN). Vodorovná osa označená Staničení

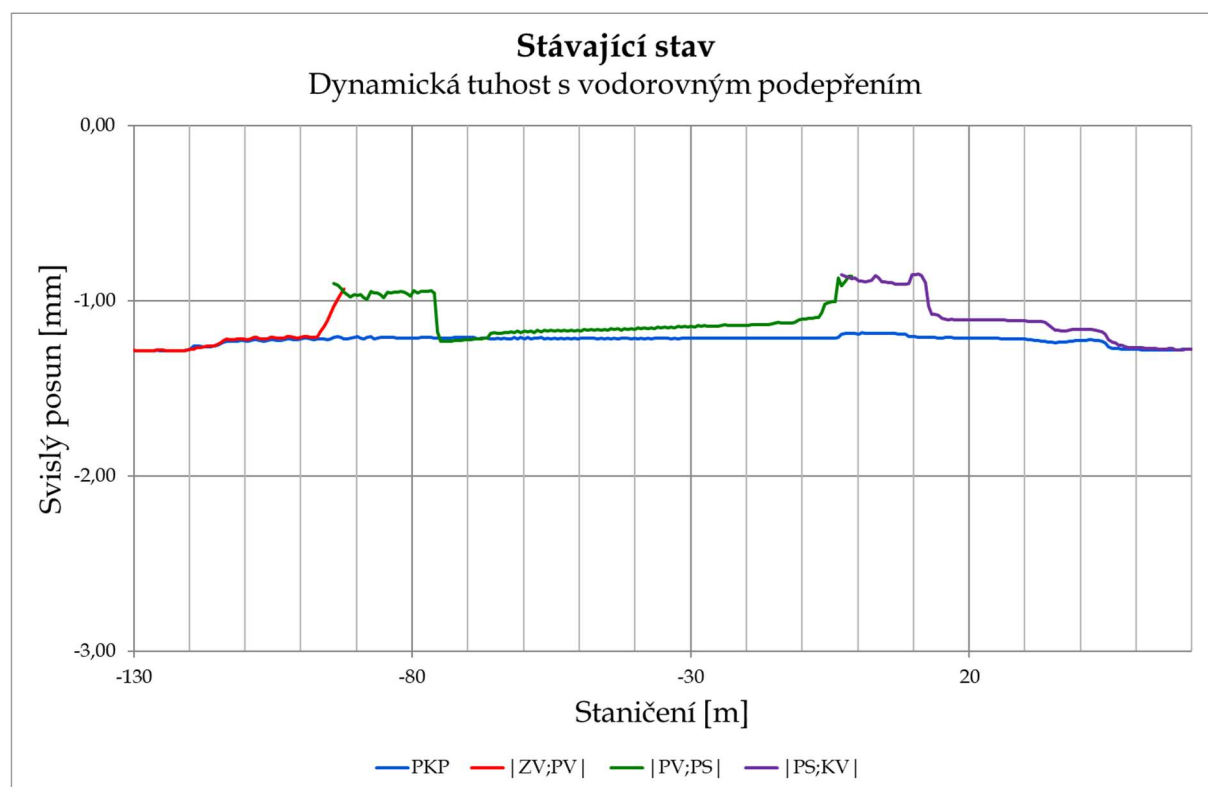
odpovídá polohám zatížení silami vázaných na souřadnice osy x výpočtového modelu.



Obr. 139 Svislý posuv hlav kolejnic pro případ modelu s vodorovně neposuvným uložením.
Vysvětlení legendy viz obr. 134. [128]

Grafy byly vytvořeny od každého případu dva z hlediska zkoumání vlivu modelu pražcového podloží na výsledný posuv hlav kolejnic. Byly zkoumány tedy dva případy. V prvním případě byla spodní vrstva ve vodorovných směrech neposuvná a v druhém případě naopak posuvná (uvedený graf obr. 139 je pro neposuvnou vrstvu pražcového podloží). Ze výpočtu vyšlo, že posuv je prakticky u obou případů identický a liší se pouze o konstantu (konkrétně 0,3 mm).

Dále byl také modelován případ, kdy byly uvažovány dynamické tuhosti modelovaných podložek (rozdíl statická/dynamická tuhost z hlediska laboratorního zkoušení viz kapitola 6 Laboratorní zkoušení systémů upevnění). Graf tuhosti jízdní dráhy s dynamickými charakteristikami podložek je pak uveden na následujícím obr. 140, pro srovnání je uveden opět případ s uvažováním neposuvného pražcového podloží (tedy s vodorovným podepřením).



Obr. 140 Svislý posuv hlav kolejnic pro případ modelu s vodorovně neposuvným uložením.

Vysvětlení legendy viz obr. 134. [128]

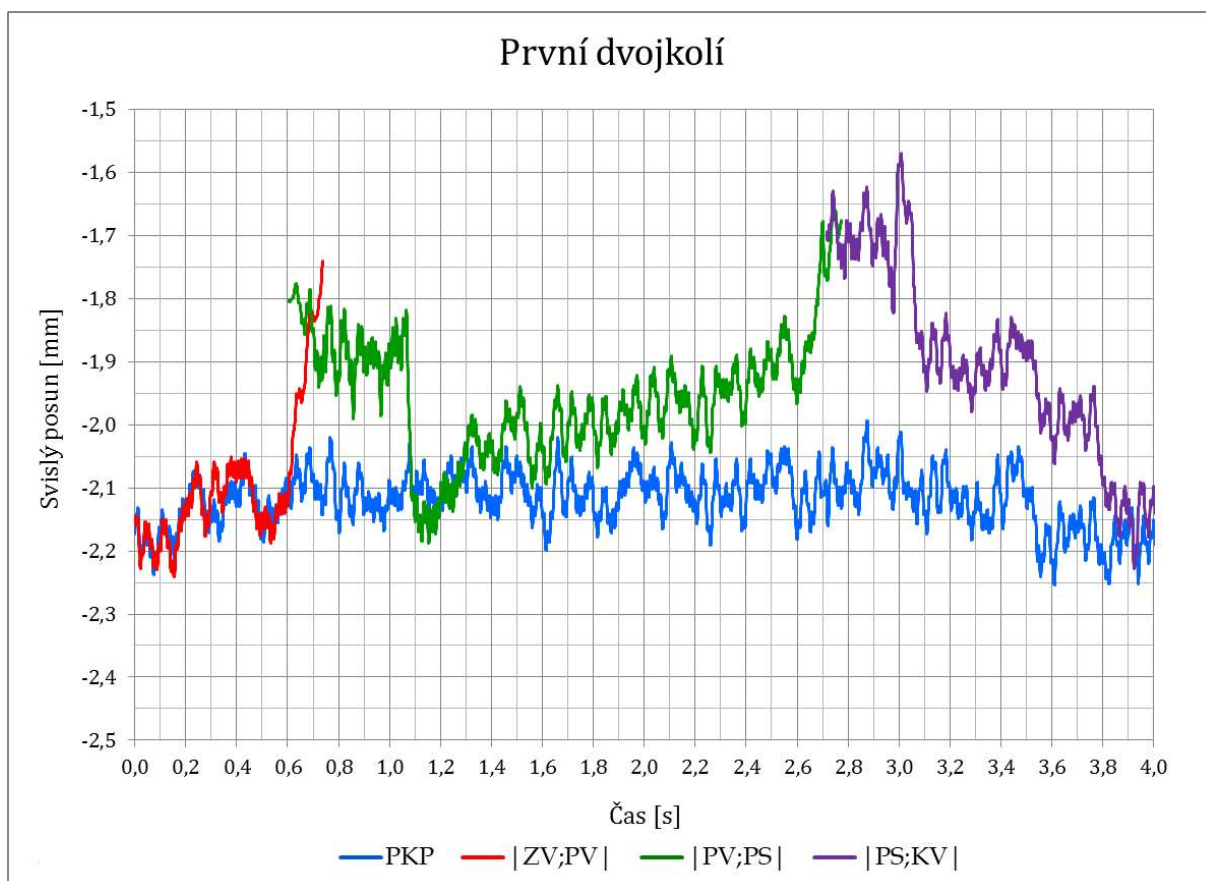
Na první pohled lze z grafů identifikovat velkou podobnost s dříve publikovanými pracemi, viz kap. 2.2, resp. obr. 18 a obr. 19. Lze říci, že výsledky tuhosti kolejové jízdní dráze ve výhybce bez zpružnění jsou očekávané. Lze stejně jako u standardní výhybky vysledovat následující. K prvnímu ztužení dochází ihned při přechodu z běžné koleje s použitím pražců B 91 S na pražce výhybkové. Tato změna je ale relativně zanedbatelná, rozdíl je řádově 0,1 mm. Toto ztužení vlivem použití výhybkových pražců vede kontinuálně přes celou výhybku a končí opět až přechodem na pražce B 91 S. Řádově významnější ztužení nastane přechodem z opornice, která je uložena na pružných podložkách pod patu kolejnice, na jazyk. Ve výhybce jsou totiž použity kluzné stoličky standardní konstrukce s přivařenou kluznou plochou, jazyk je tedy uložen velice tuze. Toto ztužení je řádově o 0,5 mm, což už je podstatnější změna tuhosti. Tuhá oblast výměny končí poslední kluznou stoličkou s přechodem na patrové podkladnice (viz obr. 116), kde je jazyk (již plnoprofilová jazyková kolejnice) uchycena neposuvně mezi žebry podkladnice s užitím standardní podložky pod patu kolejnice. Následuje nevýrazné ztužování ve středních částech výhybky, které je v kolejnicovém páse jdoucím přes srdcovku zapříčiněno zvětšující se délkou pražců vně tohoto kolejnicového pásu. Další významné ztužení nastane v oblasti srdcovky. Toto ztužení je v podstatě přes celou srdcovkovou část a je zapříčiněno zejména použitím velice tuhého rámu pohyblivého hrotu srdcovky, který je vyroben z bainitické oceli. Rovněž oblast za rámem s křídlovými kolejnicemi

a instalovanými vložkami pro zajištění přenosu sil z bezстыkové koleje působí velmi tuze. Před bodem konce výhybky toto významné ztužení opět klesne na ztužení vyvolané použitím výhybkových pražců. [5, 54, 128, 134]

5.2.1.3 Výsledky výpočtu dynamické odezvy

Popis principu výpočtu dynamické odezvy, vč. způsobu zavedení pohybujícího se vozidla, byl uveden v kap. 5.1.3.5. Model použitý pro výpočet dynamické odezvy obsahoval dynamické tuhosti použitých podložek pod patu kolejnice a bylo uvažováno s vodorovně neposuvným uložením na interaktivní síly přenášené z vozidla na pojížděné hlavy kolejnic.

Výsledkem výpočtu jsou pole posunů, deformací, napětí a dalších veličin (např. reakce). Výsledný efekt, průhyb pouze od svisle působících kolových sil je získán z rozdílu celkové odezvy a statického zatěžovacího stavu bez kolových sil. Graficky jsou uvedeny vypočtené hodnoty pohybu pojížděných částí výhybky formou grafů, ilustrativně pro první dvojkolí viz obr. 141.



Obr. 141 Dynamická odezva – svislý posun u_z v místě působení prvního dvojkolí pojížděných kolejnic. Vysvětlení legendy viz obr. 134. [128]

Pokud se porovná statická a dynamická odezva (viz obr. 139 a obr. 141), je zřejmé, že dynamická odezva na zadané buzení je velmi blízká statickému řešení. Toto je v souladu s funkcemi zatížení, neboť zadané časově proměnné kolové síly mají malou dynamickou složku. V extrémním případě nepřekračující 10 % hodnoty statického zatížení. V hodnotách se posuvy liší při srovnání první a poslední nápravy vůči druhé a třetí. Toto odpovídá kotlině od souběžného statického působení všech čtyř náprav. [128]

Vzhledem k velmi blízkému řešení dynamické odezvy statické odezvě, bylo při výpočtu na výhybce se zpružněnými uzly upevnění od dynamické odezvy upuštěno. Malý vliv dynamické odezvy je zejména dán také použitím srdcovky s pohyblivými hroty, neboť velký dynamický příspěvek u řešení standardní výhybky tvořil přechod kola z hrotu na křídlovou kolejnici v pevné srdcovce.

5.2.2 Výsledky výpočtu na výhybce se zpružněnými systémy upevnění

Po návrhu zpružnění do systémů upevnění a úpravy výpočtového modelu bylo cílem následující potlačení nepravidelností průhybu kolejnic. Nejprve bylo spočítána čistě teoretická optimalizace tuhostí podložek tak, aby průhybová křivka podél výhybky byla co nejhladší, tj. aby byly eliminovány oblasti s významně jiným průhybem kolejnic v grafech průběhů tuhosti na stávající variantě, viz obr. 139.

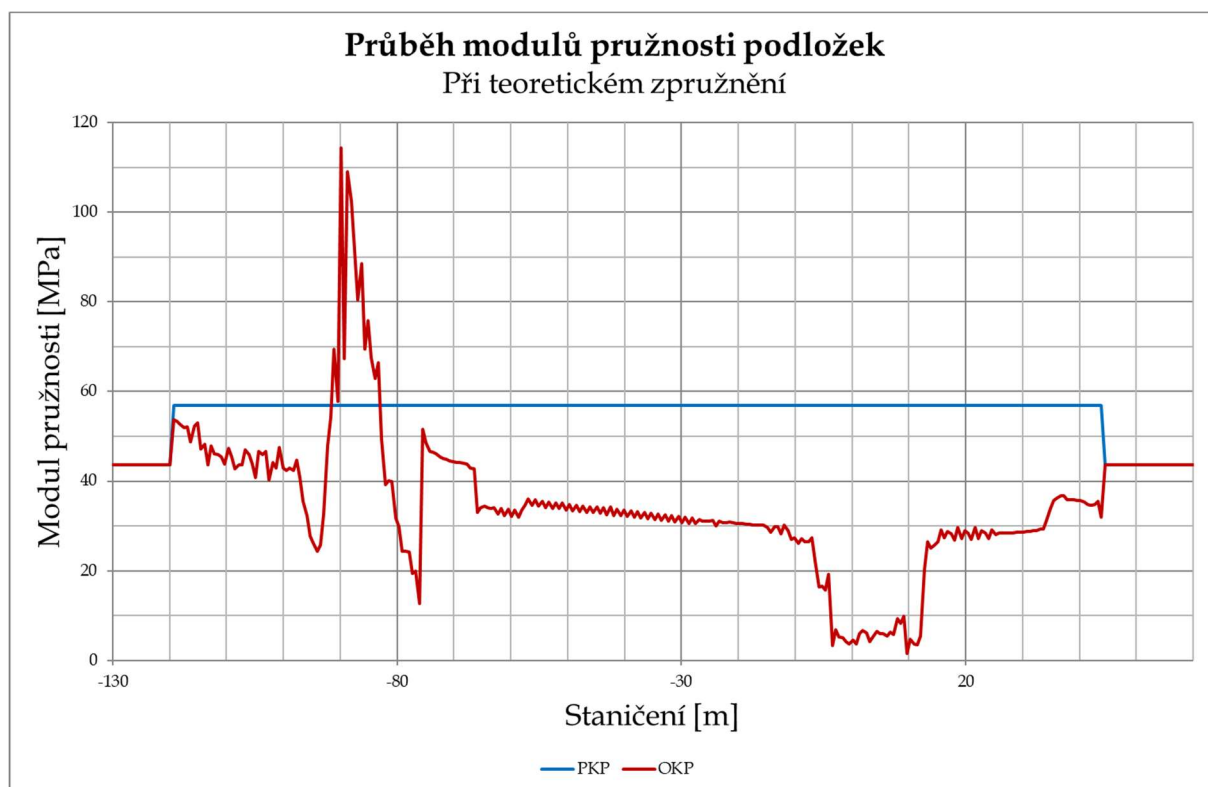
Jelikož teoretické zpružnění znamená, že v podstatě každá teoretická podložka v rámci celé výhybky má jiné materiálové charakteristiky (modul pružnosti, resp. tuhost), bylo následně přistoupeno k variantním návrhům zpružnění tak, že bylo použito pouze několik zástupců podložek. Pro uvedení do praxe by totiž bylo totiž nereálné, aby byla v každém uzlu upevnění jiná podložka, a to už z hlediska ceny za podložky, tak z hlediska možné chyby při montáži a také údržby (výměny podložky za provozu).

5.2.2.1 Výpočet teoretické optimalizované varianty

V teoreticky optimalizované variantě bylo tedy umožněno, aby podložky měly jakékoliv moduly pružnosti, cílem bylo naladit model tak, aby byl průhyb podél celé výhybky, pokud možno, v optimální hodnotě 1,5 mm.

V rámci teoreticky optimalizované varianty byl modifikován modul pružnosti podložek v kolejnicovém pásu jdoucím přes jazyk, středové kolejnice a pohyblivý hrot srdcovky (tj. v obr. 134 červené, zelené a fialové úseky kolejnicového pásu) na 273 pražcích (v souřadnici -119,25 až +43,87 m).

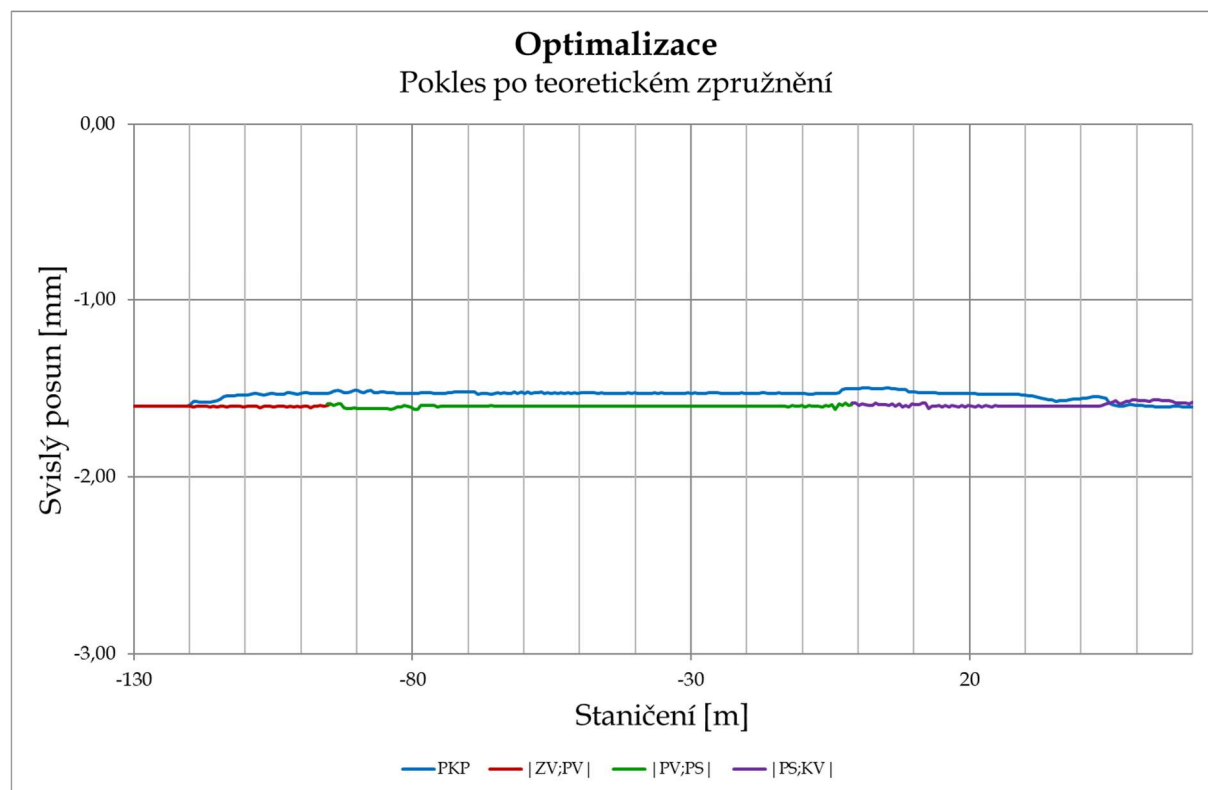
Svislý posun (zatlačení) hlavy opornice nad pražcem je ovlivněn tuhostmi podložek na několika okolních pražcích pod oběma opornicemi. Tuhost podložky nejde stanovit přímo, ale je třeba provést opakovaný výpočet. Jako první byl proveden tento „optimalizační“ výpočet, kdy se opakovaně aplikovalo silové zatížení na hlavy opornic nad jednotlivými pražci, s cílem co nejvíce se přiblížit hodnotě svislého zatlačení hlavy opornice 1,5 mm. Výsledky „optimalizačního“ výpočtu jsou uvedeny na obr. 142 a obr. 143. Na prvním uvedeném obr. 142 je výsledný průběh hodnot modulů pružnosti podložek pro tuto variantu. Vodorovná osa představuje staničení a svislá osa značí hodnoty modulů pružnosti podložek odbočné větve [MPa]. Hodnoty se pohybují v rozmezí od 5 MPa pod výhybkovou částí až po 115 MPa u kluzných stoliček pod jazykem. Všechny podložky v modelu mají tloušťku 6 mm. Uvedené průběhy (obr. 142) ukazují na výrazné změny tuhostí jednotlivých podložek. Svislý posun pojižděných kolejnic pro uvedený případ ilustruje obr. 143. V něm jsou tedy použity podložky o modulech pružnosti uvedené v grafu obr. 142.



Obr. 142 Moduly pružnosti pro optimální variantu. Křivka PKP je kolejnicový pás jdoucí přímou opornicí, OKP je kolejnicový pás jdoucí přímým jazykem a přes srdcovku. [133]

Jak je vidět z teoretického grafu obr. 142, jsou zde navrženy i velmi měkké podložky o modulu pružnosti kolem 5 MPa. Jedná se zejména o oblast velmi tuhého rámu srdcovky PHS. Prakticky se ale nedoporučuje použít tak měkké podložky, neboť použité uzly upevnění byly konstruovány pro podložky s výrazně většími svislými tuhostmi, které odpovídají 30 MPa a více. Proto byla stanovena pro další výpočty spodní mez tuhosti podložek na hodnotu modulu pružnosti 20 MPa. Pro další práci

s variantami bylo dalším vstupním parametrem omezení, aby bylo v rámci výhybky použito maximálně 8 různých modulů pružnosti pro podložky s ohledem na snadnější nákup materiálu, montáž a údržbu.



Obr. 143 Svislý posun hlav kolejnic pro optimální variantu [133]

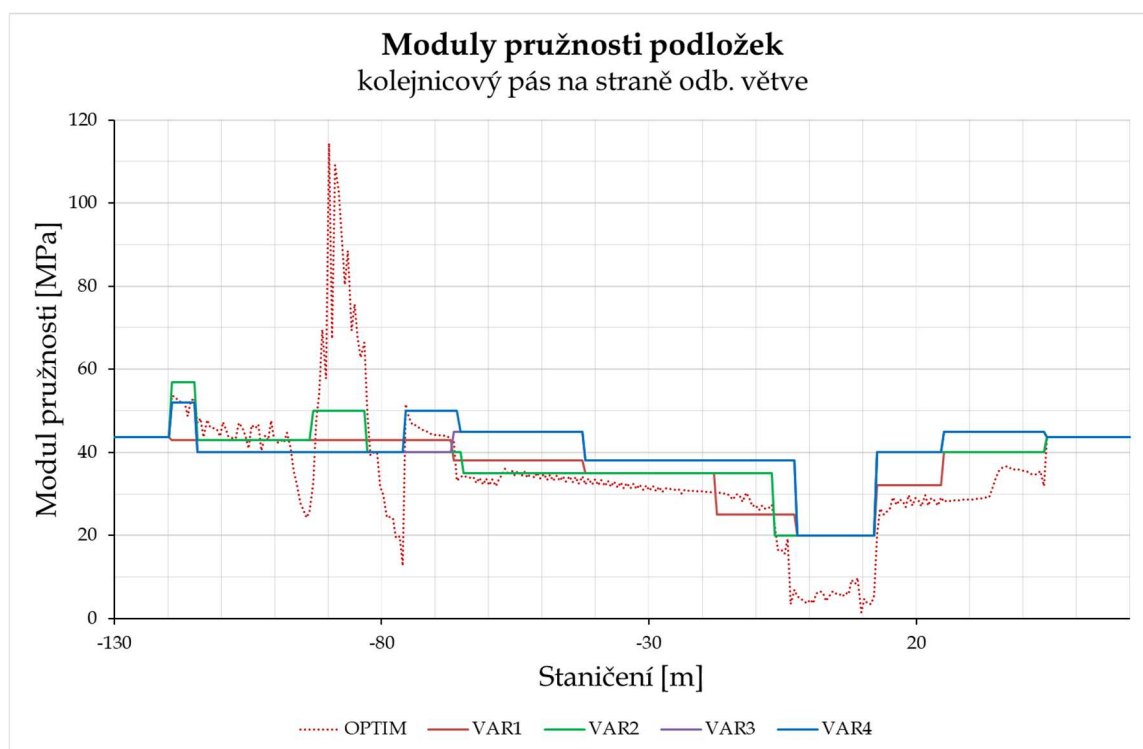
5.2.2.2 Variantní návrhy zpružnění optimalizace tuhosti modulu pružnosti

Byly tedy zpracovány celkem čtyři varianty dle omezujících vstupních parametrů popsaných výše. Použití jednotlivých modulů pružnosti reprezentuje graf na následujícím obr. 144. Červeně je uvedena varianta 1, zeleně varianta 2, fialově varianta 3 a modře varianta 4. Použité moduly pružnosti v jednotlivých variantách jsou uvedeny v následující tab. 20.

