



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

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SUMMARY OF DOCTORAL THESES

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Lukáš Raif

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. OTTO PLÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

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

KEYWORDS

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

© Ing. Lukáš Raif

Brno 2022

Místo uložení práce:

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav železničních konstrukcí a staveb

OBSAH

OBSAH	3
ÚVOD	5
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	6
1.1 Teoretická východiska.....	6
1.1.1 Průhyb jako vyjádření tuhosti kolejové jízdní dráhy	6
1.1.2 Změna tuhosti kolejové jízdní dráhy a vliv na dynamické namáhání	8
1.1.3 Průběh tuhosti kolejové jízdní dráhy podél výhybky.....	8
1.2 Současný stav v oblasti technických řešení.....	9
1.2.1 Zpružněné výhybky výrobce BWG.....	10
1.2.2 Dosavadní vývoj zpružněných výhybek v DT.....	10
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
2.1 stanovení dílčích cílů.....	12
2.1.1 Zhodnocení zkušebního úseku se zpružněnými výhybkami	12
2.1.2 Určení statické a dynamické odezvy VR výhybky.....	12
2.1.3 Návrh konstrukčního řešení zpružnění VR výhybky.....	13
2.1.4 Laboratorní zkoušky prvku systému upevnění zpružněné výhybky	13
3 SLEDOVÁNÍ STÁVAJÍCÍHO ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU	13
3.1 Popis zkušebního úseku.....	13
3.2 Metodika zpracování	14
3.2.1 Vlastní měření a vyhodnocení	14
3.2.2 Měření spolupracujících institucí	16
3.3 Dosažené výsledky	17
3.3.1 Výsledky vlastního měření.....	17
3.3.2 Výsledky spolupracujících institucí.....	18
3.3.3 Celkové hodnocení výsledků zkušebního úseku	19
4 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ NA ZÁKLADĚ ZJIŠTĚNÉ STATICKE A DYNAMICKÉ ODEZVY	20
4.1 Metodika zpracování	21
4.1.1 Vytvoření podkladu pro výpočtový model.....	21
4.1.2 Vytvoření konečně prvkového modelu pro analýzu.....	23
4.1.3 Předběžný variantní návrh konstrukčního řešení zpružnění.....	23
4.1.4 Úpravy na výpočtovém modelu se zahrnutím zpružnění.....	24

4.2	Dosažené výsledky	25
4.2.1	<i>Výsledky výpočtu na výhybce se stávajícími systémy upevnění</i>	<i>25</i>
4.2.2	<i>Výsledky výpočtu na výhybce se zpružněnými systémy upevnění.....</i>	<i>26</i>
4.2.3	<i>Závěr a doporučení pro uvedení do praxe</i>	<i>27</i>
5	LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ SYSTÉMŮ UPEVNĚNÍ	28
5.1	Metodika zpracování	28
5.2	Dosažené výsledky	28
5.2.1	<i>Diskuze výsledků laboratorního zkoušení</i>	<i>29</i>
6	SOUHRN VÝSLEDKŮ.....	29
6.1	Stanovení zásad pro konstrukci výhybek vedoucích ke snížení dynamického namáhání	30
7	ZÁVĚR	32
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	33
	ŽIVOTOPIS AUTORA	37
	ABSTRACT.....	39

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 pojížděných 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, 7].

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, 8–10]. 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 [11–13]. 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 [14]. 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 železnic ani Železnic Slovenskej Republiky 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) [15].