Ve variantě 1 a 4 je použito celkem 6 různých modulů pružnosti pro podložky, ve variantách 2 a 3 je použito celkem 7 různých modulů pružnosti pro podložky, podmínky maximálního počtu 8 typů (z hlediska materiálu) podložek bylo tedy dosaženo. Průběh modulů pružnosti použitých podložek v rámci výhybky s porovnáním s teoretickým potřebným modulem pružnosti vystihuje obr. 144.

Tab. 20 Moduly pružnosti podložek použitých v jednotlivých variantách

Modul pružnosti [MPa]	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
20	✓	✓	✓	✓
25	✓	—	—	—
32	✓	—	—	—
35	✓	✓	—	—
38	✓	—	✓	✓
40	✓	✓	✓	✓
43	✓	✓	✓	✓
45	—	—	✓	✓
50	—	✓	—	✓
52	—	—	✓	✓
57	—	✓	—	—

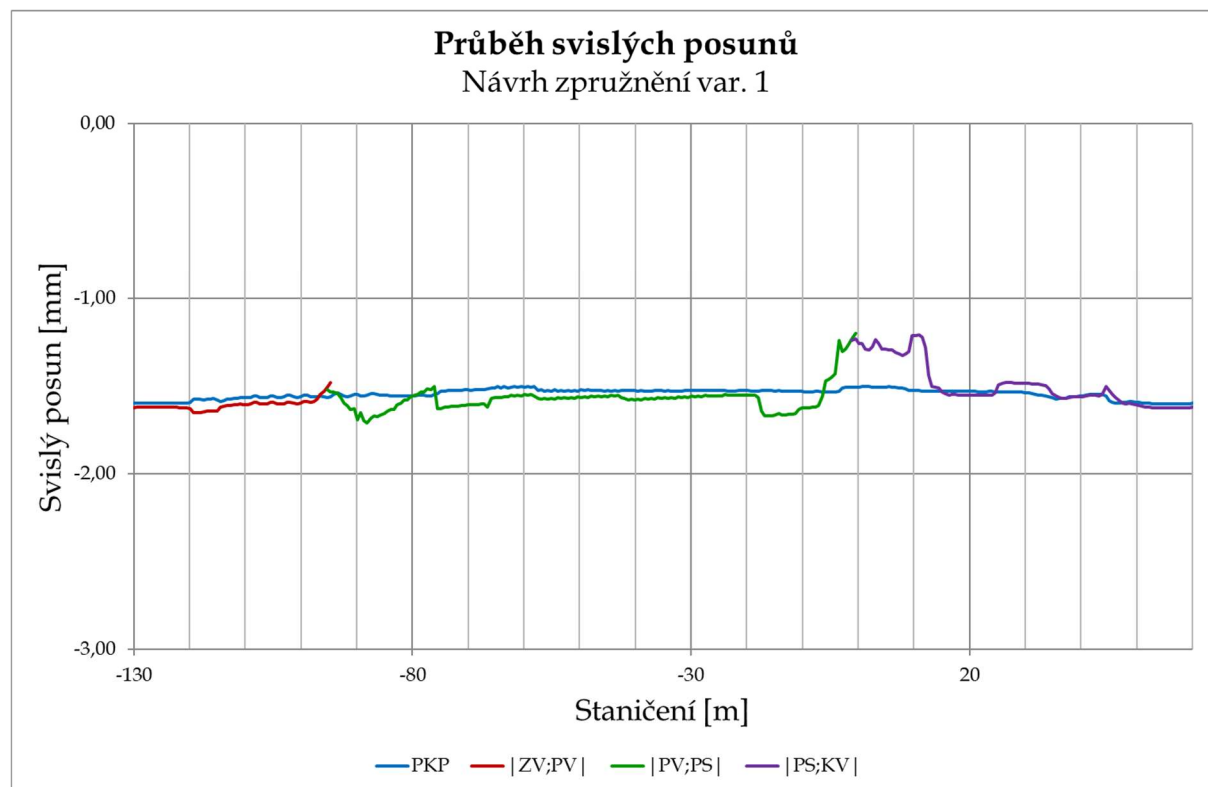


Obr. 144 Moduly pružnosti pro optimální variantu a varianty 1 až 4 [133]

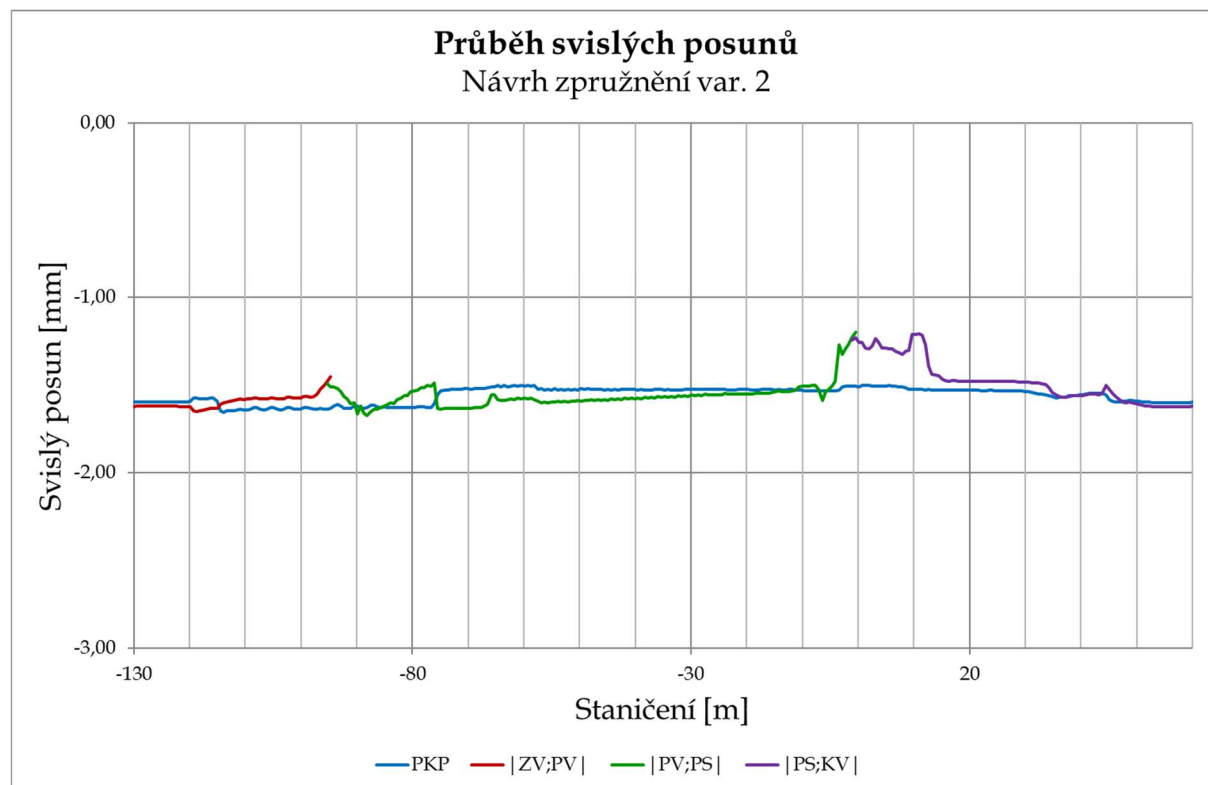
Pro jednotlivé varianty 1 až 4 byl vyhotoven graf svislých posunutí (zatlačení) pojížděných kolejnic. Výsledky jsou uvedeny na následujících grafech (obr. 145 až obr. 148). Ve výpočtu byl ve všech variantách ponechán přejezd z opornice na jazyk a z opornice na hrot ve stejných místech. V uvedených grafech na obr. 145 až obr. 148 je stále zachována konvence značení kolejnicových pásů dle schématu na obr. 134.

Přestože cílem výpočtu bylo zejména stanovení tuhostí uzlů upevnění kolejnicového pásu na straně odbočné větve, byla nakonec provedena v oblasti kluzných stoliček mírná úprava modulu pružnosti i v přímém kolejnicovém pásu.

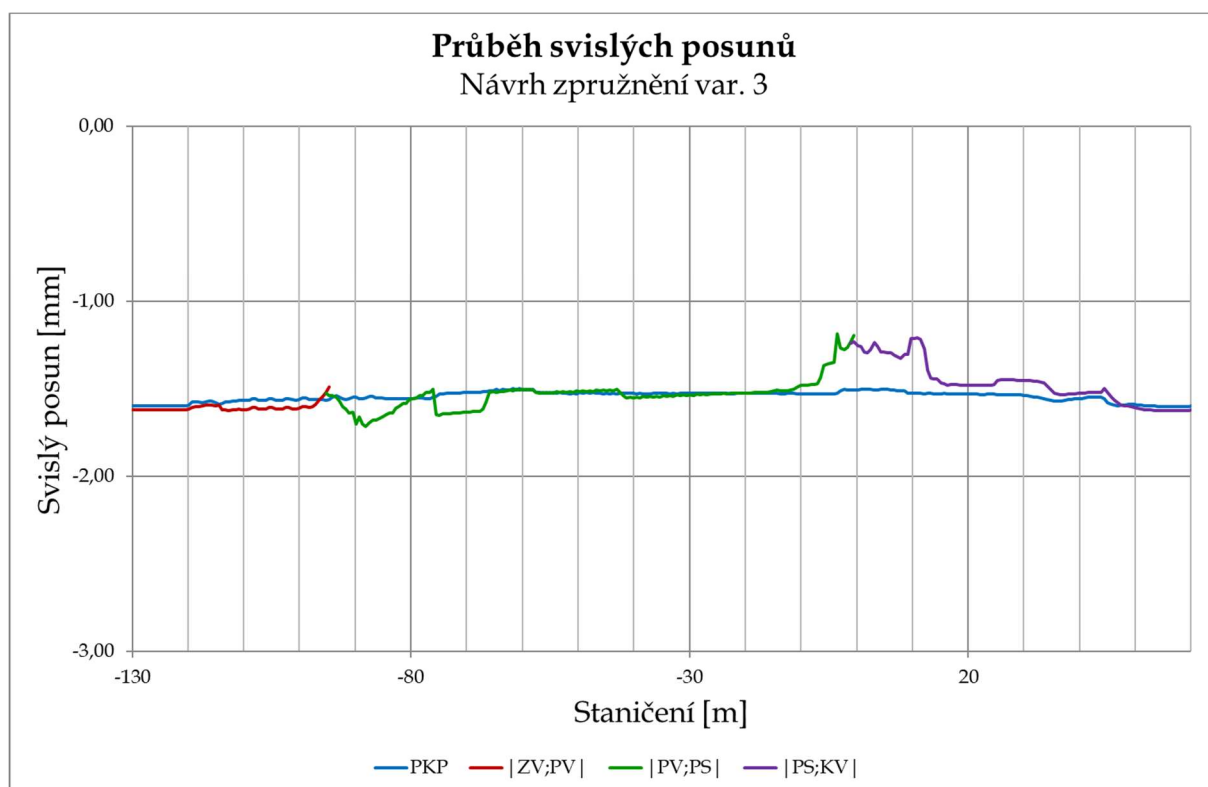
Touto změnou je možné snížit rozdíl ve svislém posunu při přechodu kola z běžné koleje do oblasti výhybky.



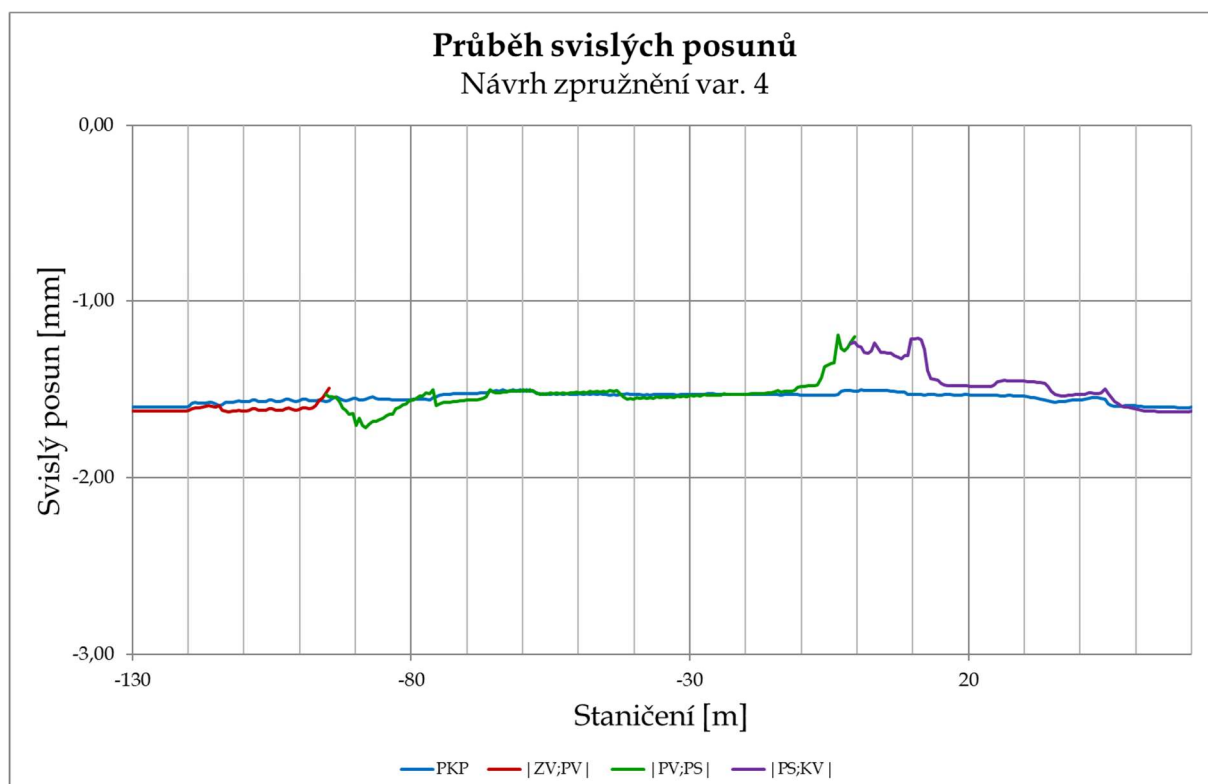
Obr. 145 Varianta 1 – Svislý posun hlavy kolejnice přímé a odbočné větve [133]



Obr. 146 Varianta 2 – Svislý posun hlavy kolejnice přímé a odbočné větve [133]



Obr. 147 Varianta 3 – Svislý posun hlavy kolejnice přímé a odbočné větve [133]

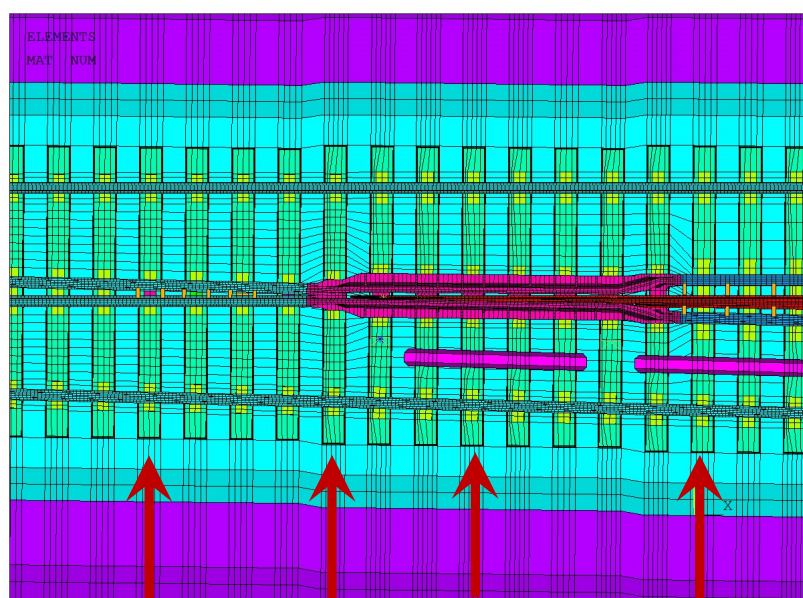


Obr. 148 Varianta 4 – Svislý posun hlavy kolejnice přímé a odbočné větve [133]

5.2.3 Výsledný návrh úprav do stávajících systémů upevnění vysokorychlostní výhybky

Vypočtené hodnoty modulů pružnosti je dále třeba přiřadit tuhostem reálných podložek. Proto byly pro budoucí testování dále vybrány 4 uzly upevnění ve vysokorychlostní výhybce. Pro ně byl následně zpracován detailní návrh zpružnění (tj. konstrukční řešení pro použití konkrétní podložky). Snahou je výhledově nechat dodat konkrétní podložky a otestovat systémy upevnění v laboratoři. Byly vybrány následující 4 uzly upevnění:

- pražec 19-186, upevnění č. Y9528, typický uzel upevnění č. 2 (viz obr. 129);
- pražec 19-190, upevnění č. Y9532, typický uzel upevnění č. 2 (viz obr. 129);
- pražec 19-193, upevnění č. Y9533, typický uzel upevnění č. 3 (viz obr. 130);
- pražec 19-198, upevnění č. Y9534, typický uzel upevnění č. 4 (viz obr. 131).



Obr. 149 Vyhodnocované systémy upevnění v oblasti srdcovky.

Pro detailnější analýzu výše uvedených 4 podložek do systémů upevnění byl využit stávající globální model výhybky v teoretickém průběhu požadovaných modulů pružnosti. V tomto modelu byly modelovány systémy upevnění zjednodušeně, proto je nutno zohlednit omezenou vypovídající hodnotu výsledků. Výsledné posuny, napětí a stlačení jsou jen od zatížení kolovými silami. Napětí je uvažováno za předpokladu lineárního izotropního chování. Tloušťka vrstvy je diskretizována jen jedním prvkem, proto se jedná jen o orientační hodnotu výsledného modulu pružnosti/tuhosti podložky. Stlačení je uvažováno jako rozdíl posunu horního a dolního líce podložky ve svislém směru.

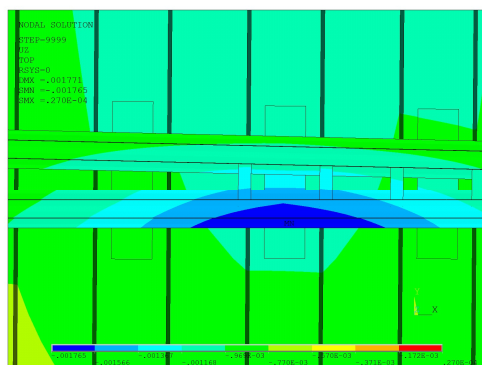
Jelikož některé podložky jsou velmi dlouhé (zejména do typického uzlu upevnění č. 3), je potřeba již uvažovat i deformaci desky ležící na podložce. Vzhledem k excentrickému zatížení je pak stlačení v rámci půdorysu podložky nerovnoměrné. Výsledné moduly pružnosti a přepočtené tuhosti jsou pak uvedeny v následující tab. 20. Do tabulky bylo uvažováno stlačení pod působištem kolové síly.

Tab. 21 Výsledné moduly pružnosti a tuhosti podložek do vybraných uzlů upevnění.

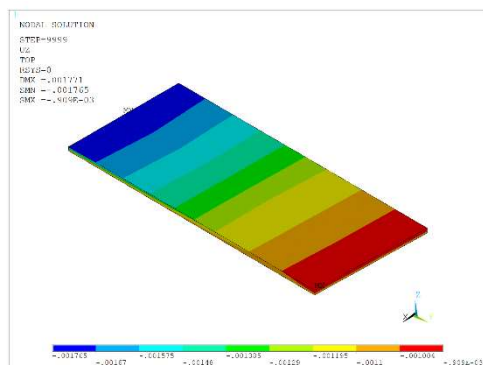
Pražec	Typ. uzel	E [MPa]	Tl. [mm]	Síla na podložku [kN]	Stlačení [mm]	Tuhost [N/mm]
19-186	2	16,42	6	44,434	0,559	$7,95 \cdot 10^4$
19-190	2	5,00	6	24,340	0,578	$4,21 \cdot 10^4$
19-193	3	5,00	6	35,110	0,587	$5,98 \cdot 10^4$
19-198	4	6,03	6	42,524	0,580	$7,33 \cdot 10^4$

V rámci optimalizačního výpočtu, při kterém byl modifikován modul pružnosti jednotlivých podložek, s cílem dosáhnout rovnoměrné stlačení dráhy při průjezdu vozidla. Spodní hranice pro modul pružnosti byla stanovena hodnotou 5 MPa, bylo tedy pro tento případ uvažováno s nižším modulem pružnosti než při globálním návrhu zpružnění ve variantách 1 až 4 (v nich bylo minimum 20). Cílem je rovněž prověřit, zda by takto měkké podložky vyhověly použití v konkrétních systémech upevnění. Hodnoty modulu pružnosti 5 MPa bylo dosaženo u podložek na pražci 19-190 a 19-193. Pokud by bylo zvoleno kritérium síla působící na pražec, hodnoty by vyšly odlišně. Jak již bylo zmíněno, uzly upevnění jsou v rámci globálního modelu jízdní dráhy modelovány zjednodušeně, proto má detailní analýza omezenou vypovídací schopnost. Pro detailnější výsledky by bylo nutné vytvořit podrobný submodel uzlu upevnění.

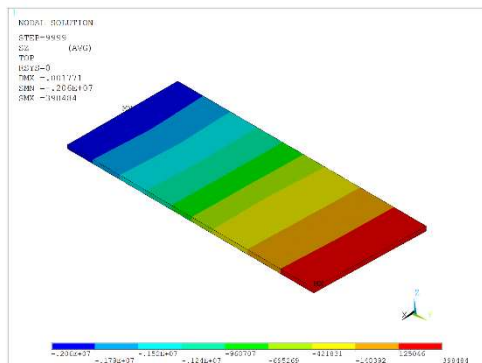
Svislé posuny, normálové napětí a stlačení ve svislém směru u vybraných podložek systémů upevnění jsou uvedeny na následujících obrázcích. Pro praktické použití lze rovněž uvažovat různé tloušťky podložek. Vychází se z tloušťky podložky 6 mm (standardní tloušťka podložky pod patu kolejnice), je možné ale pomocí vztahů pružnosti a pevnosti (viz kap. 2.1.13 Tuhost) převést na jiné tloušťky podložek. Pro praktické uplatnění lze předpokládat, že bude u takto velmi měkkých podložek do systému upevnění nutno zvětšit tloušťku podložky na 10 až 12,5 mm, přičemž tloušťka 12,5 mm je obvykle dodávána jako standardní tuhost.



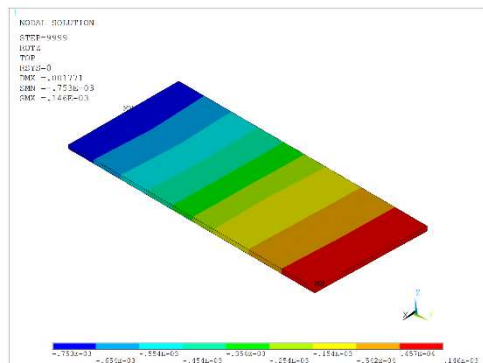
Svislé posuny – celkový pohled



Svislé posuny – jen podložka

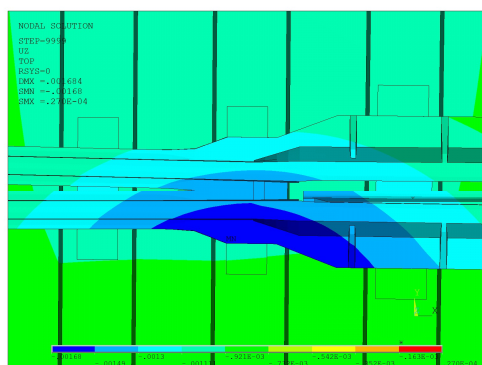


Normálové napětí ve svislém směru σ_z

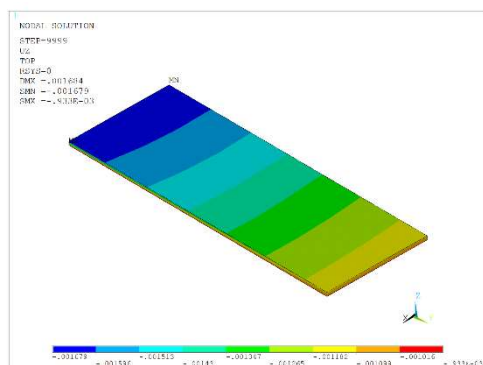


Stlačení ve svislém směru

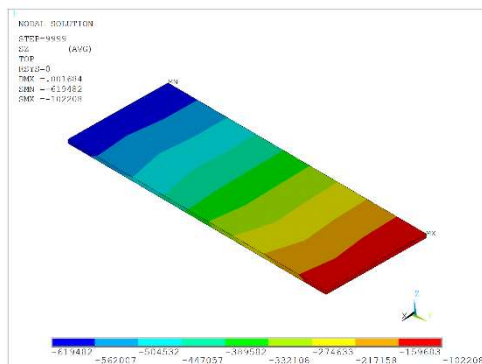
Obr. 150 Podložka v typickém uzlu upevnění č. 2 na pražci 19-186.



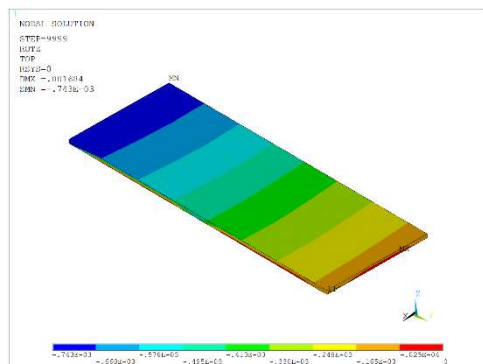
Svislé posuny – celkový pohled



Svislé posuny – jen podložka

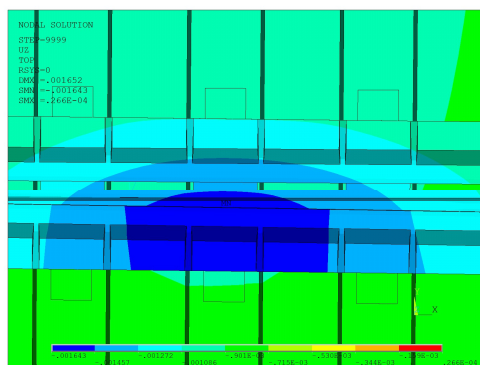


Normálové napětí ve svislém směru σ_z

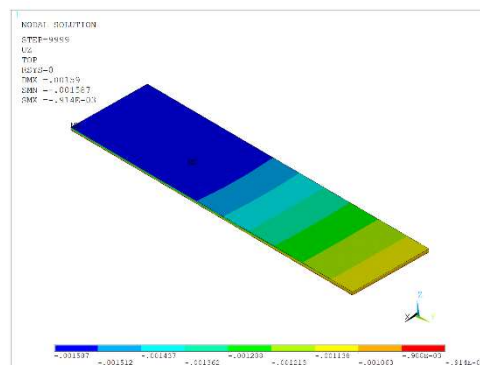


Stlačení ve svislém směru

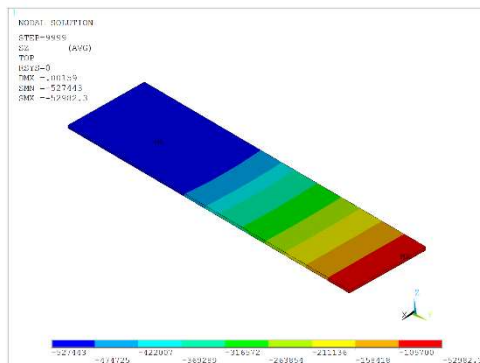
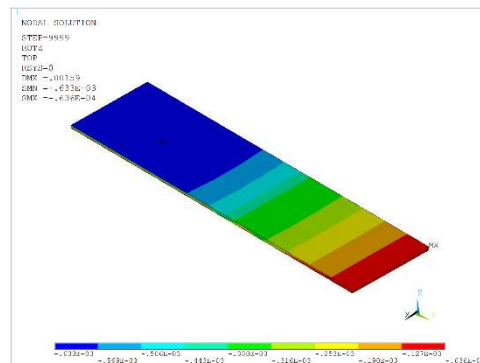
Obr. 151 Podložka v typickém uzlu upevnění č. 2 na pražci 19-190.



Svislé posuny – celkový pohled

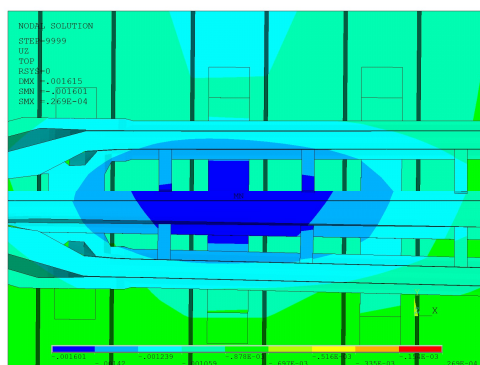


Svislé posuny – jen podložka

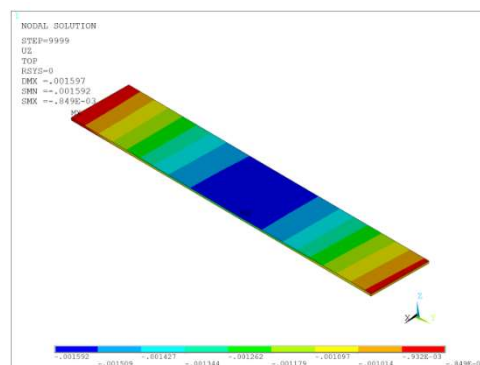
Normálové napětí ve svislém směru σ_z 

Stlačení ve svislém směru

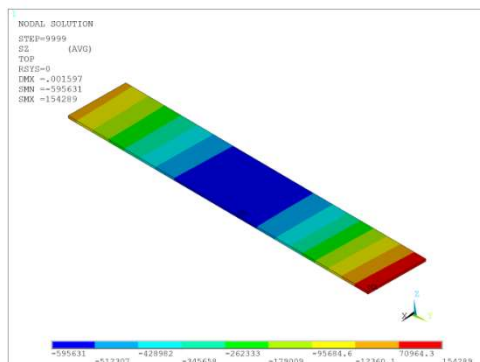
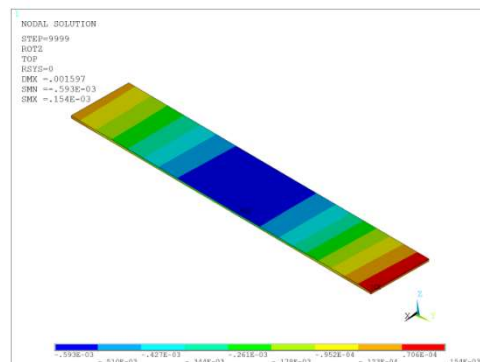
Obr. 152 Podložka v typickém uzlu upevnění č. 2 na pražci 19-193.



Svislé posuny – celkový pohled



Svislé posuny – jen podložka

Normálové napětí ve svislém směru σ_z 

Stlačení ve svislém směru

Obr. 153 Podložka v typickém uzlu upevnění č. 2 na pražci 19-198.

5.2.4 Závěr a doporučení pro uvedení do praxe

Byl vytvořen 3D model vysokorychlostní výhybky vč. uzlů upevnění a dalších detailů, následně byl vytvořen geometrický model v prostředí sw. ANSYS a model připraven na výpočet. Následovalo výpočtové modelování, jehož hlavním výsledkem byl graf tuhosti jízdní dráhy ve vysokorychlostní výhybce, v němž byla identifikována tuhá místa, které je potřeba zpružnit. V návaznosti na provedenou rešerši a výsledky provozního ověřování v žst. Ústí nad Orlicí (viz kap. 4 Sledování stávajícího zkušebního úseku) bylo navrženo zpružnění do vysokorychlostní výhybky, přičemž ve výměně bylo uvažováno s již navrženou kluznou stoličkou KSN20 a v oblasti srdcovky bylo identifikováno celkem 6 typických uzlů upevnění, pro něž bylo navrženo zpružnění.

Následovala úprava modelu se zakomponováním zpružnění a výsledkem pokračujícího výpočtového modelování byla optimalizace tuhosti jízdní dráhy ve vysokorychlostní výhybce a návrh 4 variant zpružnění za dodržení podmínek minimálního modulu pružnosti podložky a maximálního počtu různých typů podložek po stránce materiálových vlastností.

Nakonec byly podrobně zkoumány 4 vybrané uzly upevnění v srdcovkové části, pro něž byly identifikovány konkrétní potřebné tuhosti podložek.

Výhledově bude potřeba pokračovat dalším krokem, a to nalezením vhodného dodavatele podložek, který je schopen dodat podložky o požadovaných materiálových charakteristikách. Jakmile budou podložky dodány, bude potřeba vyrobít vzorky typických uzlů upevnění pro laboratorní zkoušky. Následně by měly proběhnout laboratorní zkoušky, kterými by byla jednak potvrzena správnost návrhu konstrukčního řešení a také validována tuhost uzlu upevnění.

V případě, že by některý parametr nevyhověl, bylo by potřeba upravit konstrukci systému upevnění nebo navrhnout jinou pružnou podložku, případně provést znova detailnější výpočet složitějších uzlů upevnění. Diskutabilní jsou zejména uzly upevnění s instalovanými dlouhými podložkami a velkou zatěžovací plochou. U těchto systémů upevnění již nelze předpokládat dokonale tuhou desku, ale bude se vlivem deformace kontaktní plocha zmenšovat, což bude vést na zásadně jiné tuhosti podložek. Přestože bylo částečně ve zjednodušených modelech s tímto problémem uvažováno, je možné, že bude potřeba ještě kritickou oblast srdcovky modelovat detailněji. Rovněž je z hlediska chování koleje velice specifická oblast rámu PHS, které vzhledem ke své robustnosti a velké ohybové tuhosti při své délce realizuje roznos na mnohem více pražců, než je známo u běžné koleje. Proto je potřeba tuhost uzlu upevnění v těchto oblastech vnímat globálně a nikoliv izolovaně.

6 LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ SYSTÉMŮ UPEVNĚNÍ

Navržené systémy upevnění dle zásad popsaných v předchozích kapitolách bylo potřeba validovat, resp. odzkoušet, zda jsou z hlediska pružnosti (resp. tuhosti) v požadovaných mezích. Co se týče tuhosti, je možné se zabývat zkoušením tuhosti několika způsoby. Je možné zkoušet tuhost:

- pružného prvku (podložky) samostatně;
- systému upevnění jako celku.

Tuhost je principiálně zkoušena tak, že se působí na zkoušený prvek silou a měří se svislé přetvoření. Tuhost k je v tomto případě závislá na zkoušené ploše, musí být tedy vždy definována plocha, při které byla tuhost zkoušena. Pokud se jedná o zkoušení systému upevnění, je pak plocha již dána konstrukčně.

Je-li zkoušena podložka samostatně, definujeme tedy vždy plochu, při které je zkouška prováděna. Tato plocha je volena s ohledem na konstrukční použití podložky. Pokud se jedná o nejběžnější případ, kdy je zkoušena podložka pod patu kolejnice, použijeme plochu odpovídající úložné ploše na podkladnici (např. 150 x 160 mm pro svršek UIC 60). Jestliže je zkoušena podložka pod podkladnici, je vhodné volit kontaktní plochu celé podkladnice. Mohou nastat i případy, kdy jsou zkoušeny podložky, které mají různou plochu dle konkrétního místa použití (např. dlouhá podložka pod srdcovky, která se upravuje do konkrétního systému upevnění, který se liší dle příslušného tvaru srdcovky v daném místě). Potom je nejlepší alternativou zvolit referenční plochu, se kterou budou zkoušky pravidelně probíhat. Přibližný přepočet na jinou plochu může být pak proveden dle principů pružnosti, které jsou popsány v kapitole 2.1.13. Je potřeba mít ale na paměti, že tento přepočet nemusí být úplně přesný, jelikož je zatěžovací křivka (síla-přetvoření) materiálů běžně používaných pro pružné podložky obvykle s nelineárním průběhem a modul pružnosti E vyskytující se ve vztahu (127) je získán po laboratorní zkoušce jako směrnice sečny této křivky. Tato alternativa, kdy je zkoušena pouze podložka samotná, je vhodná zejména pro výrobní zkoušky materiálů při kontrole kvality, při porovnávání různých materiálů pro výrobu podložek mezi sebou nebo pro zjištění materiálových charakteristik, které budou vstupovat do výpočtu (resp. výpočtového modelu) nebo pro podložky, které mají vždy stejnou kontaktní plochu (typicky podložky pod patu kolejnice).

Pokud je zkoušen systém upevnění jako celek, je zjištěna informace o tom, jak působí celý systém upevnění při zatížení drážními vozidly. Z globálního hlediska je tento přístup tedy více vypovídající o skutečné tuhosti (resp. pružnosti) systému upevnění, tzn. jaké umožňuje stlačení při daném zatížení. Výhodou je, že tato varianta zkoušení reflektuje všechny okolní vlivy, které mají vliv na tuhost systému upevnění

jako celku, resp. na funkci podložky v systému upevnění. Tyto vlivy, které není možné při zkoušení podložky samostatně simulovat, jsou následující:

- předpětí od svěrek (zejména při abnormálním uspořádání svěrek v upevnění výhybek);
- průhyb konstrukčního prvku spočívající na podložce;
- spolupůsobení jednotlivých prvků;
- vliv tření a smyku.

Výše uvedené vlivy se různí dle toho, jaký systém upevnění je použit nejen dle konstrukčního typu (Delkor Egg, Vossloh 336, systém DT UNO apod., příklady viz kapitola 2.2 a 2.3), ale také samotnou polohou ve výhybce jednoho konstrukčního typu (kluzná stolička, podkladnice k přídržnici, systém upevnění do střední části, pod srdcovku apod.). Proto je potřeba testovat zástupce všech systémů upevnění, které mají konstrukční odlišnost takovou, že se významně mění výše uvedené vlivy.

Další obecné rozdělení laboratorních zkoušek tuhosti je podle toho, zda jsou podložky nebo systémy upevnění zkoušeny staticky nebo dynamicky. Podle toho jsou pak výsledkem materiálové charakteristiky statické (např. k_{stat} , E_{stat}) nebo dynamické (např. k_{dyn} , E_{dyn}). Základní rozdíl je obecně v tom, že při statickém zatížení je vnášena síla působící na podložku pomalu a rovněž i odlehčování probíhá pomalu, zatímco při dynamickém zkoušení je síla vnášena rychle při dané frekvenci (např. 5 nebo 10 Hz). Z hlediska uplatnění hodnoty statické nebo dynamické pro další použití mají reálnější vypovídající schopnost hodnoty dynamické, jelikož je při zatěžování simulován v zásadě průjezd vozidla. Některé materiály mají velice odlišné chování při zatěžování dynamickém a statickém, je tedy potřeba dopředu definovat, pro jaký konkrétní účel budou zjištěné materiálové charakteristiky použity. Moderní materiály pak mají dynamické a statické hodnoty téměř identické (tzn. poměr dynamické ku statické hodnotě blízký 1,0), viz kap. 2.4.

Vlastním příspěvkem v této části disertační práce byla **příprava vzorků podložek** do systémů upevnění, a to jak vytěžení podložek z provozovaných výhybek ve zkušebním úseku v Ústí nad Orlicí, tak nových pro srovnání. Dále byla **přípravena a vybrána vhodná metodika zkoušení**. Samotné laboratorní zkoušky proběhly na VUT za osobní asistence a následovala **vlastní interpretace a diskuze výsledků**.

6.1 METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.5, není předpisem nikde stanoveno, jaké konkrétní hodnoty tuhosti mají systémy upevnění nebo podložky mít. Obvykle je u všech výrobců systémů upevnění tuhost odvozena od daného požadavku zákazníka na optimální průhyb kolejnice (viz kap. 2.1.2). Co se týče výhybek, velmi často jsou

zákazníkem definovány tuhosti systémů upevnění ve výhybkách tak, aby odpovídaly systémům upevnění v běžné koleji před a za výhybkou (především v případě konstrukce PJD). Je-li tedy např. užit v běžné koleji systém upevnění Vossloh 336 s tuhostí systému upevnění 25 kN.mm^{-1} , požaduje obvykle zákazník i ve výhybce stejnou tuhost systémů upevnění. Požadavek na tuhost v systému upevnění může ale vyjít také z výpočtového modelu (viz kap. 2.1.8 a 5.2) při vývojové činnosti.

6.1.1 Předpisy stanovující metodiku zkoušení

Problematika zkoušení systémů upevnění není celosvětově, ba ani celoevropsky jednoznačná. Metodika zkoušení je ukotvena nejen v evropské normě, ale také v předpisech různých železničních správ, které obvykle požadují zkoušení dle svých předpisů. Významným problémem pak je skutečnost, že podle různých metodik často vycházejí zcela jiné výsledky tuhostí. V našem středoevropském prostoru se nejčastěji setkáváme s následujícími předpisy, které definují metodiku zkoušení podložek nebo sestav upevnění:

- ČSN EN 13 146-9+A1 Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění – Část 9: Stanovení tuhosti [91];
- DBS 918 235 Elastische Zwischenlagen und Zwischenplatten [135];
- OTP (SŽDC) pro podložky pod patu kolejnice v podkladnicovém upevnění, schválené č.j. 60 789/99-O13 ze dne 1. 1. 2000, resp. vč. změny č. 1 z r. 2001 [136].

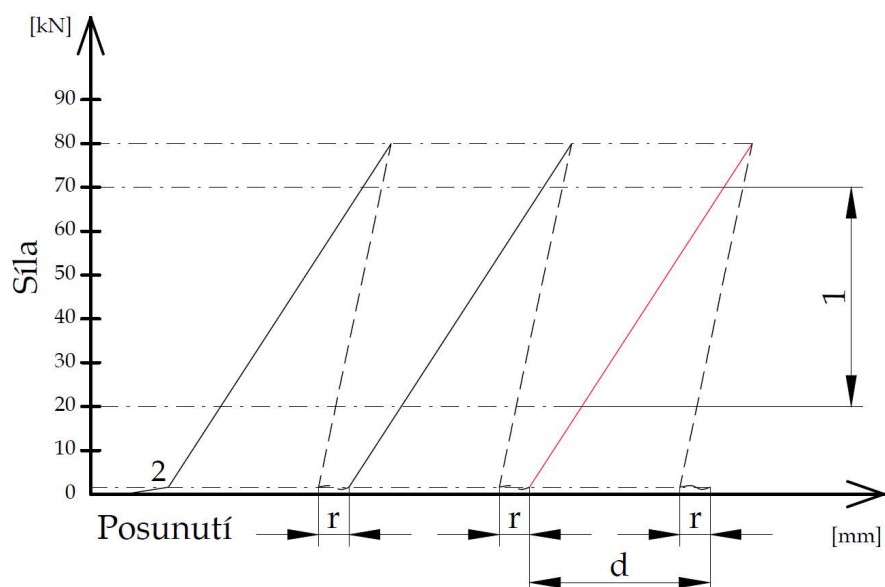
V současné době je nejčastěji používána metodika dle evropské normy. Na tuto metodiku postupně od roku 2014 přechází z dosavadní metodiky dle OTP i Správa železnic. Lze konstatovat že většina správců směřuje postupně k jednotné metodice stanovení tuhosti dle EN. V německy mluvících zemích je pak stále velice hojně používána metodika dle DBS. Nutno však podotknout, že rozdíly ve výsledcích při zkoušení dle evropské normy a dle metodiky DBS jsou spíše nevýznamné, zatímco rozdíly mezi evropskou normou a metodikou dle OTP jsou značné.

6.1.2 Základní rozdíly mezi jednotlivými metodikami zkoušení

V této kapitole jsou stručně popsány stěžejní rozdíly mezi jednotlivými metodikami zkoušení podložek samotných. Vzhledem k tomu, že pro zkoušení vyvíjených systémů upevnění je již výhradně používána metodika dle EN, bude popsána pak podrobněji v následující kapitole vč. zkoušky sestavy upevnění.

6.1.2.1 Metodika zkoušky podložek dle OTP

Průběh statické zkoušky zatěžování podložky silou při měřené deformaci lze graficky zobrazit dle následujícího obr. 154.



Obr. 154 Schéma průběhu zkoušky dle OTP: 1-výpočet sečné tuhosti; 2-nastavení deformace 0 mm; r -doba relaxace 1 min; d -hodnota trvalé deformace. [137]

Jak lze odvodit z grafu, zatěžovací cyklus sestává ze tří zatěžovacích větví. Nejprve je podložka plynule zatížena silou 1 kN, při tomto předpětí je nastavena deformace 0 mm. Následuje **vnášení síly rychlostí cca 1 kN.s⁻¹**. Následuje **odlehčení**, které je provedeno **najednou (cca do 10 s)** zpět na výchozí hodnotu 1 kN. **Doba relaxace**, resp. prodlevy, mezi zatěžovacími cykly je **1 min**. Deformace je měřena dvěma snímači posunutí, přičemž je počítán pohyb středu desky, tj. v ose podložky. U novějších zařízení se pak používají 3 kusy snímačů rozmístěných do rohů desky pro kontrolu rovnoměrnosti deformací zatěžovací sestavy. Deformace je odečítána po 10 kN, nebo kontinuálně dle vybavení laboratoře. Nakonec se zaznamená graficky poslední, tj. třetí zatěžovací větev.

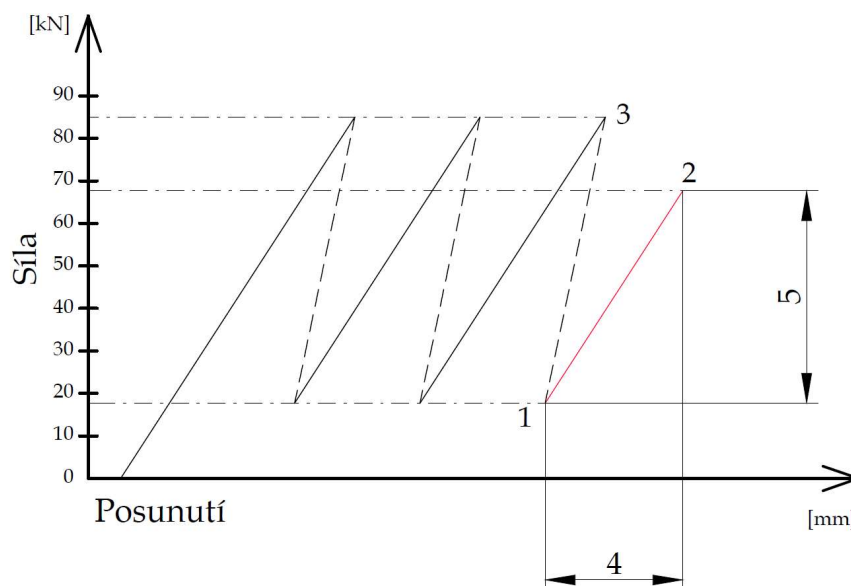
6.1.2.2 Metodika zkoušky dle EN

Metodika statické zkoušky podložky dle evropské normy lze vyjádřit obdobně graficky jako v předchozím případě, viz obr. 155.

Při porovnání obou průběhů lze vysledovat konkrétní odlišnosti mezi jednotlivými postupy ve zkoušení podložky. Bylo zjištěno, že rozdíl v metodice vede rovněž často k významným rozdílům ve výsledcích zkoušky. Zkouška dle EN je podrobně popsána v následující kapitole 6.1.3. Zde jsou uvedeny pouze základní odlišnosti od výše uvedeného postupu dle OTP:

- ve zkušební sestavě je vloženo mezi roznášecí desky brusné plátno (P180 až P400);
- rychlost vnášení síly je 120 kN.min⁻¹ (tj. 2 kN.s⁻¹);
- odlehčení na hodnotu 18 kN se provádí stejnou rychlostí (tj. 120 kN.min⁻¹);

- nenechává se prodleva mezi cykly;
- použijí se vždy 3 ks snímačů pro zjištění rovnoměrnosti zatěžování;
- sledování hodnoty trvalé deformace není normou stanovena.