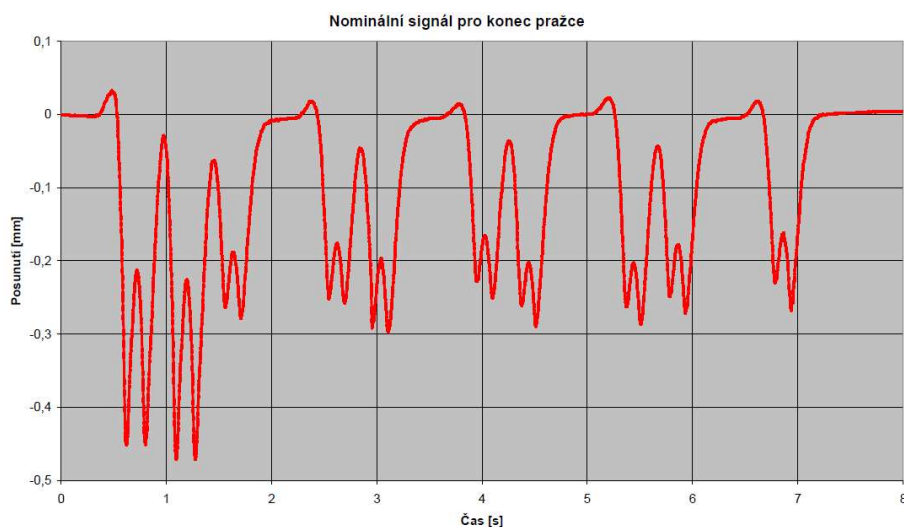
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

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. [16–18]. Je nutno ale podotknout, 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 [13].

1.1 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

1.1.1 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. 1). 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. 1 Poklesová křivka měřená na konci pražce (hlavě pražce) při průjezdu vlaku [19]

Existují dva základní přístupy, kterými se lze průhybu kolejnice stanovit. 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. metodou konečných prvků pomocí software ANSYS, kterým lze v současné době snadno vypočítat 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. 4.1.1), 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.

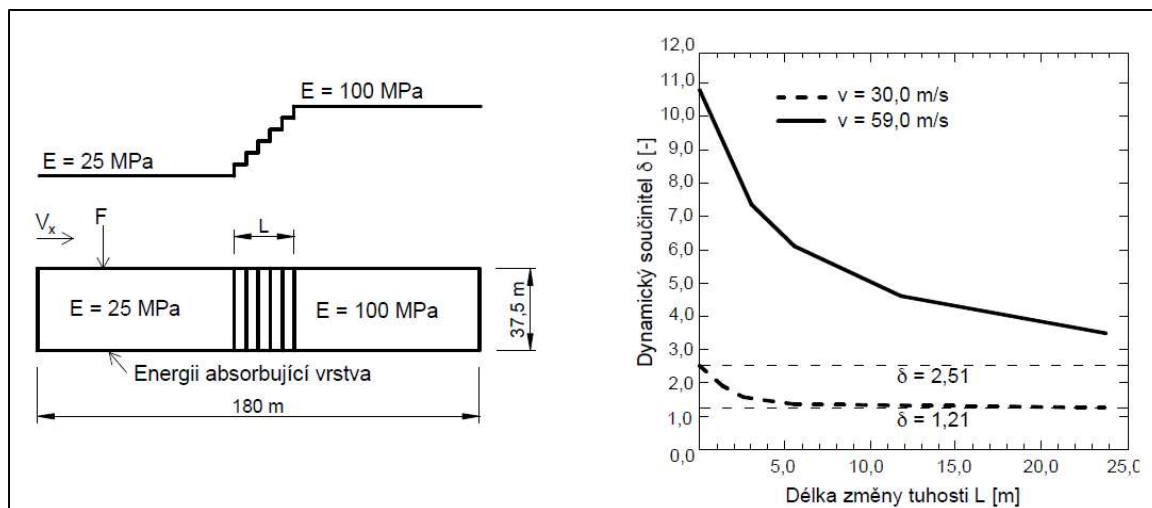
Při řešení chování výhybky pomocí výpočtového modelování, resp. řešení návrhu zpružnění ve výhybkách, je vhodné porovnat výsledky výpočtu pomocí analytických metod, kterými lze průhyb (resp. další nezbytné související veličiny vč. tuhosti) přibližně spočítat. Základní rozdělení známých analytických modelů je následující [20–24]:

- 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. Druhým známým modelem, který o něco lépe vystihuje reálné chování koleje zavedením smykových sil do statické soustavy, je model podloží dle Pasternaka. Dalším stupněm je modelování dvouvrstvého systému, jehož řešení se stává 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. [22, 25] Při řešení dynamické soustavy lze aplikovat postup výpočtu dle Frýby. [26]

1.1.2 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. 2), viz [27].