Obr. 155 Schéma průběhu zkoušky dle EN: 1-síla F_{SP1} ; 2-síla F_{SP2} ; 3-síla F_{SPmax} ; 4-sledovaná hodnota posunutí d_{SP} ; 5-výpočet statické tuhosti k_{SP} [137]

Dle zjištění, viz [137], vycházejí statické tuhosti podložek zkoušených dle OTP tužší než dle EN. To je přikládáno skutečnosti, že je mezi podložku a roznášecí desky vloženo brusné plátno a rovněž tomu, že je vnášena síla vyšší rychlostí bez ponechání prodlevy mezi jednotlivými cykly.

6.1.2.3 Metodika zkoušky dle DBS

Metodiku zkoušky stanoví DBS 918 235 [135]. Tento postup je používán zejména v německy mluvících zemích (Německo, Rakousko) a je používán často výrobci pružných podložek, kteří sídlí v Německu či Rakousku, a to obvykle automaticky jako hlavní metodika. Pokud jsou k dispozici produktové listy těchto firem s materiálovými charakteristikami podložek, je nutné se podívat, dle jaké metodiky byly mechanické vlastnosti podložek zjištěny.

Metodika zkoušky dle DBS je zjednodušeně následující. Zkušební sestava odpovídá v zásadě zkušební sestavě dle EN. Rovněž je předepsáno použití brusného plátna, a to konkrétně P240 se střední velikostí zrna 58 μm . Použity jsou také 3 induktivní snímače posunutí. Zatěžovací cykly jsou celkem 3, přičemž předtížení je $F_u = 0,5 \text{ kN}$ („Unterlast“). Horní zatížení je pak v hodnotě $F_o = 100 \text{ kN}$ („Oberlast“). Zaznamenán je třetí cyklus a je vykreslen graf síla-deformace. Rychlost zatěžování je stanovena na 2 kN.s^{-1} . V posledním třetím cyklu se zaznamená posunutí $z_{sek,u}$ při tzv.

dolní sečné síle $F_{sek,u}$ a posunutí $z_{sek,o}$ při tzv. horní sečné síle $F_{sek,o}$. Sečná tuhost se pak spočítá podle následujícího vztahu (134).

$$C_{stat,\Delta F} = \frac{F_{sek,o} - F_{sek,u}}{z_{sek,o} - z_{sek,u}} = \frac{F}{z_{sek,o} - z_{sek,u}} [kN \cdot mm^{-1}] \quad (134)$$

Z výše uvedeného lze vysledovat jisté odlišnosti od metodik dle EN a dle OTP. Stejně jako při zkoušce dle EN je použito brusné plátno. Liší se hodnota předtížení, která je stanovena na 0,5 kN (u OTP 1 kN, u EN 18 kN). Rovněž se liší hodnota maximální vnesené síly, která je zde v hodnotě 100 kN (u OTP 80 kN, u EN 85 kN). Rychlost zatěžování odpovídá postupu dle EN. Z uvedeného postupu je tedy vidět, že přestože je metodika blíže postupu dle EN, rozdíly nejsou zcela zanedbatelné.

6.1.3 Metodika dle ČSN EN 13 146-9

Vzhledem k výše uvedeným rozdílům byla jako základní pro stanovení tuhosti uvažována metodika dle EN 13 146-9+A1 [91], která se v současné době používá nejčastěji a je vzata jako primární postup pro určení tuhosti podložky nebo sestavy upevnění.

6.1.3.1 Kategorie systémů upevnění

Vzhledem k různým vyskytujícím se typickým vozidlům s ohledem na nápravové zatížení a k různým specifickým rychlostem a kolejnicovému profilu, byly stanoveny následující kategorie systémů upevnění, kterým odpovídají konkrétní specifická zatížení pro měření tuhosti.

Systém upevnění **kategorie A** je v zásadě systém upevnění, který je použit zejména na **tramvajové dráze**. Předpokládají se menší nápravové hmotnosti (do 100 kN), menší poloměry směrových oblouků (typicky 80 m) a menší rychlosti (do 100 km.h⁻¹).

Systém upevnění **kategorie B** je v zásadě systém upevnění, který je použit zejména pro **metro** (městské segregované dráhy). Předpokládají se nápravové hmotnosti větší než u tramvaje, ale menší než u konvenční železnice (160 kN), typický poloměr směrového oblouku je 100 m. Maximální rychlost je uvažována do 140 km.h⁻¹.

Systém upevnění **kategorie C** je systém upevnění, který odpovídá **konvenční železniční dráze** (celostátní dráha, regionální dráha, vlečka). Nápravová hmotnost je uvažována standardní 225 kN. Typický poloměr směrového oblouku je 400 m. Maximální rychlost je uvažována do 250 km.h⁻¹.

Systém upevnění **kategorie D** je systém upevnění, který bude navržen pro kolej na **vysokorychlostní trati**. Předpokládá nižší nápravové zatížení než konvenční železniční dráha (180 kN), větší typické poloměry oblouků (800 m) a nemá shora omezenou rychlost (lze tedy uvažovat např. předpokládanou rychlost na českých VRT 350 km.h⁻¹).

Systém upevnění **kategorie E** je systém upevnění, který bude použit na trati se smíšenou dopravou s uvažovaným provozem **těžkých nákladních vlaků** (tzv. heavy-haul railway). Předpokládá se nápravové zatížení až 300 kN, malé poloměry oblouků (typický 150 m) a typická maximální rychlost do 200 km.h⁻¹).

Z výše uvedeného vyplývá, že pro návrh systémů upevnění do výhybek, které jsou předmětem této práce, lze uvažovat kategorii C (konvenční železniční dráhy), případně kategorii D (vysokorychlostní tratě). Pro potřeby zkoušek tuhosti jsou hodnoty zatížení měření tuhosti identické jak pro kategorii C, tak pro kategorii D. Pro následující stanovení sil při laboratorní zkoušce je nutné tedy uvažovat následující:

Tab. 22 Zatížení pro měření tuhosti. [90]

Kategorie systému upevnění	F_{SP1} a F_{LFP1} [kN]	F_{SPmax} a F_{LFPmax} [kN]	F_{SA1} a F_{LFA1} [kN]	F_{SAmax} a F_{LFAMax} [kN]
C, D	18	85	1	64

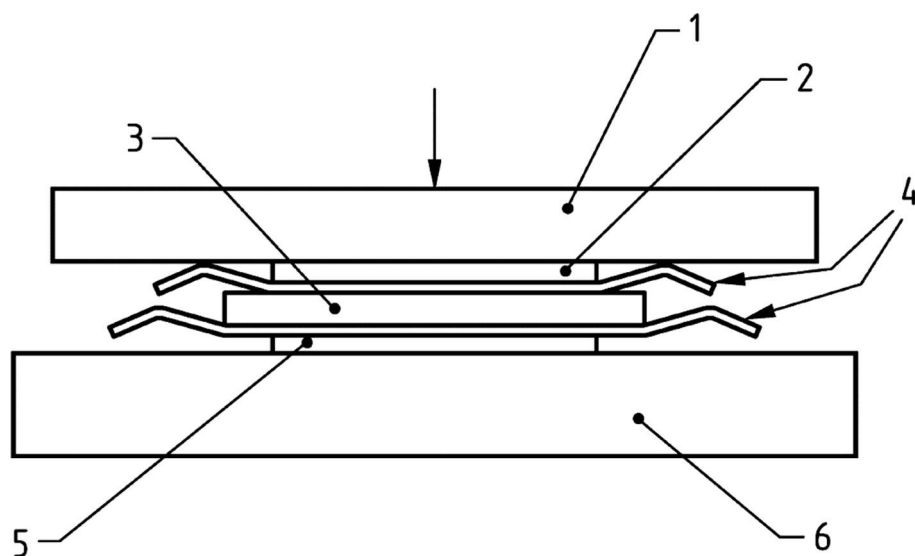
6.1.3.2 Statická zkouška podložky

Přesný postup zkoušky je uveden v [91], zde je uveden pouze základní princip zkoušky podle této normy bez detailního popisu zkušebního zařízení, záznamového zařízení, zkušebního prostoru apod.

Uspořádání zkoušky je schematicky znázorněno na obr. 156. Na základně (6) je uložena spodní roznášecí deska (2), na kterou je položeno brusné plátno (4) s drsnou plochou směrem nahoru. Na brusném plátně spočívá zkoušená podložka (3), na jejíž horní ploše je opět uloženo brusné plátno (4), ale nyní s drsnou plochou směrem dolů, tedy k podložce (drsná plocha brusného plátna je vždy orientována ke zkoušené podložce). Na brusném plátně (4) pak leží horní deska roznášející zatížení (2) a na ni je uložena kovová deska (1).

Samotný postup zkoušky byl již nastíněn prostřednictvím obr. 155. Pomocí kulového osazení pro eliminaci nerovnoměrného zatížení se působí na sestavu dle obr. 156 silou ve směru šipky. Po zahájení zkoušky je vnášena síla definovanou rychlostí 2 kN.s⁻¹ až po sílu F_{SPmax} , jejíž hodnota vychází z kategorie systému upevnění a pro případ konvenční železnice a VRT je uvedena v tab. 22. Poté je síla snížena na předpokládané stálé statické zatížení, které na podložku reálně vyvozují svěrky. Tato

síla je označována jako F_{SP1} a její velikost je rovněž uvedena v tab. 22. Stejný cyklus zatížení a odtížení se opakuje následně ještě dvakrát. Po realizaci celkem 3 cyklů zatížení a odtížení se udržuje síla F_{SP1} a zaznamená se posunutí a následně se síla zvýší na F_{SP2} , což je spočítá jako $0,8 \cdot F_{SPmax}$, a při této síle se zaznamená opět posunutí.



Obr. 156 Uspořádání zkoušky podložky. [91]

Posunutí při definovaných silách se zaznamenává na všech třech instalovaných snímačích. Pokud se jedna z hodnot posunutí měřených snímačů odlišuje o více než 20 %, je zkouška prohlášena za neplatnou, neboť tato skutečnost značí, že nebyla působící síla správně vycentrována a došlo ke klopení roznášecí desky. Statická tuhost se pak vypočte dle následující rovnice:

$$k_{SP} = \frac{F_{SP2}[kN] - F_{SP1}[kN]}{d_{SP}[mm]} [kN \cdot mm^{-1}] \quad (135)$$

kde symbol d_{SP} zastupuje střední hodnotu posunutí.

6.1.3.3 Nízkofrekvenční dynamická zkouška podložky

Při nízkofrekvenční dynamické zkoušce (tzn. v rozsahu frekvencí od 3 Hz do 30 Hz) je sestava pro zkoušku podložky stejná jako při zkoušce statické, viz obr. 156. Zkušební síly vycházejí opět z normy [96], resp. jsou uvedeny pro konvenční tratě a VRT v tab. 22. Na zkušební sestavu se působí cyklickou silou v rozmezí F_{LFP1} po F_{LFP2} , kde $F_{LFP2} = 0,8 \cdot F_{LFPmax}$. Nejprve se po dobu 10 s působí při zkušební frekvenci 1 Hz, aby se zkušební sestava ustálila. Následuje zkouška při definovaných frekvencích, a to buď při definované frekvenci zákazníkem nebo, pokud není definována konkrétní frekvence, při následujících třech zkušebních frekvencích:

- (5 ± 1) Hz;
- (10 ± 1) Hz;

– (20 ± 1) Hz.

Při každé frekvenci se po 10 s vnášení cyklické síly zaznamenává působící síla a příslušné posunutí po minimálně 10 cyklů při minimálně 20 vzorcích na cyklus. Následně se vypočítá průměrné posunutí d_{LFP} při každé frekvenci. Opět platí pravidlo, že se nesmí odchýlovat žádná z hodnot měřených posunutí o více než 20 %, jinak je zkouška považována za neplatnou. Dynamická tuhost se pak spočítá podle následujícího vztahu:

$$k_{LFPf} = \frac{F_{LFP2}[kN] - F_{LFP1}[kN]}{d_{LFP}[mm]} [kN \cdot mm^{-1}] \quad (136)$$

kde k_{LFPf} je dynamická tuhost pro příslušnou měřenou frekvenci. Pokud je požadována obecná hodnota nízkofrekvenční dynamické tuhosti ($k_{LFPmean}$), je to pak průměr z jednotlivých dílčích dynamických tuhostí k_{LFP} při frekvencích (5 ± 1) Hz (tzn. k_{LFP5}), (10 ± 1) Hz (tzn. k_{LFP10}) a (20 ± 1) Hz (tzn. k_{LFP20}), tedy matematicky:

$$k_{LFPmean} = \frac{k_{LFP5} + k_{LFP10} + k_{LFP20}}{3} [kN \cdot mm^{-1}] \quad (137)$$

6.1.3.4 Zkouška sestavy upevnění

Obdobným způsobem, jako byl výše uveden postup pro měření podložek samotných, lze zkoušet i celou sestavu upevnění. Pro laboratorní zkoušky se použije celé upevnění tak, jak je použito reálně v trati. Systém upevnění se namontuje na segment kolejnicové podpory, pro kterou je určen. Tímto segmentem může být i část konstrukce nosného prvku pevné jízdní dráhy. Do systému upevnění se pak použije i část kolejnice, pro kterou je systém upevnění určen.

Následující postup je pak v zásadě stejný jako při určování tuhosti podložky. Základní rozdíl je pouze v použitých silách, které se použijí s indexy „A“ (jako „assembly“ – sestava) namísto „P“ (jako „pad“ – podložka). Tyto síly jsou rovněž uvedeny v tab. 22. Za zmínku stojí rozdíl v předpínací síle F_{SP1} (pro podložku), resp. F_{SA1} (pro sestavu). Jak bylo uvedeno výše, předpínací síla pro zkoušku podložky je předepsána na 18 kN, což vychází z předpokladu, že na podložku bude působit síla (předepnutí) od svěrek. Při zkoušce celé sestavy je ale tato síla pouze v hodnotě 1 kN, jelikož svěrky jsou reálně obsaženy ve zkušebním vzorku, takže i toto předpětí reálně působí na podložku.

Dalším rozdílem v provedení zkoušky sestavy oproti zkoušce podložky samotné je užití čtyřech nezávislých snímačů posunutí (namísto třech u zkoušky podložky), které se umístí do čtyřech rohů úložné plochy systému upevnění na patu kolejnice.

Opět platí zásada, že se nesmí měřené hodnoty snímači odchylvat o 20 % od střední hodnoty posunutí.

6.2 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

V rámci této disertační práce byly provedeny následující laboratorní zkoušky tuhosti podložek:

- užitá podložka systému upevnění KSN 20;
- nová podložka systému upevnění KSN 20;

a dále je připravována zkouška celých systémů upevnění srdcovkové části vysokorychlostní výhybky.

V rámci sledování zkušebního úseku výhybek se zpružněným upevněním v žst. Ústí nad Orlicí (viz kap. 4) bylo rozhodnuto také o vytěžení a laboratorním odzkoušení podložky z nově navržené zpružněné kluzné stoličky KSN 20 po 3 letech provozu. Cílem bylo zjistit, k jaké změně z hlediska tuhosti za 4 roky u podložky došlo. Byly zkoušeny obě alternativy podložek, jak podložka z pryže („Renogum“), tak podložka z materiálu Cellentic®.

Měření užitých i nových podložek byla prováděna v laboratoři VUT, přičemž jak na měření, tak na vyhodnocení spolupracovali kolegové z VUT²³.

6.2.1 Zkoušky nových podložek systému upevnění KSN 20

V návaznosti na laboratorní zkoušky užitých podložek ze zpružněných výhybek byly zároveň provedeny i laboratorní zkoušky podložek nepoužitých ze skladu. Tyto podložky nebyly přímo nové v pravém slova smyslu, jelikož byly vzaty ze skladu, kde byly od doby výroby zpružněných výhybek do žst. Ústí nad Orlicí, tzn. od roku 2014. Tato skutečnost může mít vliv zejména u pryže, jelikož pryž mění své mechanické vlastnosti v čase a z hlediska tuhosti má tendenci tvrdnou (tedy zvětšovat tuhost), viz kap. 2.4.1. Tato skutečnost byla vzata v potaz, a proto bylo provedeno následně i porovnání s výsledky laboratorních zkoušek realizovaných v minulosti. Výsledky laboratorních zkoušek těchto nepoužitých podložek poslouží zejména pro porovnání s podložkami užitými, které byly zkoušeny zároveň při stejných podmínkách na stejném zkušebním stavu. To má výhodu v tom, že je eliminován vliv různých laboratoří do výsledků měření. Podložky pro laboratorní zkoušky byly označeny následujícím způsobem:

- RGS 1 N (Podložka KSN Renogum ze skladu vzorek č. 1 nepoužitá)
- RGS 2 N (Podložka KSN Renogum ze skladu vzorek č. 2 nepoužitá)

²³ prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D. a Ing. Miroslava Hruzíková, Ph.D.

- RGS 3 N (Podložka KSN Renogum ze skladu vzorek č. 3 nepoužitá)
- RGS 4 N (Podložka KSN Renogum ze skladu vzorek č. 4 nepoužitá)
- KSN S 1 (Podložka KSN Vossloh Cellentic® ze skladu vzorek č. 1 nepoužitá)
- KSN S 2 (Podložka KSN Vossloh Cellentic® ze skladu vzorek č. 1 nepoužitá)
- KSN S 3 (Podložka KSN Vossloh Cellentic® ze skladu vzorek č. 1 nepoužitá)

Tab. 23 Výsledky laboratorních zkoušek statické tuhosti nepoužitých podložek KSN (Renogum a Cellentic®).

Podložka	Stlačení pro 18 kN [mm]	Stlačení pro 68 kN [mm]	Statická tuhost [kN.mm ⁻¹]	Výsledná statická tuhost [kN.mm ⁻¹]	Maximální zatlačení [mm]
RGS 1 N	0,7	1,0	171,2	185,1	1,1
	0,8	1,1	183,0		
	0,8	1,0	203,9		
RGS 2 N	1,7	2,0	152,5	193,3	2,1
	0,4	0,6	234,8		
	0,3	0,6	212,6		
RGS 3 N	0,7	1,0	197,6	191,7	1,1
	0,8	1,1	162,8		
	0,7	0,9	224,8		
RGS 4 N	0,7	1,0	171,5	185,4	1,1
	0,6	0,9	201,2		
	0,8	1,0	185,7		
KSN S 1	1,2	2,0	64,9	66,5	2,1
	1,2	2,0	65,0		
	1,3	2,0	69,7		
KSN S 2	1,2	2,0	66,4	70,6	2,1
	1,0	1,6	72,7		
	1,2	1,9	73,1		
KSN S 3	1,1	1,9	65,1	69,2	2,0
	0,8	1,5	71,0		
	1,1	1,8	71,7		

Z výše uvedených výsledků vyplývá následující. První na první pohled patrný rozdíl je v tuhosti podložek Renogum a Cellentic®. Zatímco podložky Renogum mají průměrnou statickou tuhost 188,9 kN.mm⁻¹, podložky Cellentic® mají 68,76 kN.mm⁻¹. Tuhost podložek Renogum i Cellentic® koresponduje s původními hodnotami tuhostí, které byly zjištěny při zkouškách hned po vyrobení, resp. z atestu výrobce. Podložka Renogum byla zkušena po vyrobení v roce 2014 ve VÚD v Žilině [138], přičemž byla zjištěna statická tuhost 147,49 kN.mm⁻¹. Nyní měřená hodnota 188,9 kN.mm⁻¹ je sice větší, ale zvýšení tuhosti lze přisuzovat přirozené vlastnosti pryže, jejíž tuhost se v čase zvětšuje. U podložky Cellentic® je k dispozici přímo atest výrobce

Vossloh [139], který obsahuje výsledky zkoušky tuhosti ihned po vyrobení. Toto měření je sice provedeno metodikou DBS, ale i tak se hodnotou $88,9 \text{ kN.mm}^{-1}$ velmi blíží hodnotě nyní změřené dle EN. Na základě porovnání výsledků ze zkoušek tuhosti v minulosti a nyní lze tedy považovat zkoušku za validní, přičemž u pryžových podložek Renogum je nezbytné mít na paměti faktor času.

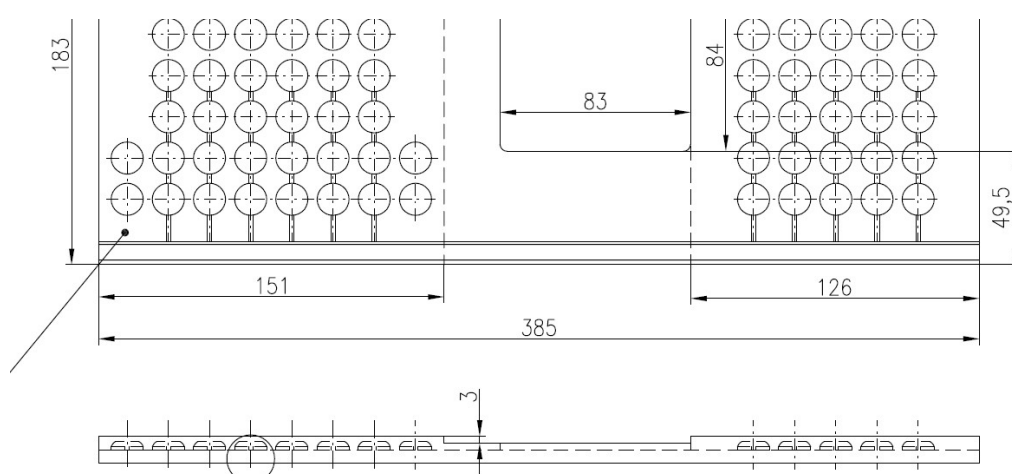
Tab. 24 Výsledky laboratorních zkoušek dynamické tuhosti nepoužitých podložek KSN (Renogum a Cellentic®).

Podložka	Stlačení pro 5 Hz [mm]	Stlačení pro 10 Hz [mm]	Stlačení pro 20 Hz [mm]	Průměrné stlačení [mm]	Dynamická tuhost [kN.mm ⁻¹]	Výsledná dynamická tuhost [kN.mm ⁻¹]
RGS 1 N	0,24	0,23	0,21	0,22	224,2	237,6
	0,23	0,23	0,19	0,22	229,5	
	0,20	0,20	0,18	0,19	259,3	
RGS 2 N	0,27	0,26	0,24	0,21	241,4	263,5
	0,16	0,14	0,12	0,19	261,2	
	0,19	0,17	0,12	0,17	287,9	
RGS 3 N	0,20	0,18	0,15	0,21	241,5	255,4
	0,25	0,25	0,22	0,20	246,3	
	0,18	0,17	0,16	0,18	278,4	
RGS 4 N	0,24	0,22	0,22	0,23	219,7	237,9
	0,20	0,18	0,17	0,21	238,8	
	0,24	0,22	0,21	0,20	255,2	
KSN S 1	0,73	0,69	0,68	0,72	69,8	74,6
	0,73	0,70	0,68	0,68	73,6	
	0,68	0,64	0,66	0,67	80,4	
KSN S 2	0,72	0,67	0,65	0,68	73,1	79,4
	0,67	0,64	0,60	0,64	77,8	
	0,66	0,61	0,61	0,62	87,3	
KSN S 3	0,71	0,68	0,66	0,68	73,3	78,7
	0,67	0,64	0,59	0,65	76,5	
	0,67	0,63	0,62	0,63	86,3	

Laboratorní zkouška dynamické tuhosti týchž vzorků podložek jako v předchozím případě ukázala následující skutečnosti. Dynamická tuhost pryžových podložek Renogum byla průměrně $248,6 \text{ kN.mm}^{-1}$. Při zkoušce po vyrobení [138] vycházela dynamická tuhost podložek $249,3 \text{ kN.mm}^{-1}$, rozdíl je tedy zanedbatelný. Dále lze vysledovat velký nárůst dynamické tuhosti oproti tuhosti statické, která byla průměrně $188,9 \text{ kN.mm}^{-1}$. Poměr mezi statickou a dynamickou tuhostí pryžové podložky Renogum je 1,3. Co se týče podložek produkce Vossloh z materiálu Cellentic®, vyšla dynamická tuhost průměrně $77,6 \text{ kN.mm}^{-1}$. Dynamická tuhost po vyrobení nebyla měřena. Porovnáme-li dynamickou tuhost ku statické, která vyšla

u podložek Cellentic® $68,76 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, je součinitel 1,12, což téměř souhlasí s hodnotou deklarovanou výrobcem (tj. 1,1, viz kap. 2.4.2).