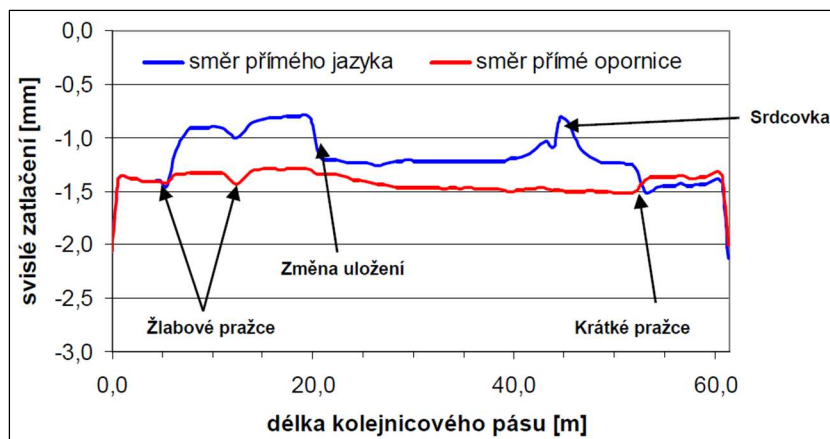
Obr. 2 Závislost délky změny v tuhosti na dynamickém účinku [27]

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.

1.1.3 Průběh tuhosti kolejové jízdní dráhy podél výhybky

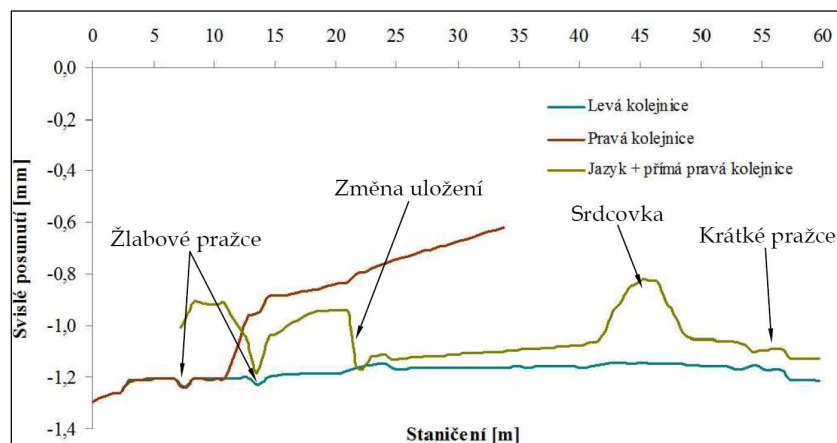
Z předpokladu, že výhybka obsahuje diskontinuity v tuhosti kolejové jízdní dráhy, vycházelo už mnoho výzkumných prací. Snahou výzkumné činnosti bylo najít ve výhybce místa, která jsou tužší, resp. najít průběh tuhosti ve svislém i příčném směru. V souvislosti s návrhem zpružnění pomocí podpražcových podložek (USP) se problematikou tuhosti kolejové jízdní dráhy zabýval Ústav železničních konstrukcí a staveb Fakulty stavební VUT v Brně (dále i jako VUT) [28–31]. Zde byl výpočtovým modelováním zjištěn průběh tuhosti patrný z následujícího grafu (obr. 3). 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. 3 Průběh tuhosti ve výhybce dle VUT v Brně [5]

Podobný průběh tuhosti zjistila 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 modelován 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 VUT [5, 32].