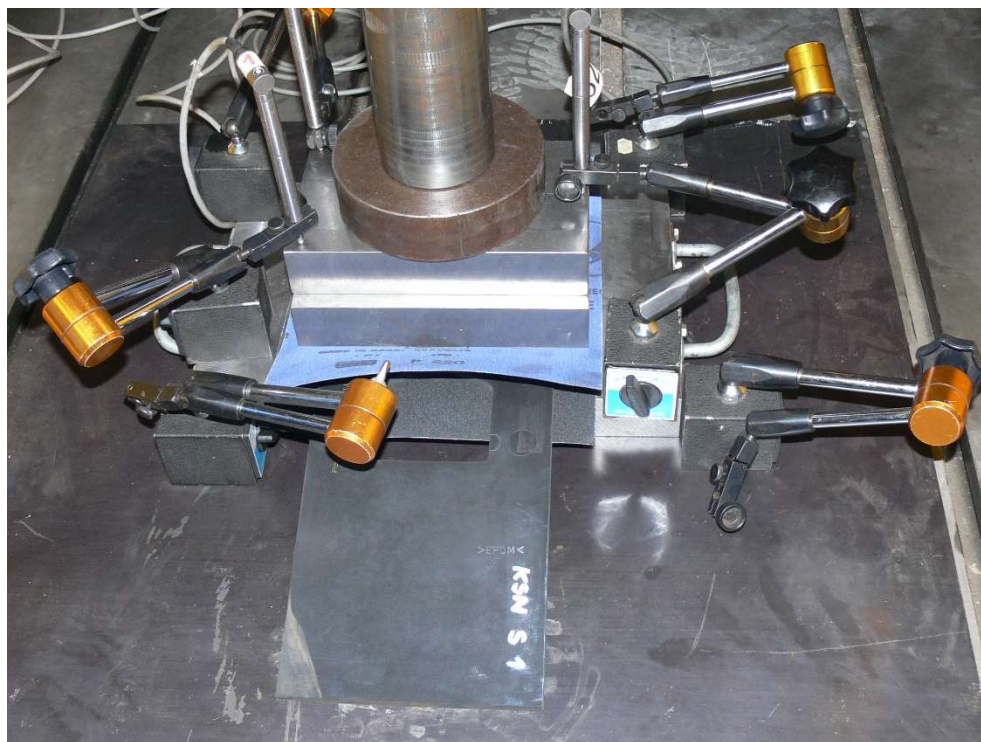
Na následujícím obr. 158 je vidět sestava při zkoušce podložky Renogum. Patrné jsou všechny prvky sestavy, které předepisuje evropská norma. Podstatná věc, kterou lze vypožorovat z obrázku, je velikost kontaktní plochy, která velmi úzce souvisí s výsledky tuhosti (tuhost je nezbytné vztahovat k referenční zatěžovací ploše). Půdorysný rozměr bloku je $150 \times 210 \text{ mm}$. Vzhledem k tvaru podložky, která je ale výškově proměnná, ve střední části podložky je nefunkční část podložky o 3 mm snížena, viz obr. 157. Skutečnou zatěžovací plochu lze pak uvažovat v hodnotě $151 \times 150 \text{ mm}$, což v zásadě odpovídá reálné zatěžovací ploše, kterou působí kolejnice na podložku.



Obr. 157 Základní rozměry podložky KSN Renogum (výřez z výkresu). [140]



Obr. 158 Sestava laboratorní zkoušky tuhosti nové podložky Renogum.



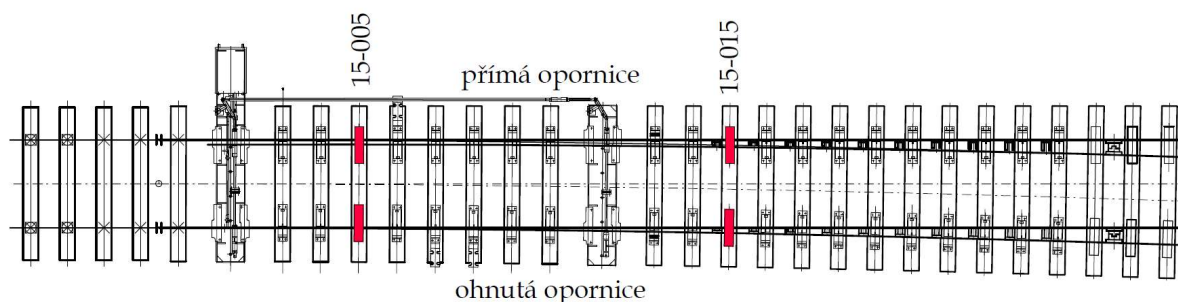
Obr. 159 Sestava laboratorní zkoušky tuhosti nové podložky Cellentic®.

Předchozí obr. 159 ukazuje pak zkušební sestavu při zkoušce tuhosti podložky Cellentic®. Jak lze vidět při porovnání s obr. 158, zatěžovací deska byla orientována napříč. Z hlediska zatěžovací plochy je ale tato orientace zatěžovací desky správná, jelikož reprezentuje stejnou polohu kolejnice jako v reálném systému upevnění. Přitom je zatěžovací plocha 150 x 160 mm. V zásadě tedy koresponduje s předcházejícím případem zkoušky podložky Renogum.

6.2.2 Zkoušky užitých podložek systému upevnění KSN 20

Po 3 letech provozu zkušebních výhybek se zpružněnými systémy upevnění bylo přistoupeno k vytipování, vytěžení a laboratornímu odzkoušení užitých podložek v kluzných stoličkách KSN 20. Podložky byly vyjmuty v květnu roku 2017. Byly vybrány následující podložky (viz obr. 160). Vždy byly vytěženy podložky z obou systémů upevnění umístěných na jednom pražci. Nejprve byl vybrán pražec č. 15-005, jelikož se jedná o místo, kde je kolo neseno ještě plně opornicí (před místem přechodu kola z opornice na jazyk). U těchto podložek byla zaměřena pozornost na oblast pod opornicí. Jako druhé místo pro vytěžení byl vybrán pražec 15-015. Zde se jedná naopak o místo, kde je již ve většině případů kolo neseno z větší části jazykem (v případě přilehlého jazyka k opornici). Byla zde tedy soustředěna pozornost na oblast podložky pod kluznou deskou. Tyto podložky byly vytěženy ve stejném místě jak pod výhybkou č. 2, kde byly použity podložky Cellentic®, tak pod výhybkou č. 3, kde jsou užity pryžové podložky Renogum. Vytěžené podložky byly označeny následujícím způsobem:

- 15-005 OO 2: pražec č. 15-005, ohnutá opornice, výh. č. 2 (Cellentic);
- 15-005 PO 2: pražec č. 15-005, přímá opornice, výh. č. 2 (Cellentic);
- 15-015 OO 2: pražec č. 15-015, ohnutá opornice, výh. č. 2 (Cellentic);
- 15-015 PO 2: pražec č. 15-015, přímá opornice, výh. č. 2 (Cellentic);
- 15-005 OO 3: pražec č. 15-005, ohnutá opornice, výh. č. 3 (Renogum);
- 15-005 PO 3: pražec č. 15-005, přímá opornice, výh. č. 3 (Renogum);
- 15-015 OO 3: pražec č. 15-015, ohnutá opornice, výh. č. 3 (Renogum);
- 15-015 PO 3: pražec č. 15-015, přímá opornice, výh. č. 3 (Renogum).



Obr. 160 Podložky vybrané pro vytěžzení a lab. zkoušení

Laboratorní zkoušky byly provedeny dle výše uvedené metodiky podle evropské normy ČSN EN 13 146-9+A1. Všechny podložky byly podrobeny zkoušce statické tuhosti a nízkofrekvenční dynamické zkoušce tuhosti pro frekvence 5 Hz, 10 Hz a 20 Hz. Měření bylo realizováno v hydraulické zatěžovací soustavě FA 120 - 2000 M01, s maximální silou lisu 120 kN. Pro měření posunutí byly použity tři indukční snímače typu WA-10-T, s měřicím rozsahem 10 mm. Snímače byly uchyceny magnetickým stojánkem na ocelovou desku mimo měřený vzorek tak, aby bylo měřeno přímo samotné stlačení podložky. Jak předepisuje norma, byla zkoušená podložka vložena mezi dva kusy brusného plátna. Bylo použito brusné plátno P220 (norma předepisuje P180 až P400). Provedení zkoušky přesně korespondovalo s metodikou uvedenou v kap. 6.1.3. Výsledky byly následující (viz tab. 25 a tab. 26).

Tab. 25 Výsledky laboratorních zkoušek statické tuhosti užitých podložek KSN (Renogum a Cellentic)

Podložka	Stlačení pro 18 kN [mm]	Stlačení pro 68 kN [mm]	Statická tuhost [kN.mm ⁻¹]	Výsledná statická tuhost [kN.mm ⁻¹]	Maximální zatlačení [mm]
15-005 OO 2	1,1	1,8	71,0	74,2	1,9
	1,1	1,7	75,7		
	1,2	1,9	76,1		
15-005 PO 2	1,4	2,1	67,5	70,4	2,2
	1,4	2,1	70,4		
	1,0	1,7	73,5		
15-015	1,2	1,9	68,2	69,6	2,0

OO 2	1,2	1,9	71,6		
	1,1	1,8	69,0		
15-015 PO 2	1,5	2,3	70,0	72,3	2,3
	1,3	2,0	74,8		
	0,9	1,6	72,2		
15-005 OO 3	1,0	1,3	227,0	270,6	1,3
	0,7	0,9	304,4		
	0,8	0,9	294,5		
15-005 PO 3	0,7	0,9	226,6	265,4	1,1
	0,8	1,0	284,8		
	0,9	1,1	296,0		
15-015 OO 3	1,2	1,4	253,1	256,7	1,5
	0,5	0,7	263,9		
	0,6	0,8	253,4		
15-015 PO 3	0,8	1,0	204,4	264,4	1,1
	0,7	0,8	331,3		
	0,7	0,8	291,1		

Tab. 26 Výsledky laboratorních zkoušek dynamické tuhosti užitých podložek KSN (Renogum a Cellentic)

Podložka	Stlačení pro 5 Hz [mm]	Stlačení pro 10 Hz [mm]	Stlačení pro 20 Hz [mm]	Průměrné stlačení [mm]	Dynamická tuhost [kN.mm ⁻¹]	Výsledná dynamická tuhost [kN.mm ⁻¹]
15-005 OO 2	0,66	0,63	0,60	0,64	78,3	84,8
	0,62	0,59	0,57	0,60	82,5	
	0,63	0,60	0,56	0,58	93,6	
15-005 PO 2	0,71	0,67	0,66	0,68	73,7	78,7
	0,68	0,65	0,65	0,65	77,0	
	0,65	0,62	0,59	0,63	85,4	
15-015 OO 2	0,69	0,66	0,64	0,68	0,68	78,8
	0,66	0,62	0,63	0,65	0,65	
	0,68	0,65	0,65	0,64	0,64	
15-015 PO 2	0,64	0,61	0,51	0,65	76,7	84,0
	0,65	0,62	0,58	0,62	80,4	
	0,66	0,63	0,61	0,57	94,8	
15-005 OO 3	0,18	0,18	0,17	0,15	325,6	360,5
	0,13	0,12	0,09	0,14	350,8	
	0,15	0,13	0,11	0,12	405,2	
15-005 PO 3	0,18	0,17	0,16	0,16	321,8	349,7
	0,14	0,12	0,10	0,15	343,5	
	0,15	0,14	0,12	0,13	383,8	
15-015 OO 3	0,15	0,13	0,09	0,15	339,0	421,8
	0,14	0,12	0,10	0,13	388,9	
	0,15	0,13	0,09	0,09	537,5	
15-015 PO 3	0,16	0,15	0,12	0,15	343,3	402,8
	0,13	0,12	0,10	0,13	382,8	
	0,14	0,13	0,09	0,10	482,3	

Z výše uvedených výsledků užitých podložek Renogum a Cellentic® lze učinit následující závěry. Průměrná hodnota statické tuhosti podložek Cellentic® byla zjištěna ve výši $71,63 \text{ kN.mm}^{-1}$. Porovnáme-li hodnotu s podložkou nepoužitou, zjistíme, že nárůst je zanedbatelný (statická tuhost nepoužité byla $68,76 \text{ kN.mm}^{-1}$), cca 4 %. U dynamické tuhosti je pak pozorován předpokládaný nárůst tuhosti, průměrná hodnota je $81,56 \text{ kN.mm}^{-1}$. Pokud porovnáme statickou a dynamickou tuhost užitých podložek, bude poměr 1,14. To lze považovat stále za velmi dobrý poměr, který se i po 3 letech provozu blíží hodnotě deklarované výrobcem. Nárůst v dynamické tuhosti po 3 letech provozu byl pak cca 5 %, tedy o 1 % větší než u tuhosti statické, což je hodnota zcela zanedbatelná, ale předpokládaná, tento stav souvisí s velmi pozvolnou ztrátou dynamických vlastností vlivem provozu.

U podložek Renogum je pak situace zcela odlišná. Průměrná hodnota statické tuhosti užitých podložek byla $264,28 \text{ kN.mm}^{-1}$ (srov. s hodnotou nepoužitých, tj. $188,9 \text{ kN.mm}^{-1}$) a hodnota dynamické tuhosti dokonce $383,7 \text{ kN.mm}^{-1}$ (srov. s hodnotou nepoužitých, tj. $248,6 \text{ kN.mm}^{-1}$), nárůst je tedy značný, což ze znalosti chování materiálu pryže bylo rovněž očekáváno. Nárůst statické tuhosti je 40 % a dynamické tuhosti je 55 %. Rovněž poměr mezi tuhostí statickou a dynamickou se u užitých podložek zvětšil z hodnoty 1,3 u neužitých podložek na hodnotu 1,45 u vytěžených.

Z hlediska rozměrové stálosti bylo pozorováno po vytěžení roztlačení podložek pod nejvíce namáhanými místy u obou typů, přičemž roztlačení pryžové podložky Renogum bylo vizuálně hodnoceno jako významnější ve srovnání s podložkou Cellentic®. Bylo také pozorováno roztlačení v různých místech podle toho, odkud byla podložka vytěžena. Jak lze vidět i z ilustrativních obrázků ze sestav zkoušek (např. obr. 161), podložky byly zkoušeny v místě opornice. Vzhledem k tomu, že je výhybka pojížděna převážně v přímém směru a podél výměňové části se poloha jazyka oddaluje od opornice, je logické, že vzdálenější kluzné stoličky od začátku výhybky budou pod ohnutou opornicí pojížděnou v menší míře vykazovat menší deformace. Tuto skutečnost lze pozorovat také z výsledků měření (zejména ze statické tuhosti, viz tab. 25), kde jsou hodnoty tuhosti v místě 15-015 OO vždy nejmenší a více se blíží původní hodnotě.



Obr. 161 Sestava lab. zkoušky tuhosti užitá podložky KSN Renogum.

Na základě porovnání obou typů podložek lze učinit následující závěry a zhodnocení. Po materiálové stránce se potvrdilo, že lepším materiálem pro podložky do zpružněných systémů upevnění jsou zpěněné polyuretany, tj. např. materiál Cellentic® užitý v tomto případě. Existuje mnoho výrobců pružných podložek, kteří dodávají výrobky na podobné bázi (zpěněné polyuretany, např. materiál Sylodyn® od fy Getzner, viz kap. 2.4), lze předpokládat, že by chování bylo podobné. Rovněž půdorysná deformace vycházející z nestejnoměrného zatížení byla pozorována v menší míře. Je nutné ale zmínit, že lepší materiálové chování je vykoupeno vyšší cenou za pružné prvky vyrobené ze zpěněných polyuretanů.

Přez se chovala dle předpokladu hůře. Po 3 letech provozu byl značný nárůst tuhosti a rovněž se více prohloubil rozdíl mezi dynamickou a statickou tuhostí. Rovněž došlo k větší půdorysné deformaci podložky v exponovaných místech. Vzhledem k výše uvedenému nelze pro optimalizaci tuhosti ve výhybce doporučit tyto podložky, jelikož vlivem provozu značně mění své vlastnosti. Pokud se ale přepokládá použití podložky do zpružněného systému upevnění v další vrstvě, tj. např. některé systémy upevnění pod srdcovku PHS ve vysokorychlostní výhybce (viz kap. 5.1.1) nebo v systémech upevnění vycházejících ze systému Vossloh 336 (viz kap. 2.3.1), je vhodnější použít podložku pod patu kolejnice (resp. odlitek srdcovky, opornici apod.) tužší, jelikož samotné řízení tuhosti se děje v další pružné vrstvě a tato podložka pouze sjednocuje tuhost na opornici a na jazyku při přechodu kola.

6.2.3 Diskuze výsledků laboratorního zkoušení

V žst. Ústí nad Orlicí probíhá provozní ověřování výhybek se zpružněním v uzlu upevnění. Mimo sledování a hodnocení globálního chování výhybek ve vztahu k projeté zátěži byl rovněž sledován vývoj stavu zpružněných uzlů upevnění. Za tímto účelem bylo přistoupeno k vytěžení a laboratornímu zkoušení pružných podložek ze systémů upevnění, jelikož se jedná o zásadní prvek, který má vliv na tuhost systému upevnění. Po 3 letech provozu bylo vytěženo celkem 12 podložek KSN z kluzných stoliček KSN 20, při čemž 6 podložek z výhybky č. 2 (materiál Cellentic®) a 6 podložek z výhybky č. 3 (materiál pryž Renogum).

Provedené laboratorní zkoušky potvrdily předpoklad, že pryžové podložky jsou z hlediska dlouhodobého udržení materiálových charakteristik nevhodné pro použití ve zpružněných uzlech upevnění. Již po 3 letech provozu bylo zaznamenáno zvýšení tuhosti o 40 až 50 %. V těchto výhybkách se tedy zásadně odchyluje poklesová křivka podél výhybky (resp. tuhost kolejové jízdní dráhy) od teoretického výpočtu za poměrně krátkou dobu. Naopak podložky z materiálu Cellentic® vykazaly po 3 letech provozu značnou stálost, a to jak z hlediska tvaru, tak z hlediska materiálových charakteristik. Nárůst tuhosti je pouze v řádu 4 až 5 %, což lze považovat za zcela akceptovatelné. Při budoucí instalaci výhybek se zpružněním v uzlu upevnění je tedy na základě výsledků doporučeno použití podložek buď z osvědčeného materiálu Cellentic® nebo z obdobného materiálu dodávaného jinými výrobci (např. Sylodyn® fy Getzner).

6.2.4 Výhled laboratorního zkoušení systémů upevnění vysokorychlostní výhybky

V návaznosti na výpočet optimalizace tuhosti vysokorychlostní výhybky popsany v kap. 5.2.3 (Výsledný návrh úprav do stávajících systémů upevnění vysokorychlostní výhybky) a návrh tuhosti a tvaru podložek čtyřech vybraných systémů upevnění srdcovky, konkrétně na pražcích 19-186, 19-190, 19-193 a 19-198, je v současné době připravována laboratorní zkouška systémů upevnění dle metodiky popsané v kap. 6.1.3.4. Pro tyto zkoušky byly před šrotací původní srdcovky vzorku vysokorychlostní výhybky instalovaného v DT uchovány nařezané segmenty srdcovky nad těmito vybranými systémy upevnění z důvodu, aby mohla proběhnout zkouška s adekvátním konstrukčním prvkem, který spočívá na příslušném systému upevnění. Tím bude docíleno simulace stavu, který se bude velmi blížit reálnému způsobu zatěžování a deformace jednotlivých prvků. Je v plánu zkoušky provést v průběhu roku 2022.

7 SOUHRN VÝSLEDKŮ

Disertační práce byla rozdělena na následující oblasti zájmu, které měly definovány jasné cíle vzešlé z postupu výzkumu a vývoje v oblasti optimalizace tuhosti ve výhybkách prostřednictvím zpružnění v systému upevnění. Jednalo se o následující dílčí cíle:

- zhodnocení zkušebního úseku se zpružněnými výhybkami;
- určení statické a dynamické odezvy vysokorychlostní výhybky;
- návrh konstrukčního řešení zpružnění VR výhybky;
- laboratorní zkoušky prvku systému upevnění zpružněné výhybky.

V roce 2014 bylo započato se sledováním zkušebního úseku v žst. Ústí nad Orlicí, kam byly vloženy v rámci provozního ověřování první dvě nově vyvinuté výhybky s optimalizovanou tuhostí kolejové jízdní dráhy, která vznikla za předcházejícího projektu [46–49]. Na zkušebním úseku pak probíhalo jak **vlastní měření, na které je zaměřena tato disertační práce (nivelace, 3D skenování pojížděných ploch, vyhodnocení dat měřicího vozu)**, tak měření, které prováděly všechny spolupracující instituce (měření VUT, UPCE a ČVUT). **Disertační práce pak shrnuje dohromady všechny dostupné výsledky měření**, a to jak vlastních, tak spolupracujících institucí. Lze říci, že rozsah sledování tohoto zkušebního úseku neměl do této doby obdoby z hlediska množství sledovaných veličin, a to od železničního spodku až po vozidlo. U většiny měření se prokázalo lepší chování u výhybek se zpružněním, pouze některé veličiny byly vyhodnoceny v neprospěch zpružněných výhybek. Některé veličiny pak vycházely obdobně u obou výhybek, což lze rovněž považovat za přínosné zjištění.

V návaznosti na prokázání přínosu zpružnění u standardních výhybek (pro koridorové tratě), započalo řešení zpružnění pro výhybky vysokorychlostní, která mají jistá specifika. Hlavním rozdílem z hlediska tuhosti je srdcovka. Ta je řešena konstrukčně s pohyblivým hrotem uloženým v odlévaném rámu. Bylo potřeba zjistit, jaká bude statická a dynamická odezva vysokorychlostní výhybky, tedy jaká bude tuhost. Proto byl **přípraven podrobný 3D model**, který byl následně předán za účelem provedení výpočtu, což bylo **vlastním příspěvkem** v rámci této části. Výsledkem samotného FEM výpočtu, který zprostředkovalo VUT, byl průběh tuhosti kolejové jízdní dráhy ve výhybce, který byl dle očekávání velice podobný standardním konvenčním výhybkám. Následně byl tedy učiněn **vlastní předběžný návrh konstrukčního řešení pro optimalizaci tuhosti** a na základě tohoto návrhu byl proveden opětovný výpočet provedený na VUT, jehož hlavním výstupem bylo určení potřebného modulu pružnosti podložek do systémů upevnění tak, aby byla efektivně optimalizovaná tuhost jízdní dráhy. V dalším kroku bude potřeba nechat vyrobit typické uzly upevnění srdcovky a provést laboratorní zkoušky tak, aby byl výpočet zvalidován.

Po třech letech provozního ověřování bylo potřeba zjistit, v jakém stavu jsou uzly upevnění na zkušebním úseku v žst. Ústí nad Orlicí, resp. zda ještě plní svoji funkci zpružnění a tím optimalizaci tuhosti jízdní dráhy. Byly tedy **vytěženy vybrané podložky** a nachystány referenční nové podložky z těchto systémů upevnění a **připravena metodika laboratorních zkoušek** dle příslušných norem, což bylo **vlastním přínosem** v této části práce. Samotné laboratorní zkoušky za osobní asistence provedlo VUT. Snahou bylo také porovnat různé materiály, které byly na zkušebním úseku použity. Jednalo se o rozdílné podložky v kluzných stoličkách KSN 20, výhybka č. 3 měla pryžové o firmy Renogum, výhybka č. 2 měla podložky z materiálu Cellentic® od firmy Vossloh. Jednoznačně se prokázala větší stálost podložek vyrobených z materiálu Cellentic® oproti podložkám pryžovým dodaných formou Renogum. U pryžových podložek se potvrdila jejich nevýhoda stárnutí v čase projevující se ztrátou pružnosti. Do výhybek vysokorychlostních lze jednoznačně doporučit z dlouhodobého hlediska použití podložek z moderních materiálů (Cellentic®, Sylodyn® apod.).

7.1 STANOVENÍ ZÁSAD PRO KONSTRUKCI VÝHYBEK VEDOUČÍCH KE SNÍŽENÍ DYNAMICKÉHO NAMÁHÁNÍ

V návaznosti na výše uvedený provedený výzkum a vývoj bylo dosaženo hlavního cíle práce, který zní „**stanovení zásad pro konstrukci výhybek a výhybkových konstrukcí, které vedou ke snižování dynamického namáhání konstrukce koleje**“. Níže jsou uvedeny poznatky, které by bylo vhodné na základě provedeného výzkumu následovat při budoucím návrhu výhybek a výhybkových konstrukcí pro vysoké rychlosti, tj. pro vysokorychlostní trati, resp. rychlá spojení, s jejichž stavbou bude započato ve střednědobém horizontu i v České republice.

1. Výzkum (jak vlastní, tak převzatý od spolupracujících institucí) na zpružněných výhybkách vložených k provoznímu ověřování do žst. Ústí nad Orlicí prokázal **obecně přínos návrhu zpružnění v upevnění na výhybkách**, a to zejména v míře sedání jednotlivých částí výhybek a v dynamické odezvě měřené na lokomotivě. U některých parametrů nebylo prokázáno vyložení lepší chování, nebylo ale ani zjištěno významně horší chování. Vzhledem k relativně nízkým rychlostem projíždějících vozidlech v žst. Ústí nad Orlicí (rychlíky 130 km.h⁻¹, jednotky s naklápěcí skříní 160 km.h⁻¹) lze předpokládat, že při vyšších rychlostech by byly přínosy větší.
2. Použití **zpružnění pod pevnou srdcovku** se ukázalo v jistých parametrech přínosné (např. vývoj sedání), ale na pojížděné plochy se neprokával významný efekt zpružnění. To souvisí především s teorií rázových sil P_1 a P_2 , kdy na mnohem větší sílu P_1 (oproti P_2) působící krátkodobě na pojížděnou plochu nemá vliv tuhost podloží. Z hlediska použití zpružnění v pevných srdcovkách by bylo

potřeba **provést další sledování**, zda by případné globální benefity vyrovnaly zjištěné nedostatky v míře opotřebení srdcovek. Z hlediska vysokorychlostních tratí nejsou pevné srdcovky ale stejně relevantním konstrukčním řešením.

3. Naopak u zpružnění **srdcovky s pohyblivým hrotem** lze předpokládat větší přínosy. Přechod kola z jazyka na opornici je v tomto případě velice podobný přechodu ve výměnové části výhybky. V tomto případě je potřeba provést další výzkum z hlediska opotřebení pojížděných ploch.
4. Řídit tuhost ve výhybkách lze i pomocí **podpražcových podložek**, jejichž aplikace se stává v kolejích s vyššími rychlostmi standardem. Podpražcové podložky ale nevyřeší problém tuze uloženého jazyka na kluzné ploše, tzn. že i v případě globálního zpružnění pomocí podpražcových podložek zůstane ve výhybce při přechodu kola tato tuhostní disproporce. Proto se dá považovat za **vhodné řešení použití navržené kluzné stoličky výrobce DT typu KSN 20 i v kombinaci s podpražcovými podložkami**, které vyřeší optimalizaci tuhosti přechodu kola z opornice na jazyk, avšak zde by bylo potřeba provést ještě výpočtové prověření, resp. úpravu tuhosti podložek do systému upevnění KSN 20 pro tento způsob použití.
5. Z hlediska **použití materiálu** se prokázalo výhodnější z dlouhodobého hlediska použití některého z moderních materiálů, viz přehled v kap. 2.4. U obvyklé pryže se projevila změna materiálových charakteristik vliv stárnutí materiálu a provozu. **Moderní materiály** jako Cellentic® (případně Sylodyn®) ukazují větší **dlouhodobou stálost**, a to jak po stránce rozměrové, tak po stránce materiálových charakteristik. Bude-li tedy ve výhybce tuhost upevnění naladěna důsledně na nějakou konkrétní tuhost, lze při použití moderních prvků docílit dlouhodobější stability tuhosti upevnění, a tím zajistit dlouhodobější účinek modifikace tuhosti pomocí zpružnění.
6. Ze zjištěné **statické a dynamické odezvy** vysokorychlostní výhybky vzešlo, že se zde vyskytují lokálně tužší oblasti. Ukazuje se, že odlévaný rám PHS velmi zvyšuje tuhost kolejové jízdní dráhy, obdobně jako srdcovka pevná. Pro vysokorychlostní výhybky se tedy **má smysl zabývat zpružněním přinejmenším oblasti srdcovky**.
7. Co se týče statické a dynamické odezvy v oblasti výměny vysokorychlostní výhybky, projevil se zde zcela stejný problém jako u výhybek standardních – přechod z pružně uložené opornice na tuze uložený jazyk. Proto lze jednoznačně **doporučit použití kluzné stoličky KSN 20 do vysokorychlostních výhybek jako standardní řešení**.

7.2 PŘÍNOS PRO PRAXI

Výstupy disertační práce najdou uplatnění zejména u dodavatele železničních výhybek (v České republice a na Slovensku se jedná o společnosti DT – Výhybkárna a strojírna, a.s., resp. DT – Slovenská výhybkáreň, a.s.) a rovněž to bude cenný zdroj informací pro zástupce železničních správ (Správa železnic, státní organizace, Železnice Slovenskej republiky, částečně dopravní podniky).

Z poznatků této disertační práce bude čerpat zejména DT – Výhybkárna a strojírna, a.s., která v roce 2020 vložila první ryze vysokorychlostní (rychlost odbočnou větví 160 km.h⁻¹) do trati k provoznímu ověřování v žst. Prosenice v počtu dvou kusů [141]. Zde budou provozně ověřovány po dobu pěti let, avšak tím vývoj vysokorychlostních výhybek v DT nekončí. Jednak je cílem dokončit vývoj optimalizace tuhosti vysokorychlostní výhybky, jednak je již ve vývoji výhybka pro rychlost až 230 km.h⁻¹ [142]. Pro pokračující vývoj v oblasti vysokorychlostních výhybek budou tyto informace použity a dále rozvíjeny. Se zpružňováním souvisí také problematika pevné jízdní dráhy. Aktuálně je v DT rovněž vyvíjena výhybka pro pevnou jízdní dráhu, která z podstaty věci musí obsahovat zpružněné systémy upevnění (viz kap. 2.1.12), jelikož se s pevnou jízdní dráhou počítá v opodstatněných případech i na českých VRT a často je používána i v tunelech městských drah. I zde budou tyto poznatky použity a dále rozvíjeny.

S informacemi shromážděnými v disertační práci mohou pracovat také správci infrastruktury. Jsou zde uvedeny ucelené informace o výsledcích provozního ověřování v žst. Ústí nad Orlicí včetně přínosů zpružnění, lze tedy navázat buď jednáním o rozšíření provozního ověřování do dalších výhybek nebo, v případě shledání předložených informací dostatečnými, přímo objednáním výroby dalších výhybek tohoto konstrukčního provedení pro konkrétní stavby. Z hlediska aktuální přípravy budování mezistaničních výhyben dvoukolejných tratí, tzv. odboček, lze přinejmenším zpružnění kluzné stoličky do těchto aplikací doporučit z důvodu poježdění železničními vozidly nejvyššími možnými traťovými rychlostmi. Rovněž předkládaná práce nabízí pohled na možnosti optimalizace tuhosti ve vysokorychlostní výhybce jako budoucí podklad k diskusi mezi správcem železniční infrastruktury a výrobcem. Je také možné na základě výsledků z provozního ověřování v žst. Ústí nad Orlicí přistoupit k diskuzím ohledně možného provozního ověřování na Slovensku, a tím navázat na nerealizovaný zkušební úsek v žst. Sekule, který měl vzniknout v roce 2015. Ten nebyl z důvodu přehodnocení způsobu rekonstrukce železniční trati Kúty – Bratislava realizován a diskuze následně utichly.

7.3 PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR

Problematika výzkumu v oblasti železničních výhybek stojí v popředí neustále, jelikož je známo, že výhybky jsou jedním z nejvíce exponovaných míst v konstrukci železničních tratí z hlediska dynamického namáhání. Výzkum a na základě výzkumu realizovaný vývoj směrem k vylepšení výhybek, a to zejména po stránce dynamického namáhání, je realizován jak na univerzitách, tak u výrobních podniků. V poslední době byla velice obsáhle řešena problematika zpružňování ložné plochy pražců (viz kap. 2.2.5 a např. [5, 10, 37]), která se začíná čím dál častěji uplatňovat do praxe prostřednictvím zpracovaných užitečných vzorů [37–40, 42]. Na podpražcové podložky navázal výzkum v oblasti zpružnění v systému upevnění. Výzvou do budoucna pro výzkum a vývoj bude zcela jistě kombinace těchto způsobů zpružnění, jelikož lze při správném naladění tuhostí podpražcových podložek a podložek v systémech upevnění očekávat přínos jak podpražcových podložek (zvětšení kontaktní plochy pražce s kolejovým ložem), tak zpružněných systémů upevnění (zpružnění jazyka po přechodu kola z opornice). Dále také zpracování detailního výpočtového modelu výhybek má přínos nejen z hlediska vývoje v oblasti zpružňování, ukazuje se že, tyto velice komplexní výpočtové modely začínají mít velké uplatnění např. při vývoji pokročilých diagnostických systémů jako virtuální dvojčata reálných výhybek (viz např. projekt Výhybka 4.0 [143]). Tato problematika je zajisté také jedním z nepostradatelných budoucích směrů výzkumu a vývoje v oblasti železničních výhybek.

8 ZÁVĚR

Předložená disertační práce se zabývala optimalizací tuhosti kolejové jízdní dráhy po délce výhybky a zaměřovala se na nalezení řešení prostřednictvím zpružnění v systémech upevnění kolejnic na pražci. Motivací jsou diskontinuity v tuhosti po délce vyskytující se ve výhybkách a výhybkových konstrukcích a jejich vliv na dynamické namáhání, které se při zvyšování rychlostí na železničních tratích začíná čím dál více projevovat a v souvislosti s budoucí stavbou vysokorychlostních tratí se bude jednat o čím dál častěji diskutované téma.

Prvním dílčím cílem bylo vyhodnotit provozní ověřování výhybek se zpružněním v žst. Ústí nad Orlicí, která ukázalo přínosy zpružnění v upevnění. Na základě pozitivního hodnocení zkušebního úseku proběhla příprava 3D modelu vysokorychlostní výhybky, na němž byly provedeny statické a dynamické analýzy a následně byl navržen předběžný způsob možností zpružnění do vysokorychlostní výhybky. V rámci provozního ověřování pak byly laboratorně odzkoušeny podložky ze zpružněných systémů upevnění a určeny jejich materiálové charakteristiky, které ukázaly stálost různých použitých materiálů v čase za provozu. Tyto všechny poznatky vyústily v dosažení hlavního cíle, kterým bylo stanovit zásady pro konstrukci výhybek a výhybkových konstrukcí, které vedou ke snižování dynamického namáhání konstrukce koleje.

Tato problematika se jeví jako vysoce aktuální z hlediska budoucích potřeb vysokorychlostních tratí. Při vysokých rychlostech bude potřeba dbát na co největší snížení dynamického namáhání, které povede k menšímu opotřebení jednotlivých výhybkových dílů, což bude mít pozitivní vliv na údržbu, která bude moci být ve vysokorychlostních tratích vykonávána pouze velice omezeně (v nočních výlukách). Pozitivní vliv bude také na vozidla a na cestující, kteří ocení vyšší komfort při průjezdu výhybkami s optimalizovanou tuhostí jízdní dráhy.

9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ŠLEGR, Petr. *Rychlá železnice i v České republice*. Praha: Centrum pro efektivní dopravu, 2012.
- [2] JELEN, Jiří and Karel SELLNER. *Svět rychlých kolejí*. Praha: Nadatur, 1997.
- [3] BONEV, Jan. *Technicko-provozní studie: Technická řešení VRT*. 2017.
- [4] VUKUŠIČ, Ivan. *Analýza dynamických účinků ve výhybce*. Brno, 2015. b.n.
- [5] HRUZÍKOVÁ, Miroslava. *Vliv podpražcových podložek na kvalitu jízdní dráhy*. Brno, 2012. b.n.
- [6] HAVLÍK, Jiří, Bohuslav PUDA, Lukáš RAIF and Marek SMOLKA. Výroba a vložení funkčních vzorků výhybek se zpružněním v uzlu upevnění. *Nová železniční technika*. 2015. ISSN 1210-3942.
- [7] RAIF, Lukáš, Bohuslav PUDA, Jiří HAVLÍK and Marek SMOLKA. Výhybky se zpružněnými uzly upevnění v ŽST Ústí nad Orlicí. *Silnice železnice*. 2015. ISSN 1801-822X.
- [8] RAIF, Lukáš, Bohuslav PUDA and Michal ŽÁK. Výhybky pro vysoké rychlosti. *Nová železniční technika*. 2016. ISSN 1210-3942.
- [9] RAIF, Lukáš and Bohuslav PUDA. Výhybky se zpružněním v Ústí nad Orlicí – zkušební úsek. In: *Věda a výzkum pro stavby železniční dopravní cesty*. Děčín: VOŠ a SPŠ Děčín, 2016. ISBN 978-80-905733-3-8.
- [10] PLÁŠEK, Otto and Miroslava HRUZÍKOVÁ. Použití podpražcových podložek jako ochrana kolejového lože v běžné koleji a ve výhybkách. *Akustika*. 2007.
- [11] AUER, Florian, Rodolphe POTVIN, Otto PLÁŠEK and Miroslava HRUZÍKOVÁ. Podpražcové podložky v koleji. *Nová železniční technika*. 2015, 2015(1), 21–28.
- [12] HRUZÍKOVÁ, Miroslava, Jaroslav SMUTNÝ, Otto PLÁŠEK and Richard SVOBODA. Influence of USPs on the Quality of Track Geometry in Turnout. In: *Road and Rail Infrastructure II. Proceedings of the 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructures - CETRA 2012*. Zagreb: University of Zagreb, 2012, p. 641–648. ISBN 978-953-6272-49-5.
- [13] PLÁŠEK, Otto, Miroslava HRUZÍKOVÁ, Richard SVOBODA and Jaroslav BILEK. Under sleeper pads in railway track. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2014, 16(4), 27–34. ISSN 25857878.
- [14] PLÁŠEK, Otto. Pražce s pružnou ložnou plochou. In: *Železniční dopravní cesta 2006*. Praha: Správa železniční dopravní cesty, s.o., 2006. ISBN 80-85104-85-7.
- [15] HAVLÍK, Jiří, Bohuslav PUDA, Lukáš RAIF and Marek SMOLKA. Výroba a vložení funkčních vzorků výhybek se zpružněním v uzlu upevnění. *Nová železniční technika*. 2015, 12–16.
- [16] RAIF, Lukáš, Bohuslav PUDA, Jiří HAVLÍK and Marek SMOLKA. Výhybky se zpružněnými uzly upevnění v ŽST Ústí nad Orlicí. *Silnice železnice*. 2015, 70–72.

-
- [17] SMOLKA, Marek, Bohuslav PUDA, Josef ZBOŘIL and Petr HAVLÍČEK. *Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění*. 2011
- [18] PLÁŠEK, Otto, Vlastislav SALAJKA, Jaromír ZELENKA, Miquel MORATA, Stefan KNITTEL, Lukáš RAIF and Sakdirat KAEWUNRUEN. *D4.2 Integration and Optimization of Switch and Crossing Technologies*. 2019.
- [19] MUCHA, Petr. *Podklady projektu VH 18 004 Systémy upevnění do výhybek pro pevnou jízdní dráhu*. Prostějov: DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. 2021
- [20] ČECHÁK, Josef. *Výhybky: soust. T, R65, S49 první a druhé generace, UIC60*. Praha: KPM CONSULT, 2008.
- [21] KOLEKTIV. *Výhybky a ocelový materiál pro železniční svršek*. Praha: Ministerstvo hutního průmyslu a rudných dolů Hlavní správa odbytu, 1955.
- [22] VLASÁK, Jaroslav. *Výhybky a výhybková spojení*. Praha: NADAS, 1983. ISBN 31-050-83-05-92.
- [23] ESVELD, Coenraad. *Modern railway track*. 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, 2001. ISBN 90-800-3243-3.
- [24] WANG, Ping. *Design of High-Speed Railway Turnouts: Theory and Applications*. B.m.: Elsevier, Inc., 2015. ISBN 978-0-323-39617-2.
- [25] PLÁŠEK, Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA and Milan MOCKOVČIAK. *Železniční stavby*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2621-7.
- [26] PLÁŠEK, Otto. *Teoretická a experimentální analýza chování betonových pražců v kolejovém loži*. Brno, 2006. b.n.
- [27] KULICH, Pavel. *Dynamická analýza koleje*. Brno, 2017. b.n.
- [28] MORAVČÍK, Milan and Martin MORAVČÍK. *Mechanika železničních tratí 1. díl: Teoretická analýza a simulácia úloh mechaniky železničních tratí*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2002. ISBN 80-7100-983-0.
- [29] TIMOSHENKO, S P. *Methods of analysis of statical and dynamical stresses in rails*. In: *Proceedings of the Second International Congress of Applied Mechanics*. 1947, p. 407–420.
- [30] FRÝBA, Ladislav. *Dynamika železničních mostů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1992. ISBN 80-200-0262-6.
- [31] FRÝBA, Ladislav. *Vibration of solids and structures under moving loads*. Vyd. 3., a. Prague: Academia, 1999. ISBN 80-200-0715-6.
- [32] *Vertical Elasticity of Ballasteless Track*. 1. Paris: UIC, 2008. ISBN 2-7461-1396-1.
- [33] LICHTBERGER, Bernhard. *Handbuch gleis*. Hamburg: Tetzlaff, 2003. ISBN 38-781-4803-8.
- [34] LICHTBERGER, Bernhard. *Track compendium*. 2nd ed. Hamburg: DVV Media Group, 2011. ISBN 978-3-7771-0421-8.
- [35] SIDERIUS, R.M. *Feasibility of EPS as a lightweight sub-base material in rail structures*. Delft: TU Delft. 1998

- [36] PLÁŠEK, Otto. *Závěrečná zpráva o realizaci projektu TA01031173 za rok 2013: Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledků za rok 2013*. 2013.
- [37] HRUZÍKOVÁ, Miroslava and Otto PLÁŠEK. *Uspořádání podpražcových podložek u železničních výhybek tvaru 1:14-760 s přechodovou oblastí ve výhybce* [online]. Available at: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0026/uv026485.pdf>
- [38] HRUZÍKOVÁ, Miroslava and Otto PLÁŠEK. *Uspořádání podpražcových podložek u železničních výhybek tvaru 1:18,5-1200-I s přechodovou oblastí ve výhybce* [online]. Available at: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0026/uv026484.pdf>
- [39] HRUZÍKOVÁ, Miroslava and Otto PLÁŠEK. *Uspořádání podpražcových podložek u železničních výhybek tvaru 1:12-500-I s přechodovou oblastí před žlabovými pražci* [online]. Available at: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0026/uv026487.pdf>
- [40] HRUZÍKOVÁ, Miroslava and Otto PLÁŠEK. *Uspořádání podpražcových podložek u železničních výhybek tvaru 1:12-500-I s přechodovou oblastí před žlabovými pražci* [online]. Available at: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0026/uv026486.pdf>
- [41] PLÁŠEK, Otto and Richard SVOBODA. *Zkušební deska pro podpražcové podložky* [online]. Available at: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0022/uv022176.pdf>
- [42] HRUZÍKOVÁ, Miroslava and Otto PLÁŠEK. *Uspořádání podpražcových podložek u železničních výhybek tvaru 1:14-760 s přechodovou oblastí před žlabovými pražci* [online]. Available at: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0026/uv026488.pdf>
- [43] SALAJKA, Vlastislav, Marek SMOLKA, Jiří KALA, Otto PLÁŠEK, J MELCER and K KOTRASOVA. Dynamical response of railway switches and crossings. In: *MATEC Web of Conferences* [online]. 2017. ISSN 2261-236X. Available at: [doi:10.1051/mateconf/201710700018](https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700018)
- [44] SALAJKA, Vlastislav, Otto PLÁŠEK and Jiří KALA. *Výpočet tuhosti uložení kolejnic na pražcích se zpružněným uložením kolejové jízdní dráhy ve výhybce J60-1:12-500I,zl,b – dynamický výpočet*. 2011.

- [45] HÁBA, Aleš and Jaromír ZELENKA. Možnost modelování dynamických dějů při průjezdu vozidla přes srdcovku. In: *Současné problémy kolejových vozidel*. Česká Třebová: Vydavatelství Univerzity Pardubice, 2009.
- [46] SMOLKA, Marek, Jaroslav SMUTNÝ and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Průběžná zpráva o realizaci projektu TA01031297 za rok 2012*. 2012
- [47] SMOLKA, Marek, Jaroslav SMUTNÝ and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Průběžná zpráva o realizaci projektu TA01031297 za rok 2013*. 2013
- [48] SMOLKA, Marek, Jaroslav SMUTNÝ and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Průběžná zpráva o realizaci projektu TA01031297 za rok 2014*. 2014
- [49] SMOLKA, Marek, Jaroslav SMUTNÝ and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Závěrečná zpráva o realizaci projektu TA01031297 za rok 2015*. 2015
- [50] IWNICKI, Simon, Yann BEZIN, Gang XIE and Elias KASSA. Advances in vehicle-track interaction tools. *Railway Gazette International*. 2009.
- [51] DAVIS, Bleddyn-James and Yann BEZIN. *Cast Crossing –Profile optimisation*. B.m.: Permanent Way Institution
- [52] *Předpis SŽDC S67 Vady a lomy kolejnic*. Praha: Správa železniční dopravní cesty, s.o. 2017
- [53] ZWANENBURG, Wilhelm-Jan. Modelling degradation processes of switches & crossings for maintenance & renewal planning on the Swiss railway network. In: *6th Swiss Transport Research Conference*. 2019.
- [54] SALAJKA, Vlastislav, Otto PLÁŠEK and Jiří KALA. *Studie statického a dynamického chování kolejové pevné jízdní dráhy ve výhybce tvaru J60-1:12-500: 2. část - dynamické výpočty*. 2013.
- [55] SALAJKA, Vlastislav, Otto PLÁŠEK and Jiří KALA. *Pevná jízdní dráha na pražcích se zpružněným uložením kolejové jízdní dráhy ve výhybce J60-1:12-500-I-zl,b: 1. část - Statické řešení*. 2013.
- [56] SALAJKA, Vlastislav, Jiří KALA, Petr HRADIL, Zdeněk ČADA and Zita SALAJKOVÁ. *Matematické modelování železniční trati*. 2018.
- [57] DUBSKÝ, Vladimír. *Interní propagační materiály firmy*. B.m.: Vossloh Drážní Technika, s.r.o.
- [58] *Acoustic and vibration isolation in rail traffic* [online]. B.m.: Kraiburg Purasys. [accessed. 2021-09-24]. Available at: <https://www.kraiburg-purasys.com/en/downloads/>
- [59] *Solutions for sound and vibration isolation in rail traffic* [online]. B.m.: Kraiburg Relastec. 2018 [accessed. 2021-09-24]. Available at: https://www.kraiburg-relastec.com/damtec/wp-content/uploads/sites/2/2018/06/Brochure_Rail_DAMTEC_EN_03_2018.pdf
- [60] ŠMÍŘÁK, Svatopluk. *Pružnost a plasticita i pro distanční studium*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. ISBN 80-7204-468-0.

- [61] TŘEŠŇÁKOVÁ, Jaroslava. *Výhybky tvaru J60-1:12-500 na betonových pražcích výroby fa WBG Weichenwerk Brandenburg GmbH a DT výhybkárna a mostárna s.r.o. Prostějov: Zpráva o výsledcích provozního ověřování výhybek č. 10, 11, 48 a 49 v ŽST Poříčany*. 2001.
- [62] *Elastic Ribbed Plate Support* [online]. B.m.: Voestalpine BWG GmbH. [accessed. 2021-04-17]. Available at: https://www.voestalpine.com/bwg/static/sites/bwg/.downloads/en/products/ERLv_en.pdf
- [63] MUZIKANT, Vladimír st. *Zpráva pro závěrečné oponentní řízení úkolu DUTR VH 01 021: Zpružnění upevnění pro železniční výhybky*. 2002.
- [64] ZBOŘIL, Josef. *Zpráva č. 1 pro průběžnou oponenturu projektu VH 07 004: Řešit problematiku zpružněního upevnění kolejnic ve svislém směru pro VR a koridorové výhybky*. 2008.
- [65] ZBOŘIL, Josef. *Zpráva č. 5 pro průběžné oponentní řízení projektu VaV VH 07 004 Zpružněního upevnění kolejnic ve svislém směru pro koridorové výhybky*. 2009.
- [66] ZBOŘIL, Josef. *Zpráva č. 6 pro závěrečné oponentní řízení projektu VaV VH 07 004 Zpružněního upevnění kolejnic ve svislém směru pro koridorové výhybky*. 2011.
- [67] KUBÁT, Bohumil, Petr TYC and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Kolejové doprava ve městě*. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 1995.
- [68] AUER, Florian. *Zur Reduktion der Schlupfwellenbildung. EI-Der Eisenbahningenieur: Internationale Fachzeitschrift für Schienenverkehr und Technik*. 2012, (3), 33–42. ISSN 0013-2810.
- [69] AUER, Florian and Rudolf SCHILDER. *Technische und wirtschaftliche Aspekte zum Thema Schwellenbesohlung – Teil 1: Langzeiterfahrungen im Netz der ÖBB. ZEVrail*. 2009.
- [70] POTOCHAN, Stefan. *Erschütterungsschutz im Bereich Birmingham Arena Tunnel. EI-Eisenbahningenieur*. 2010.
- [71] LOY, Harald. *Mitigating vibration using under-sleeper pads. Railway Gazette International*. 2012.
- [72] *Getzner Elastizität im Eisenbahnoberbau*. 2018
- [73] *Technical Solutions for Track Substructure*. B.m.: Angs+Pfister. 2014
- [74] *Railway Magazine International Solutions for Railway Industry*. B.m.: Angst+Pfister. 2018
- [75] *Elastische Schwellenschohle aus EVA*. B.m.: Paul Müller Technische Produkte GmbH. 2020
- [76] PLÁŠEK, Otto. *Sledování výškové polohy koleje ve zkušebních úsecích pro podpražcové podložky*. 2009.
- [77] PLÁŠEK, Otto. *Hodnocení zkušebních úseků pro pražce s pružnou ložnou plochou*. 2008.
- [78] *RFI approves WEGH under-sleeper pads. Raylway Gazette*. 2017.