Obr. 4 Průběh tuhosti ve výhybce dle DT [13, 33, 34]

1.2 SOUČASNÝ STAV V OBLASTI TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ

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.). Dále jsou zmíněny pouze dvě významnější aplikace zpružnění v systému upevnění, které se vyskytují, resp. vyskytly v síti Správy železnic. Podrobná rešerše současného stavu je k dispozici v plné verzi disertační práce.

1.2.1 Zpružněné výhybky výrobce BWG

První zkušenosti v České republice s výhybkami zpružněnými v uzlu upevnění přišly na počátku 90. let, kdy bylo Českými drahami (tehdejší správce 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. (obr. 5). 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. FAKOP. Příslušné díly pražců jsou spojeny prvkem s tlumičem kmitání. Toto konstrukční uspořádání je u DB standardně používáno pro vysokorychlostní trati. [35]



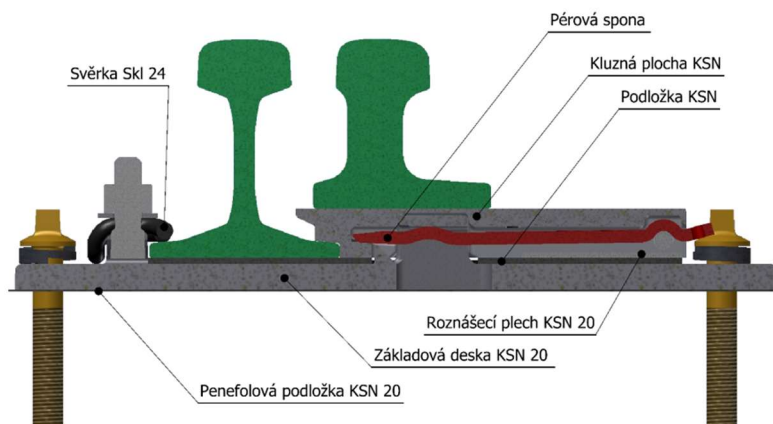
Obr. 5 Zpružněný systém upevnění ERL na výhybce BWG v žst. Poříčany.

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} . [36]

1.2.2 Dosavadní vývoj zpružněných výhybek v DT

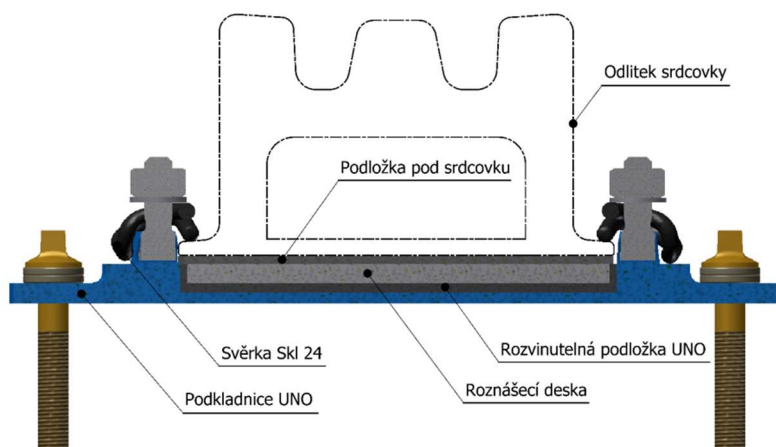
V souvislosti s vložením zahraničních výhybek zpružněných v uzlu upevnění bylo snahou českého dodavatele výhybek DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. vyvinout obdobný způsob řešení zpružněného upevnění do výhybek.

Standardně dodávaná kluzná stolička má kluznou plochu přivařenou k základové desce podkladnice, 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. 6). Kluzná deska byla zkonstruována jako odnímatelná a pomocí perové spony pružně uchytilelná tak, aby bylo možno pod ni vložit pružný prvek, díky kterému je jazyk i s opornicí uložen nyní pružně.