-
- [79] *Pandrol VIPA „Double FastClip“*. B.m.: Pandrol
- [80] *On track with Delkor Rail*. B.m.: Delkor Rail
- [81] *Innovative Rail Fastening Systems*. B.m.: Schwihag AG. 2018
- [82] *Innovative Track and Switch Technology*. B.m.: Schwihag AG. 2018
- [83] CVEK, Karel. *Železniční svršek*. Praha: Dopravní nakladatelství Praha, 1955.
- [84] VOSSLOH FASTENING SYSTEMS GMBH. *Smooth travel with Cellentic*.
- [85] *Übersicht Sylodyn(R)*. B.m.: Getzner Werkstoffe GmbH
- [86] *Sylodyn - technické listy*. B.m.: Getzner Werkstoffe GmbH
- [87] VAJBAR, Miroslav. *Prezentační materiály firmy Wediss, s.r.o.*
- [88] *Diepolast(R) Übersicht*. B.m.: Wediss
- [89] EVROPSKÁ KOMISE. *Narřízení komise (EU) č. 1299/2014. O technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii*. Brusel: Evropská komise. 2014
- [90] ČSN EN 13481-1 *Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 1: Definice*. 2013
- [91] ČSN EN 13146-9 *Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 9: Stanovení tuhosti*. Praha: ÚNMZ. 2021
- [92] *S3 Železniční svršek. Změna č.3. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace: Odbor traťového hospodářství Dlážděná 1003/7 110 00 Praha 1*. 2019
- [93] *S9 Pevná jízdní dráha*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2012
- [94] ČSN EN 13481-3 *Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 3: Systémy upevnění pro dřevěné pražce*. Praha: ÚNMZ. 2013
- [95] ČSN EN 13481-5+A1 *Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 5: Systémy upevnění pro pevnou jízdní dráhu s kolejnicí na jejím povrchu nebo zapuštěnou ve žlábků*. Praha: ÚNMZ. 2017
- [96] ČSN EN 13481-7 *Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 7: Speciální systémy upevnění pro výhybky a výhybkové konstrukce a přídržné kolejnice*. Praha: ÚNMZ. 2013
- [97] ČSN 736360-2 *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Praha: Český normalizační institut. 2009
- [98] FENCL, Jan. *Odsouhlasení provozního ověřování výhybek se zpružněním v upevnění a se zpružněním ložných ploch pražců*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2014
- [99] ČSN 72 1006 *Kontrola zhutnění zemin a sypanin*. Praha: ÚNMZ. 2015
- [100] *S4 Železniční spodek*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2008
- [101] BŘEŠŤOVSKÝ, Petr and Martin LIDMILA. *Vyhledávání nehomogenních míst na zhotovených konstrukčních vrstvách pražcového podloží*. 2013.

- [102] KREJČÍŘIKOVÁ, Hana. *Měření dlouhodobé stability výškové polohy výhybek a výhybkových konstrukcí*. 2014
- [103] *Datový list ke geodetickému bodu č. 2403 207*. Praha: Správa železniční geodézie. 2018
- [104] KLEMENT, Miloslav. *Zásady snímání a vyhodnocení geometrického tvaru výhybkových konstrukcí pomocí 3D skeneru*. 2015
- [105] ŽÁK, Michal. *Validace měřiče provozního zatížení TON1. Ověřovací provoz. Statistika*. Prostějov: DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. 2010
- [106] ŽÁK, Michal. *Manuál k měřiči projeté zátěže TON 1*. Prostějov: DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. 2010
- [107] SMUTNÝ, Jaroslav, Luboš PAZDERA and Ivan VUKUŠIČ. *Hodnocení dynamických účinků v konstrukci pražcového podloží výhybky*. 2014
- [108] SMUTNÝ, Jaroslav, Luboš PAZDERA and Ivan VUKUŠIČ. *Hodnocení dynamických účinků působících na výhybky*. 2014
- [109] ZELENKA, Jaromír. *Simulační výpočet dynamické odezvy lokomotivy o hmotnosti 90 t při průjezdu výhybkou*. Česká Třebová: Asociace strojních inženýrů, klub Česká Třebová. 2013
- [110] ZELENKA, Jaromír, Martin KOHOUT, Aleš HÁBA and Petr VOLTR. *Dynamická odezva elektrické lokomotivy o hmotnosti 90 t do odbočné větve výhybky J60-1:12-500*. Pardubice: Univerzita Pardubice. 2011
- [111] ZELENKA, Jaromír, Aleš HÁBA and Martin KOHOUT. *Hodnocení dynamické odezvy vozidla při průjezdu konstrukčními částmi výhybky*. In: 21. mezinárodní seminár Traťové stroje v teórii a praxi: zborník prednášok. Žilina: VTS pri Žilinskej univerzite, 2016, p. 181–188. ISBN 978-80-89276-52-3.
- [112] GERLICI, Juraj and Tomáš LACK. *Kontakt železničního dvojkoľesia a koľaje*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2004.
- [113] ZELENKA, Jaromír, Aleš HÁBA and Martin KOHOUT. *Stanovení ekvivalentního zatížení srdcovkové části železniční výhybky při průjezdu vozidla prostřednictvím postupů uvedených v EN 14363*. Pardubice: Univerzita Pardubice. 2014
- [114] ZELENKA, Jaromír, Aleš HÁBA and Martin KOHOUT. *Vyhodnocení měření zrychlení na lokomotivě řady 380 při průjezdu vybranými výhybkami stanice Ústí nad Orlicí*. Česká Třebová: Univerzita Pardubice. 2015
- [115] ZELENKA, Jaromír, Aleš HÁBA and Martin KOHOUT. *Vyhodnocení měření zrychlení na lokomotivě řady 380 při průjezdu vybranými výhybkami stanice Ústí nad Orlicí - II. etapa*. Česká Třebová: Univerzita Pardubice. 2016
- [116] ZELENKA, Jaromír, Aleš HÁBA and Martin KOHOUT. *Vyhodnocení měření zrychlení na elektrické lokomotivě při průjezdu vybranými výhybkami stanice Ústí nad Orlicí - III. etapa*. Česká Třebová: Univerzita Pardubice. 2017

- [117] ZELENKA, Jaromír, Aleš HÁBA and Martin KOHOUT. *Vyhodnocení měření zrychlení na elektrické lokomotivě při průjezdu vybranými výhybkami stanice Ústí nad Orlicí - IV. etapa*. Česká Třebová: Univerzita Pardubice. 2018
- [118] EN 14363 *Železniční aplikace - Přejímací zkoušky jízdních charakteristik železničních vozidel - Zkoušení jízdních vlastností a stacionární zkoušky*. Brusel: CEN (Evropský výbor pro normalizaci). 2016
- [119] SŽDC SR103/4(S) *Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2010
- [120] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza dynamických parametrů ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí. Závěrečná zpráva TAČR TA01031297*. 2016.
- [121] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza dynamických parametrů ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2016.
- [122] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza dynamických parametrů ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2018.
- [123] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza dynamických parametrů ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2019.
- [124] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza vybraných dynamických parametrů železničního spodku a šterkové vrstvy ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2016.
- [125] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza vybraných dynamických parametrů železničního spodku a šterkové vrstvy ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2018.
- [126] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza vybraných dynamických parametrů železničního spodku a šterkové vrstvy ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2019.
- [127] ZBOŘIL, Josef. *Zpráva interního výzkumně-vývojového projektu. Zpráva 14/01 projektu VH 10 100*. 2014.
- [128] SALAJKA, Vlastislav and Jiří KALA. *Výpočet tuhosti uložení kolejnic na pražcích se zpružněným uložením kolejové jízdní dráhy ve výhybce J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS-E2: 1. část - Výpočty na modelu původně navržené výhybky*. 2017.
- [129] *Material Reference*. B.m.: ANSYS, Inc. 2021
- [130] *Element Reference*. B.m.: ANSYS, Inc. 2021
- [131] SALAJKA, Vlastislav, Otto PLÁŠEK and Jiří KALA. *Výpočet tuhosti uložení kolejnic na pražcích se zpružněným uložením kolejové jízdní dráhy ve výhybce J60-1:12-500-I-zl,b: Dynamický výpočet odbočný směr*. 2012.
- [132] SALAJKA, Vlastislav, Otto PLÁŠEK and Jiří KALA. *Studie statického a dynamického chování kolejové pevné jízdní dráhy ve výhybce tvaru J60-1:12-500: 2.*

část - *Dynamické výpočty - korekce tuhosti upevnění v oblasti výměny a srdcovky.* 2014.

- [133] SALAJKA, Vlastislav and Jiří KALA. *Výpočet tuhosti uložení kolejnic na pražcích se zpružněným uloženíím kolejové jízdní dráhy ve výhybce J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS-E2: 2. část - Výpočty na modelu výhybky se zpružněním.* 2017.
- [134] SALAJKA, Vlastislav. *Výpočet tuhosti uložení kolejnic na pražcích se zpružněným uloženíím kolejové jízdní dráhy ve výhybce J60-1:12-500-I,zl,b: Statický výpočet.* 2011.
- [135] DBS 918 235 *Elastische Zwischenlagen und Zwischenplatten.* B.m.: Deutsche Bahn. 2006
- [136] *OTP pro podložky pod patu kolejnice v podkladnicovém upevnění, schválené pod č.j. 60789/99-O13 ze dne 1.1.2000, resp. vč. změny č. 1 z r. 2001.* Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2001
- [137] LANGER, Vojtěch. *Porovnání způsobu provádění a hodnocení zkoušek rozsahu tuhosti pryžových podložek dle platných OTP a dle ČSN EN 13 146-9 + A1.* no date.
- [138] SLOBODA, Juraj. *Dodatok k protokolu č. 58a/2013 - Stanovenie tuhosti koľajnicových podložiek upevnenia "KSN."* 2013.
- [139] VOSSLOH. *Protokoll Materialprüfung Cellentic.* 2013.
- [140] *Výkres podložky Renogum V3-27559.* Prostějov: DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. 2012
- [141] RAIF, Lukáš, Jiří ZATLOUKAL and Michal VYHLÍDAL. *Výhybky pro vysokorychlostní tratě od tuzemského dodavatele. Silnice železnice.* 2021, 40–41. ISSN 1801-822X.
- [142] RAIF, Lukáš and Bohuslav PUDA. *Geometrické uspořádání vysokorychlostních výhybek z produkce DT. Nová železniční technika.* 2022. ISSN 1210-3942.
- [143] RAIF, Lukáš. *Chytrá železniční výhybka pro budoucí i současné české železnice. Technický týdeník.* 2021, 18–19. ISSN 0040-1064.

10 SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam
2D	dvoudimenzionální, dvourozměrný prostor
3D	trojdimenzionální, trojrozměrný prostor
AL	mez sledování (dle ČSN 73 6360-2)
Bpv	výškový systém Baltský po vyrovnaní
BWG	výrobce výhybek v Německu
CTD	Centrum telematiky a diagnostiky (dříve TÚDC) – organizační jednotka Správy železnic
ČR	Česká republika
ČSN	česká státní norma
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze, zde konkrétně myšleno: Fakulta stavební, Katedra železničních staveb
DB	Deutsche Bahn AG, Německé dráhy
DBS	německá drážní norma (Deutsche Bahn Standard)
DPP	Dopravní podnik hl. města Prahy, a.s.
DT	DT -Výhybkárna a strojírna, a.s.
EN	evropská norma
EPDM	etylen propylen dien monomer
ERL	Elastic Ribbed Plate (systém upevnění výhybkárny BWG)
EVA	ethylenvinylacetát
FAKOP	Fahrkinematische Optimierung – kinematická optimalizace jízdy vozidla výhybkou, ochranná známka fy BWG
FEM	metoda konečných prvků (finite element method)
GPK	geometrické parametry koleje (dle ČSN 73 6360-1)
IAL	mez bezodkladného zásahu (dle ČSN 73 6360-2)
IL	mez zásahu (dle ČSN 73 6360-2)
KGO	Kimematic Gauge Optimisation (viz FAKOP)
KS	označení systému upevnění se žebrovou podkladnicí a příslušnou pružnou svěrkou fy Vossloh
KV	Konec výhybky
MBS	Multi Body System
mil hrt.	miliony hrubých tun – jednotka projeté zátěže

MVŽSv	měřicí vůz železničního svršku provozovaný CTD
OTP	obecné technické podmínky
PJD	pevná jízdní dráha (typ konstrukce koleje)
RP	rychlostní pásmo (dle ČSN 73 6360-2)
STM	Ústav stavební mechaniky Fakulty stavební VUT v Brně
SŽ	Správa železnic, státní organizace (neoficiální zkratka), dříve Správa železniční dopravní cesty, SŽDC
TSI	technické specifikace pro interoperabilitu, zde konkrétně myšleno subsystému infrastruktura
TÚDC	Technická ústředna dopravní cesty, viz CTD
ÚAM	Ústav aplikované mechaniky, a.s.
UPA	Univerzita Pardubice (obecně), zde konkrétně myšleno: Katedra dopravních prostředků a diagnostiky – Oddělení kolejových vozidel Dopravní fakulty Jana Pernera
USP	Under Sleeper Pad – podpražcová podložka
ÚŽKS	Ústav železničních konstrukcí a staveb Fakulty stavební VUT v Brně
VRT	vysokorychlostní trať
VUT	Vysoké učení technické v Brně, zde konkrétně obvykle myšleno ÚŽKS
ZMB3	typ odlévané srdcovky z bainitické oceli výrobce DT
ZPT	typ odlévané srdcovky z manganové oceli výrobce DT
ZPTZ	typ odlévané srdcovky z manganové oceli zpevněné výbuchem výrobce DT
ZV	začátek výhybky
ŽSR	Železnice Slovenskej republiky
žst.	Železniční stanice

11 SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Význam
a	[m]	osová vzdálenost pražců
A	[m ²]	kontaktní plocha (při výpočtu tuhosti elementu)
α	[rad]	úhel, pod kterým kolo narazí do hrotu srdcovky
C	[N.mm ⁻³]	součinitel ložnosti
c	[N.m ⁻¹ .s]	spojité tlumení
c_T	[N.m ⁻¹] [kN.mm ⁻¹]	svislá tuhost koleje na kolejnici
c_t	[N.m ⁻¹]	tuhost podložky pod patu kolejnice
c_T	[N.m.s ⁻¹]	ekvivalentní tlumení koleje (při výpočtu rázových sil)
c_{tot}	[N.m ⁻¹]	tuhost totální (připadající na uzel upevnění)
c_u	[N.m ⁻¹]	tuhost podloží
c_{USP}	[N.m ⁻¹]	tuhost podpražcové podložky
D	[N]	posouvající síla
dx	[m]	infinitesimální délka elementu, diferenciál
E	[Pa]	modul pružnosti
E_0	[Pa]	modul přetvárnosti na zemní pláni
EI	[Pa.m ⁴]	ohybová tuhost
E_{pl}	[Pa]	Modul přetvárnosti na pláni tělesa železničního spodku
E_{vd}	[Pa]	dynamický modul přetvárnosti
F	[m ²]	plocha ložné plochy pražce přádající na kolejnici
F_{ekv}	[N]	ekvivalentní zatížení (při vyhodnocení dynamické odezvy na lokomotivě)
h	[m]	tloušťce podložky (při výpočtu tuhosti elementu)
I	[m ⁴]	moment setrvačnosti
k	[N.m ⁻²]	spojitá tuhost
k_{dyn}	[N.m ⁻¹]	bodová tuhost podložky dynamická (při statických a dynamických analýzách)
k_H	[N.m ⁻¹]	Hertzova kontaktní tuhost
k_{stat}	[N.m ⁻¹]	bodová tuhost podložky statická (při statických a dynamických analýzách)
k_{T2}	[N.m ⁻¹]	ekvivalentní tuhost koleje (při výpočtu rázových sil)

L	[m]	charakteristická délka kolejového roštu
l	[m]	délkou prutu (obecně, odvození tuhosti elementu)
ℓ	[m]	měřická základna při výpočtu zborcení
M	[N.m]	ohybový moment
m	[kg]	soustředěná hmotnost
m_{T1}	[kg]	spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje
m_U	[kg]	neodpružená hmotnost
$OH_{z..}$	[m.s ⁻²]	očekávaná hodnota zrychlení (při vyhodnocení dynamické odezvy na lokomotivě)
P	[Pa]	napětí na ložné ploše pražce
P_1, P_2	[N]	rázové síly při průjezdu srdcovkou
q	[N.m ⁻¹]	spojité zatížení
Q	[N]	svislá kolová síla doplnit
r	[N]	spojitá reakce
R_s	[N]	reakce připadající na konkrétní uzel upevnění
s	[—]	transformovaná souřadnice (při výpočtu dle Frýby)
T	[N]	smyková síla v podloží
t	[s]	čas
T_f	[mil hrt]	provozní zatížení přepočtené
T_s	[mil hrt]	provozní zatížení skutečné
V	[km.h ⁻¹]	traťová rychlost
v	[km.h ⁻¹]	rychlost obecně při výpočtech
V_{130}	[km.h ⁻¹]	rychlost při využití nedostatku převýšení 130 mm
V_{150}	[km.h ⁻¹]	rychlost při využití nedostatku převýšení 150 mm
V_k	[km.h ⁻¹]	rychlost pro jednotky s naklápěcími skříněmi
w	[m]	průhyb
Y	[N]	příčná kolová síla
ΔL	[m]	celkové protažení prutu
ε_x	[—]	poměrné přetvoření
η	[—]	pořadnice příčinkové čáry průhybu
κ	[m ⁻¹]	křivost prutu

λ	$[\text{m}^{-1}]$	převrácená hodnota charakteristické dl. kolejového roštu
μ	$[-]$	pořadnice příčinkové čáry ohybového momentu
μ	$[-]$	poissonův součinitel
ν_c	$[-]$	součinitel příčné kontrakce betonu
ξ	$[-]$	relativní souřadnice průhybu
ρ_c	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	objemová hmotnost
σ_x	$[\text{Pa}]$	mechanické napětí
ω	$[\text{m}^{-1}]$	viz λ

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Dynamická soustava vozidlo-kolej. [23].....	16
Obr. 2 Poklesová křivka měřená na konci pražce (hlavě pražce) při průjezdu vlaku. [26].....	17
Obr. 3 Nekonečně dlouhý prut uložený spojitě na pružném podloží (Winkler).	19
Obr. 4 Působení sil na element Timošenkova modelu.	19
Obr. 5 Graf závislosti globální svislé tuhosti koleje na průhybu koleje a tuhosti uzlu upevnění.....	31
Obr. 6 Graf závislosti globální svislé tuhosti koleje na průhybu koleje a roznosu na okolní pražce.	32
Obr. 7 Graf závislosti globální svislé tuhosti koleje na tuhosti připadající na uzel upevnění a na napětí v patě kolejnice.....	33
Obr. 8 Elementární rozdíl mezi Winklerovým a Pasternakovým modelem podloží. .33	
Obr. 9 Element silové a momentové podmínky rovnováhy Pasternakova modelu....	34
Obr. 10 Model Winklerova podloží pro dynamickou soustavu.	37
Obr. 11 Dynamická soustava o jednom stupni volnosti.	37
Obr. 12 Silové působení na element prutu o nekonečně malé délce dx	38
Obr. 13 Schématické znázornění základní myšlenky transformace dle Frýby. [31]	39
Obr. 14 Obvyklé výsledky výpočtu při různých koeficientech α a β – vlevo statický případ ($\alpha = 0$ a $\beta = 0$), vpravo bez tlumení ($\alpha = 0,5$ a $\beta = 0$). [23].....	44
Obr. 15 Obvyklé výsledky výpočtu při různých koeficientech α a β – vlevo $\alpha = 0,5$ a $\beta = 0,1$, vpravo $\alpha = 0,5$ a $\beta = 1,1$. [23]	44
Obr. 16 Obvyklé výsledky výpočtu při různých koeficientech α a β - stav při kritické rychlosti vlevo netlumená rezonance ($\alpha = 1$ a $\beta = 0$), vpravo $\alpha = 1,0$ a $\beta = 0,1$. [23]	45
Obr. 17 Závislost délky změny v tuhosti na dynamickém účinku. [35]	46
Obr. 18 Průběh tuhosti ve výhybce dle VUT v Brně. [5].....	47
Obr. 19 Průběh tuhosti ve výhybce dle DT. [17, 43, 44]	47
Obr. 20 Ukázka MBS modelu zahrnující jak vozidlo, tak kolej a kontakt mezi oběma subsystémy. [50].....	48
Obr. 21 Kolové síly Q a odpovídající posuny v kolejnicovém páse jdoucím v přímé větvi výhybky kolem přídržnice (nahore) a jdoucím srdcovkou (dole) a odpovídající posuny (vpravo). Výsledek výpočtového modelování, viz [17, 44]......	49
Obr. 22 Kolová síla Q měřená na nabíhajícího dvojkolí prvního podvozku při průjezdu odbočnou větví výhybky rychlostí 80 km.h^{-1} . [50].....	50
Obr. 23 Charakteristický průběh sil P_1 a P_2 . [51]	50
Obr. 24 Působení rázových sil P_1 a P_2 při průjezdu kolem vozidla znázorněné na 3D modelu srdcovky ZMB 3. Hvězdičkami znázorněna místa, která jednotlivé síly ovlivňují.	51
Obr. 25 Roznos svislé kolové síly na pražce. [28, 56].....	53
Obr. 26 Roznos svislé kolové síly do konstrukce koleje. [23, 25, 33, 56]	53

Obr. 27 Složky přispívající k požadované pružnosti koleje v případě klasické konstrukce koleje se šterkovým kolejovým ložem (vlevo) a v případě pevné jízdní dráhy (vpravo). [57]	54
Obr. 28 Příklad mass/spring systému pevné jízdní dráhy s pružným prvkem pod železobetonovou deskou. [58]	55
Obr. 29 Deformace taženého prutu stálého průřezu. [60]	57
Obr. 30 Zpružněný systém upevnění ERL na výhybce BWG v žst. Poříčany.	58
Obr. 31 Řez systémem upevnění ERL z produktového listu. [62]	58
Obr. 32 Ukázka prvních možností návrhu zpružněného upevnění do výhybky z roku 2003 (dvě navržené varianty). [63]	59
Obr. 33 Systém upevnění PoRoP (p odkladnice s r ozvinutelnou p odložkou). [66]	60
Obr. 34 Standardní kluzná stolička s přivařenou kluznou plochou k základové desce a s pružnou podložkou pouze v místě paty opornice	60
Obr. 35 Zpružněná kluzná stolička KSN 20 s odnímatelnou kluznou plochou umístěnou na pružné podložce, srov. s předchozím obrázkem (obr. 34). [7]	61
Obr. 36 Zpružněný systém upevnění pod odlitek srdcovky UNO X. [7]	62
Obr. 37 3D řez odlitkem srdcovkou ZMB 3, kde je patrná poloha žeber a nálitků, která nekoresponduje s polohou podkladnic.	62
Obr. 38 Dvoupatrový zpružněný systém upevnění používaný v pražském metru. Pod žebrovou podkladnicí je patrná profilovaná pryžová pružná podložka, modrý plastový prvek pod ramínky vnější svěrky Skl Aekp má izolační funkci a pod touto svěrkou je ještě patrná bílá plastová vymežovací vložka sloužící pro úpravu příčné polohy kolejnice.	63
Obr. 39 Zpružněný bezpodkladnicový systém E14 pro běžnou kolej výrobce Vossloh. Modře obarvená ocelová roznášecí deska a pod ní je pružná podložka z materiálu EPDM Cellentic®. [57]	64
Obr. 40 Podpražcové podložky instalované na ložnou plochu pražce. [78]	66
Obr. 41 Systém upevnění Vossloh 336 ve variantě pro PJD stavěnou systémem „bottom up“ (vlevo) a „top down“ (vpravo). U obou systémů upevnění je instalována pružná podložka pod podkladnici. [57]	67
Obr. 42 Upevnění W 21 T ve výhybce. [57]	68
Obr. 43 Kluzná stolička s upevněním Vossloh W 21 T. [57]	68
Obr. 44 Zpružněný systém Vossloh 300 W pro výhybky [57]	69
Obr. 45 Systém Pandrol DFC použitý jako kluzná stolička ve výhybce. [79]	70
Obr. 46 Systém Pandrol DFC se sponami FC i „e“ ve výhybce instalované na PJD. [79]	70
Obr. 47 Zpružněný systém upevnění Delkor Egg. [57]	71
Obr. 48 Řez systémem upevnění Delkor Egg s patrným tvarem jednotlivých prvků a navulkanizovanou pryží. [80]	71
Obr. 49 Zpružněná kluzná stolička od firmy Schwihaag. [81, 82]	72