Obr. 6 Zpružněná kluzná stolička KSN 20 s odnímatelnou kluznou plochou umístěnou na pružné podložce [37]

Druhým uzlem upevnění, který vyžadoval dle výsledků výpočtového modelování zpružnit, bylo upevnění odlitku srdcovky (viz obr. 7). 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 podkladnice (čemuž je tak např. u odlitků srdcovek ze Slévaren Třinec, a.s.). 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. 7 Zpružněný systém upevnění pod odlitek srdcovky UNO X [37]

2 CÍLE DISERTAČNÍ 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.**

2.1 STANOVENÍ DÍLČÍCH CÍLŮ

2.1.1 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 [38–41] bylo dosaženo vložení výhybek se zpružněním (viz Obr. 6 a Obr. 7) 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 (nivelace temen kolejnicových pásů, 3D skenování pojezdových 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, UPCE¹, původně také ČVUT), které bylo provedeno ve zkušebním úseku, z důvodu následného **globálního hodnocení zkušebního úseku, což je rovněž dílčím cílem disertační práce.**

2.1.2 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

¹ UPCE – Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera; ČVUT – České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.

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.

2.1.3 Návrh konstrukčního řešení zpružnění VR výhybky

Na základě dostupných výsledků ze zkušebního úseku se zpružněními výhybkami a z výsledků výpočtového modelování byl proveden **vlastní návrh optimálního způsobu modifikace tuhosti po délce výhybky**. Byl tedy proveden předběžný návrh zpružnění na základě dosavadních znalostí a dostupných materiálů použitelných do systémů upevnění. Výsledkem by nemělo být pouze řešení pro aktuálně vyvinutou výhybku tvaru J60-1:33,5-8000-4000-14000-PHS, ale hlavním výsledkem byl návrh obecného řešení a zásad, jakými bude moci být úprava tuhosti ve vysokorychlostních výhybkách v budoucnu řešena. Tento dílčí cíl je velice úzce provázán s předchozím dílčím cílem a je o nich v rámci práce pojednáno souhrnně v rámci jedné kapitoly.

2.1.4 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 vlastní asistence.

3 SLEDOVÁNÍ STÁVAJÍCÍHO ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU

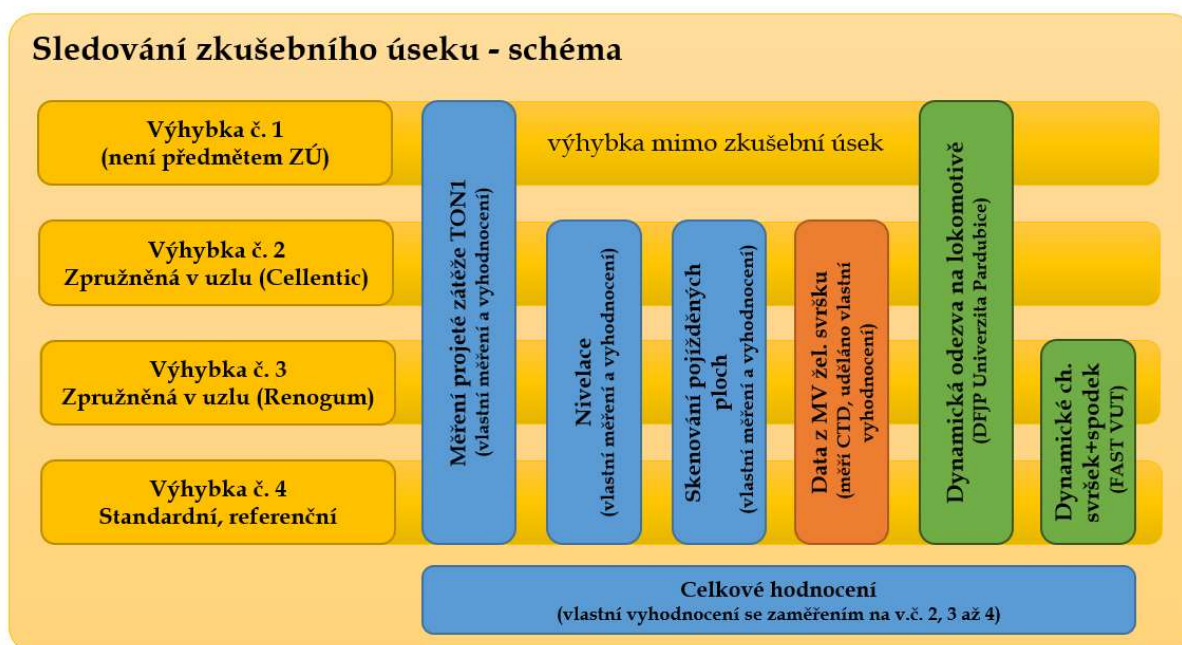
3.1 POPIS ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU

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. 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. 1.2.2. 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.

3.2 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 a rovněž byl navržen podrobně plán sledování celého zkušebního úseku. 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. 8 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

3.2.1 Vlastní měření a vyhodnocení

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 [42] vzniklé za řešení projektu [40] 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 byla prováděna nivelačním přístrojem Leica Sprinter 150M, jehož střední kilometrická chyba je 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,

a to v závislosti na projeté zátěži.

Graf výšek temen kolejnicových pásů je prostým vynesáním 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).

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.

Skenování pojižděných 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 [43]. Tato speciální skenovací měřidla umožňují nasnímání 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.

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 [44]. Toto zařízení umožňuje kontinuálně měřit projetou zátěž, rychlost a směr průjezdu vlaku, přičemž je určováno pořadí a hmotnost každé nápravy jednotlivých vlaků.

3.2.2 Měření spolupracujících institucí

Měření dynamických účinků na výhybky

Měření dynamických účinků působících na výhybky při průjezdu železničních vozidel provádělo VUT dle metodik, které byly výsledkem projektu [38–41]. 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*“ [45].
- 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*“ [46].

Měření dynamické odezvy na ložiskové skříni 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 UPCE, která se takovým typem měření zabývá již delší dobu. [47, 48] Zadáním úkolu tedy bylo měřit dynamickou odezvu na ložiskové skříni lokomotivy při průjezdu zpružněnými výhybkami a výhybkou referenční, navrhnout způsob hodnocení a provést srovnání výhybek mezi sebou. [49]

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 pojižděného vozidla*. [50] Toto měření bylo realizováno již v projektu [40, 41] 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 vlcích. Obvykle je pro tato měření určena lokomotiva řady 380.

Měřicí vůz železničního svršku TÚDC (CTD)

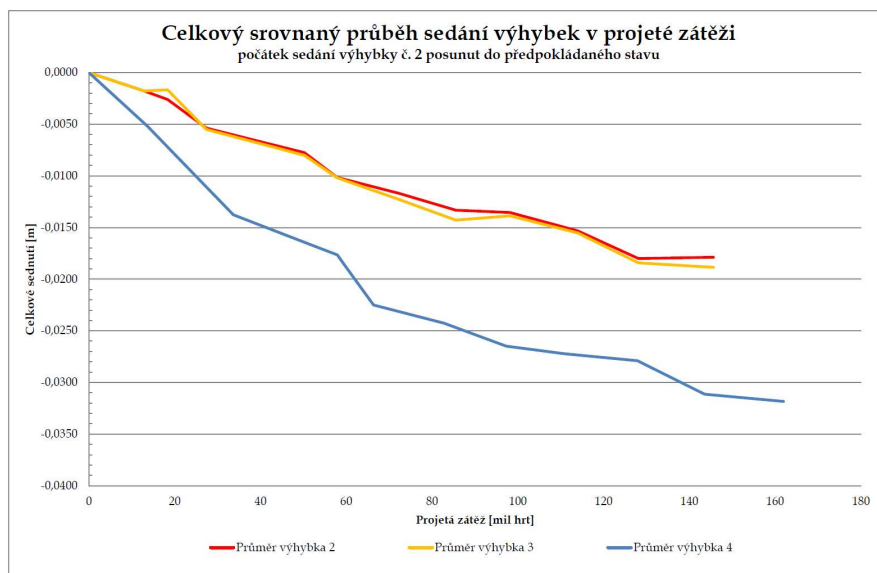
Nezanedbatelným přínosem pro sledování zkušebního úseku se zpružněnými výhybkami byl také příspěvek samotné Správy železnic, která pravidelně poskytovala data z měřicího vozu železničního