Obr. 50 Konstrukce PJD ve vídeňském metru vč. patrného obvyklého upevnění „K“ a zpružnění pražců v uložení.....	73
Obr. 51 Kluzná stolička firmy Schwiha se zpružněnou kluznou plochou a se zpružněním ještě i pod podkladnicí.	74
Obr. 52 Zpružněné systémy upevnění v oblasti srdcovky s pohyblivými hroty.....	74
Obr. 53 Demonstrace rozdílu materiálu Cellentic® při stlačení oproti pryži. [57, 84]	76
Obr. 54 Standardní typová řada materiálů Sylodyn®. [86].....	77
Obr. 55 Standardní typová řada materiálů Diepolast® [88].....	78
Obr. 56 Graficky vyjádřené cíle disertační práce v rámci celého výzkumu a vývoje v oblasti zpružněných výhybek.....	83
Obr. 57 Schematické znázornění zkušebního úseku. Výhybka č. 4 je referenční, standardní konstrukce. Výhybky č. 2 a 3 mají zpružněné upevnění kolejnic na pražci	87
Obr. 58 Schéma trvale instalovaných snímačů na zkušebním úseku – tříosé snímače zrychlení a tlakové snímače na pláni tělesa železničního spodku a na zemní pláni. ..	88
Obr. 59 Příčné řezy v místě tlakových snímačů a akcelerometrů. [49]	88
Obr. 60 Poloha statických zatěžovacích zkoušek u v. č. 3 a 4. [48].....	91
Obr. 61 Poloha rázových zatěžovacích zkoušek u v. č. 3 a 4. [48]	91
Obr. 62 Schéma sledování zkušebního úseku – modře zobrazeno vlastní sledování a vyhodnocení, zeleně zobrazeno sledování a vyhodnocení spolupracujících institucí, oranžově měření CTD s vlastním zpracováním surových dat.	94
Obr. 63 Označení kolejnicových pásů pro potřeby nivelace.	95
Obr. 64 Schematické znázornění umístění geodetického bodu č. 2403 207. [103].....	96
Obr. 65 Konvence výpočtu převýšení.....	97
Obr. 66 Parametry použitých 3D skenerů. [104]	99
Obr. 67 Ukázka vyhodnocení skenu srdcovky, modře úbytek materiálu, žlutě přealky. [104].....	100
Obr. 68 Ukázka vyhodnocení skenu jazyka, modře úbytek materiálu, žlutě nadbytek materiálu. [104].....	101
Obr. 69 Umístění pozičních značek na srdcovce skenované v trati. [104].....	102
Obr. 70 Ukázka 2D řezu jazyka s barevně i číselně vyznačenými odchylkami při porovnání dvou různých skenů. [104].....	103
Obr. 71 Měření ojetí srdcovky klínkem a pravítkem.	104
Obr. 72 Snímací část zařízení TON 1 – příčný řez v místě nalepení tenzometru. [106]	105
Obr. 73 Snímací část zařízení TON 1 – pohled na kryt snímače v žst. Drahotuše.	105
Obr. 74 Elektronická část zařízení TON 1 – boční pohled a pohled na elektronickou jednotku.....	106
Obr. 75 Elektronická část zařízení TON 1 – boční pohled a pohled na elektronickou jednotku. [105].....	107

Obr. 76 Výřez z textového editoru se zobrazenými průjezdy vlaků v žst. Drahotuše v době probíhající validace zařízení TON 1. Čísla 1 až 15 v prvním řádku jsou pořadí jednotlivých náprav (nejsou zobrazeny ve výřezu všechny nápravy).	108
Obr. 77 Tlakový snímač firmy Geokon.	110
Obr. 78 Měřicí kámen konstrukce VUT. [47]	110
Obr. 79 Ukázka vyhodnocení tlakového snímače (zde konkrétně na pláni tělesa železničního spodku). [107]	112
Obr. 80 Ukázka vyhodnocení měřicího kamene, konkrétně svislý směr. [107]	112
Obr. 81 Uspořádání snímačů v oblasti srdcovky výhybky. [108]	113
Obr. 82 Ukázka vyhodnocení ze snímačů svislých posunutí (snímače S0 až S3 dle schématu srdcovkové části). [108]	115
Obr. 83 Ukázka vyhodnocení ze snímačů zrychlení (snímače A5X, A6Y). [108]	115
Obr. 84 Ukázka vyhodnocení z tenzometrů (na patě křídlové kolejnice). [108]	115
Obr. 85 Lokomotiva ř. 380 před instalací měřicí techniky.	116
Obr. 86 Průběh svislého zrychlení při průjezdu výhybkou. [113]	117
Obr. 87 Integrace svislého zrychlení při průjezdu srdcovkovou částí výhybky. [113]	118
Obr. 88 Zjednodušený dynamický model vozidla při průjezdu srdcovkovou částí výhybky	118
Obr. 89 Ukázka přepočteného měřeného signálu na ekvivalentní zatížení. [113]	119
Obr. 90 Statistické hodnocení zrychlení v oblasti zpružnění.	120
Obr. 91 Statistické hodnocení zrychlení v oblasti zpružnění – hodnoty z celé lokomotivy.	120
Obr. 92 Ilustrativní obrázek měřicího vozu železničního svršku při průjezdu žst. Prosenice.	121
Obr. 93 Uspořádání měřicího vozu. [119]	122
Obr. 94 Ukázka uspořádání poskytovaných naměřených surových dat z MVŽSv...124	
Obr. 95 Porovnání odchylek výškové polohy (kolejnicový pás jdoucí přes srdcovku) v oblasti srdcovek sledovaných výhybek – kompletní grafy viz příloha 4.	129
Obr. 96 Celkový srovnaný průběh sedání v projeté zátěži – průměry pro jednotlivé výhybky.	131
Obr. 97 Oblast 3D skenování srdcovky.	133
Obr. 98 Zobrazené 2D řezy v rámci celé naskenované plochy srdcovky.	133
Obr. 99 Označení sledovaných bodů na 2D řezu srdcovky	134
Obr. 100 Porovnání charakteru ojíždění srdcovek v projeté zátěži v řezu tl. hrotu 40 mm – kompletní grafy viz příloha 3.	135
Obr. 101 Projectá zátěž vyjádřená kumulativně za celé sledované období vč. odhadu před uvedením.	139

Obr. 102 Typický průběh záznamu ze snímače posunutí při průjezdu vlaku, zde konkrétně na srdcovce výhybky č. 3 dne 19. 8. 2019, jednotka Stadler Flirt (LeoExpress). [123].....	141
Obr. 103 Vývoj měření zatlačení v oblasti srdcovky v podélném směru (výhybka č. 3 plnou čarou, výhybka č. 4 čárkovanou čarou). [120–123].....	143
Obr. 104 Ukázka průběhu minimálních a maximálních hodnot zatlačení a mediánu na obou výhybkách v příčném směru v roce 2019. [123].....	144
Obr. 105 Vývoj měření zatlačení v oblasti srdcovky v příčném směru (výhybka č. 3 plnou čarou, výhybka č. 4 čárkovanou čarou). [120–123].....	145
Obr. 106 Ukázka průběhu filtrovaného a nefiltrovaného průběhu svislého zrychlení na výhybce č. 2 dne 26. 5. 2018 při průjezdu směrem Č. Třebová rychlostí 130,1 km.h ⁻¹ . Signál je konkrétně z ložiskové skříně u kola ozn. „12“, což je první náprava vlevo ve směru jízdy. [117].....	150
Obr. 107 Vzájemná vzdálenost mezi dvojkolými lokomotivy řady 380. [117]	150
Obr. 108 Lokální souřadný systém ve výhybce, žlutě vyznačena hodnocená oblast výměny (kóta A) reprezentuje zpružněné (nebo nezpružněné) upevnění výměny; kóta B vzdálenost začátku (nebo konce) hodnocené oblasti výměny. Obrázek odpovídá konkrétně situaci u výhybky č. 2 v žst. Ústí nad Orlicí. [117].....	151
Obr. 109 Průměry z maximálních hodnot ekvivalentního zatížení od jednotlivých dvojkolí při průjezdu srdcovkovými částmi výhybek 1 až 4. [117]	151
Obr. 110 Očekávaná hodnota zrychlení na ložiskové skříně dvojkolí při průjezdu výměnou. [117].....	153
Obr. 111 Očekávaná hodnota svislého zrychlení na 1. podvozku při průjezdu výměnou. [117].....	153
Obr. 112 Očekávaná hodnota příčného zrychlení na 1. podvozku při průjezdu výměnou. [117].....	154
Obr. 113 Postup dílčích činností vedoucích k dosažení cíle.	166
Obr. 114 Zhotovený 3D model výměnové části výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor. V modelu jsou patrné i přestavné a závěrové systémy DTZ 6/3. [127].....	167
Obr. 115 Zhotovený 3D model kluzné stoličky P6000 a integrované válečkové stoličky SVV-PA.....	168
Obr. 116 Zhotovený 3D model patrové podkladnice P60A41 až P60A48 a P60B41 až P60B48.	168
Obr. 117 Zhotovený 3D model první střední části výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor. [127].....	168
Obr. 118 Zhotovený 3D model druhé střední části výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor. [127].....	169
Obr. 119 Příklady atypických podkladnic střední části výhybky.....	169

Obr. 120 Zhotovený 3D model srdcovkové části výhybky J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor včetně přestavných a závěrových systémů DTZ a snímače rozřezu. [127].....	170
Obr. 121 Ilustrativní obrázek systémů upevnění před odlévaným rámem PHS a za odlévaným rámem PHS vč. patrných vložek.	170
Obr. 122 Ilustrativní obrázek systému upevnění za odlévaným rámem PHS v místě pohybujícího se hrotu na kluzné desce vč. patrných hrotových opěrek.	170
Obr. 123 Zhotovený 3D model doplňující části (společné pražce a krátké výhybkové pražce) za výhybku J60-1:33,5-8000/4000/14000-PHS v sw. Autodesk Inventor. [127]	171
Obr. 124 Ukázka zjednodušení oblasti začátku výhybky po importu do sw. ANSYS. [128].....	172
Obr. 125 Ukázka výpočtového modelu s vytvořenou sítí konečných prvků v oblasti začátku výhybky. [128]	174
Obr. 126 Budicí síly od prvního dvojkolí během průjezdu vozidla výhybkou. Křivka P_1 je kolejnicový pás jdoucí přímou opornicí, O_1 je kolejnicový pás jdoucí přímým jazykem a přes srdcovku. [128].....	178
Obr. 127 Demonstrace možných způsobů zpružnění – pružné prvky znázorněny fialově (běžně používaná pryžová podložka) a červeně (podložka s optimalizovanou tuhostí).....	180
Obr. 128 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 1.....	180
Obr. 129 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 2.....	181
Obr. 130 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 3.....	181
Obr. 131 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 4.....	182
Obr. 132 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 5.....	182
Obr. 133 Návrh zpružnění typického uzlu upevnění č. 6.....	182
Obr. 134 Barevné označení kolejnicových pásů použité v následujících grafech.....	184
Obr. 135 Pole složky posunutí u_z pro druhý zatěžovací stav – vlastní tíha roštu, síly ve svěrkách a kolové síly, poloha působíště sil $x = -125,26$ m. [128]	185
Obr. 136 Pole složky posunutí u_z od kolových sil, poloha působíště sil $x = -125,26$ m. [128].....	186
Obr. 137 Pole složky posunutí u_z pro druhý zatěžovací stav – vlastní tíha roštu, síly ve svěrkách a kolové síly, poloha působíště sil $x = -117,46$ m. [128]	187
Obr. 138 Pole složky posunutí u_z od kolových sil, poloha působíště sil $x=0,143$ m [93]	188
Obr. 139 Svislý posuv hlav kolejnic pro případ modelu s vodorovně neposuvným uložením. Vysvětlení legendy viz obr. 134. [128].....	189
Obr. 140 Svislý posuv hlav kolejnic pro případ modelu s vodorovně neposuvným uložením. Vysvětlení legendy viz obr. 134. [128].....	190

Obr. 141 Dynamická odezva – svislý posun u_z v místě působení prvního dvojkolí pojížděných kolejnic. Vysvětlení legendy viz obr. 134. [128]	191
Obr. 142 Moduly pružnosti pro optimální variantu. Křivka PKP je kolejnicový pás jdoucí přímo opornicí, OKP je kolejnicový pás jdoucí přímým jazykem a přes srdcovku. [133]	193
Obr. 143 Svislý posun hlav kolejnic pro optimální variantu [133]	194
Obr. 144 Moduly pružnosti pro optimální variantu a varianty 1 až 4 [133]	195
Obr. 145 Varianta 1 – Svislý posun hlavy kolejnice přímé a odbočné větve [133]	196
Obr. 146 Varianta 2 – Svislý posun hlavy kolejnice přímé a odbočné větve [133]	196
Obr. 147 Varianta 3 – Svislý posun hlavy kolejnice přímé a odbočné větve [133]	197
Obr. 148 Varianta 4 – Svislý posun hlavy kolejnice přímé a odbočné větve [133]	197
Obr. 149 Vyhodnocované systémy upevnění v oblasti srdcovky.....	198
Obr. 150 Podložka v typickém uzlu upevnění č. 2 na pražci 19-186.....	200
Obr. 151 Podložka v typickém uzlu upevnění č. 2 na pražci 19-190.....	200
Obr. 152 Podložka v typickém uzlu upevnění č. 2 na pražci 19-193.....	201
Obr. 153 Podložka v typickém uzlu upevnění č. 2 na pražci 19-198.....	201
Obr. 154 Schéma průběhu zkoušky dle OTP: 1-výpočet sečné tuhosti; 2-nastavení deformace 0 mm; r-doba relaxace 1 min; d-hodnota trvalé deformace. [137]	206
Obr. 155 Schéma průběhu zkoušky dle EN: 1-síla F_{SP1} ; 2-síla F_{SP2} ; 3-síla F_{SPmax} ; 4-sledovaná hodnota posunutí d_{SP} ; 5-výpočet statické tuhosti k_{SP} [137]	207
Obr. 156 Uspořádání zkoušky podložky. [91]	210
Obr. 157 Základní rozměry podložky KSN Renogum (výřez z výkresu). [140]	215
Obr. 158 Sestava laboratorní zkoušky tuhosti nové podložky Renogum.	215
Obr. 159 Sestava laboratorní zkoušky tuhosti nové podložky Cellentic®.	216
Obr. 160 Podložky vybrané pro vytěžení a lab. zkoušení	217
Obr. 161 Sestava lab. zkoušky tuhosti užitých podložek KSN Renogum.	220

13 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání rázových sil P_1 a P_2 .	52
Tab. 2 Seznam údržbových zásahů na výhybkách 1 až 4.	89
Tab. 3 Hodnoty modulů přetvárnosti na zemní pláni pod výhybkou č. 3.	92
Tab. 4 Hodnoty modulů přetvárnosti na zemní pláni pod výhybkou č. 4.	92
Tab. 5 Hodnoty modulů přetvárnosti na pláni tělesa železničního spodku pod výhybkou č. 3.	93
Tab. 6 Hodnoty modulů přetvárnosti na pláni tělesa železničního spodku pod výhybkou č. 4.	93
Tab. 7 Provozní a mezní provozní odchylky rozchodu koleje dle [97].	125
Tab. 8 Provozní a mezní provozní odchylky výškové polohy kolejnicových pásů dle [97].	126
Tab. 9 Provozní a mezní provozní hodnoty převýšení koleje dle [97].	126
Tab. 10 Provozní a mezní provozní hodnoty zborcení koleje dle [97].	126
Tab. 11 Souhrn měření metodou nivelace vč. příslušné projeté zátěže.	127
Tab. 12 Souhrn měření metodou 3D skenování po dobu sledování vč. projeté zátěže.	132
Tab. 13 Souhrn projeté zátěže v kolejích č. 1 a č. 2 po dobu sledování.	138
Tab. 14 Seznam měřicích kampaní měření dynamických účinků na výhybce – železniční svršek.	140
Tab. 15 Spočítaná maxima, minima a mediány z měření zatlačení [mm] snímači posunutí při všech měřicích kampaních na výhybkách č. 3 a č. 4. [120–123]	142
Tab. 16 Seznam měřicích kampaní měření dynamických účinků na výhybce – pražcové podloží.	146
Tab. 17 Seznam měřicích kampaní měření zrychlení na ložiskové skřini lokomotivy. [117]	149
Tab. 18 Tuhostní vlastnosti pryžových podložek.	175
Tab. 19 Materiálové vlastnosti podložek zadané v modelu.	175
Tab. 20 Moduly pružnosti podložek použitých v jednotlivých variantách	195
Tab. 21 Výsledné moduly pružnosti a tuhosti podložek do vybraných uzlů upevnění.	199
Tab. 22 Zatížení pro měření tuhosti. [90].	209
Tab. 23 Výsledky laboratorních zkoušek statické tuhosti nepoužitých podložek KSN (Renogum a Cellentic®).	213
Tab. 24 Výsledky laboratorních zkoušek dynamické tuhosti nepoužitých podložek KSN (Renogum a Cellentic®).	214
Tab. 25 Výsledky laboratorních zkoušek statické tuhosti užitých podložek KSN (Renogum a Cellentic®).	217

Tab. 26 Výsledky laboratorních zkoušek dynamické tuhosti užitých podložek KSN (Renogum a Cellentic).....	218
---	-----

14 SEZNAM PŘÍLOH

1. Doplnující tabulky, přehledy a grafy

2. Grafy projeté zátěže (měřič TON1)

2.1 Projectá zátěž kumulativně

2.2 Projectá zátěž v roce 2014

2.3 Projectá zátěž v roce 2015

2.4 Projectá zátěž v roce 2016

2.5 Projectá zátěž v roce 2017

2.6 Projectá zátěž v roce 2018

2.7 Projectá zátěž v roce 2019

3. Pohledy a řezy srdcovek (3D skenování)

4. Grafy z měření výškové polohy temen kolejnicových pásů (nivelace)

4.1 Výhybka č. 2; Odchylky od projektované výškové polohy – pravý pás

4.2 Výhybka č. 2; Odchylky od projektované výškové polohy – levý pás

4.3 Výhybka č. 2; Převýšení koleje

4.4 Výhybka č. 3; Odchylky od projektované výškové polohy – pravý pás

4.5 Výhybka č. 3; Odchylky od projektované výškové polohy – levý pás

4.6 Výhybka č. 3; Převýšení koleje

4.7 JKS 3–4; Odchylky od projektované výškové polohy – pravý pás

4.8 JKS 3–4; Odchylky od projektované výškové polohy – levý pás

4.9 JKS 3–4; Převýšení koleje

4.10 Výhybka č. 4; Odchylky od projektované výškové polohy – pravý pás

4.11 Výhybka č. 4; Odchylky od projektované výškové polohy – levý pás

4.12 Výhybka č. 4; Převýšení koleje

4.13 Vzájemné porovnání: Sedání – vynesení výšek

4.14 Vzájemné porovnání: Sedání srovnané

4.15 Vzájemné porovnání: Sedání průměry

4.16 Vzájemné porovnání: Sedání srovnané upravené

4.17 Vzájemné porovnání: Sedání srovnané upravené

5. Grafy průběhů veličin měřené měřicím vozem železničního svršku

5.1 Výhybka č. 2; Rozchod koleje

5.2 Výhybka č. 2; Převýšení koleje

5.3 Výhybka č. 2; Podélná výška levá

5.4 Výhybka č. 2; Podélná výška pravá

5.5 Výhybka č. 2; Zborcení koleje na měřické základně 3 m

5.6 Výhybka č. 2; Zborcení koleje na měřické základně 6 m

5.7 Výhybka č. 2; Zborcení koleje na měřické základně 12 m

5.8 Výhybka č. 3; Rozchod koleje

5.9 Výhybka č. 3; Převýšení koleje

5.10 Výhybka č. 3; Podélná výška levá

- 5.11 Výhybka č. 3; Podélná výška pravá
- 5.12 Výhybka č. 3; Zborcení koleje na měřické základně 3 m
- 5.13 Výhybka č. 3; Zborcení koleje na měřické základně 6 m
- 5.14 Výhybka č. 3; Zborcení koleje na měřické základně 12 m
- 5.15 Výhybka č. 4; Rozchod koleje
- 5.16 Výhybka č. 4; Převýšení koleje
- 5.17 Výhybka č. 4; Podélná výška levá
- 5.18 Výhybka č. 4; Podélná výška pravá
- 5.19 Výhybka č. 4; Zborcení koleje na měřické základně 3 m
- 5.20 Výhybka č. 4; Zborcení koleje na měřické základně 6 m
- 5.21 Výhybka č. 4; Zborcení koleje na měřické základně 12 m

15 PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Osobní údaje	
Jméno a příjmení	Lukáš Raif
Rok a místo narození	1988, Vyškov
Vzdělání	
Rok	2014 – dosud
Titul, kvalifikace	Postgraduální studium
Název školy (organizace)	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika
Rok	2012 – 2014
Titul, kvalifikace	Ing.
Název školy (organizace)	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika
Rok	2008 – 2012
Titul, kvalifikace	Bc.
Název školy (organizace)	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika
Jazykové znalosti	
Anglický jazyk	úroveň C1 2015 – dosud: udržovací kurz UniStudies, s.r.o.
Německý jazyk	úroveň C1 2015 – dosud: udržovací kurz UniStudies, s.r.o. 2008 maturita
Odborná praxe	
Rok	2020 – dosud
Pracovní pozice	výzkumný, vývojový pracovník – vedoucí skupiny 1
Organizace	DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. Dolní 3737/100, 796 01 Prostějov
Rok	2015 – 2019
Pracovní pozice	výzkumný, vývojový pracovník
Organizace	DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. Dolní 3737/100, 796 01 Prostějov
Vědeckovýzkumná činnost	
Rok	2019 – dosud
Název projektu	Výhybka 4.0
Typ projektu	TA ČR, program Doprava 2020+
Pozice v projektu	řešitel
Rok	2016 – 2019
Název projektu	Switch and Crossing Optimal Design and Evaluation (S-CODE)
Typ projektu	EU, Shift2Rail, program Horizon2020
Pozice v projektu	spoluřešitel – vedoucí WP4 a WP6, řešitel dílčího úkolu

Rok	2015 – 2019
Název projektu	Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)
Typ projektu	TA ČR, program Centra kompetence
Pozice v projektu	spoluřešitel – řešitel dílčího úkolu, vedoucí za DT
Rok	2015
Název projektu	Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění
Typ projektu	TA ČR, program Alfa
Pozice v projektu	spoluřešitel – řešitel dílčího úkolu
Členství v pracovních skupinách a komisích	
Rok	2019 – dosud
Název pracovní skupiny	Národní platforma Shift2Rail
Pozice v prac. skupině	člen
Rok	2016 – dosud
Název pracovní skupiny	Národní technologická platforma Interoperabilita železniční infrastruktury (TP IŽI)
Pozice v prac. skupině	člen
Rok	2015 – dosud
Název pracovní skupiny	CEN/TC 256/SC01
Pozice v prac. skupině	WG18 – Switches and Crossings – Performance and Acceptance člen, vedoucí podskupiny DG16
Pedagogická a přednášková činnost	
Rok	2014 – 2015
Organizace	Fakulta stavební, VUT v Brně
Cvičení z předmětů	Konstrukce a dopravní stavby (2. roč.) Železniční stavby 1 (3. roč.) Železniční stavby 2 (4. roč.) Výuka v terénu (3. roč.)
Rok	2016, 2021
Organizace	Česká komora autorizovaných inženýrů (ČKAIT)
Témata přednášek	Výhybky se zpružněním v upevnění (2016) Konstrukce výhybek, vysokorychlostní výhybky (2021) Podpražcové podložky (2021)
Rok	2021
Organizace	VOŠ a SPŠ strojní, stavební a dopravní, Děčín
Témata přednášek	Konstrukce výhybek (3 přednášky)