svršku. Činnost související s měřicím vozem spadá konkrétně pod organizační jednotku Centrum telematiky a diagnostiky. 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“ [51].

3.3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

3.3.1 Výsledky vlastního měření

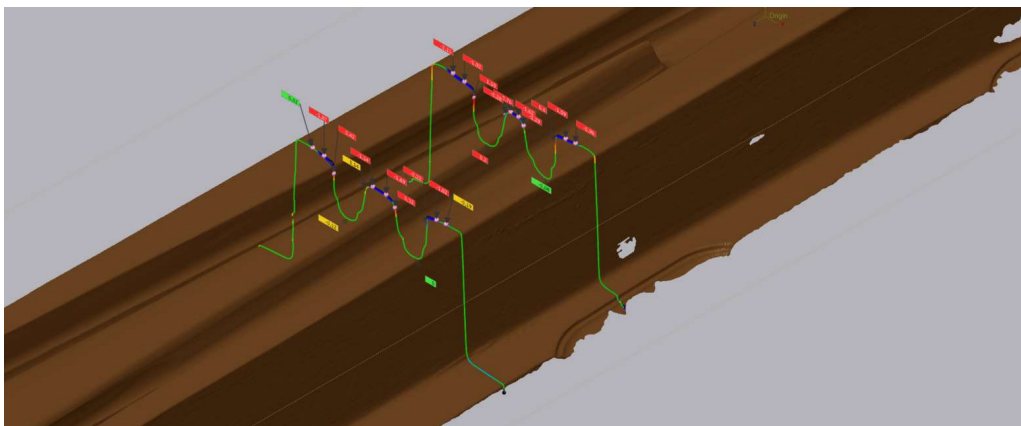
Pravidelné sledování **výškové polohy temen kolejnicových pásů** obou výhybek metodou nivelace přineslo stěžejní informace o stavu výhybek z hlediska trvanlivosti geometrických parametrů koleje a míry sedání v projeté zátěži. Toto vyhodnocení přineslo cenné informace zejména ve vztahu k četnosti provádění 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 nezatíženému 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 významnější 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 vykázaly 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**.



Obr. 9 Celkový srovnaný průběh sedání v projeté zátěži – průměry pro jednotlivé výhybky

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 vyloženě 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.



Obr. 10 Zobrazené 2D řezy v rámci celé naskenované plochy srdcovky

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.

3.3.2 Výsledky spolupracujících institucí

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 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 [52–58].

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 skříní lokomotivy a na podvozku. Na ložiskové skříní 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. [59–61]

Výstupy z **měřicího vozu železničního svršku CTD** poskytly cenná data z globálního sledování výhybek pod zatížením. Z hlediska měřicího vozu se jedná o vlastní vyhodnocení surových poskytnutých dat. 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. 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.

3.3.3 Celkové hodnocení výsledků zkušebního úseku

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 neprojevovalo 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 výhybky 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. 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 v plné verzi disertační práce), že na sílu P_1 , 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 P_2 , 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 P_2 , 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.

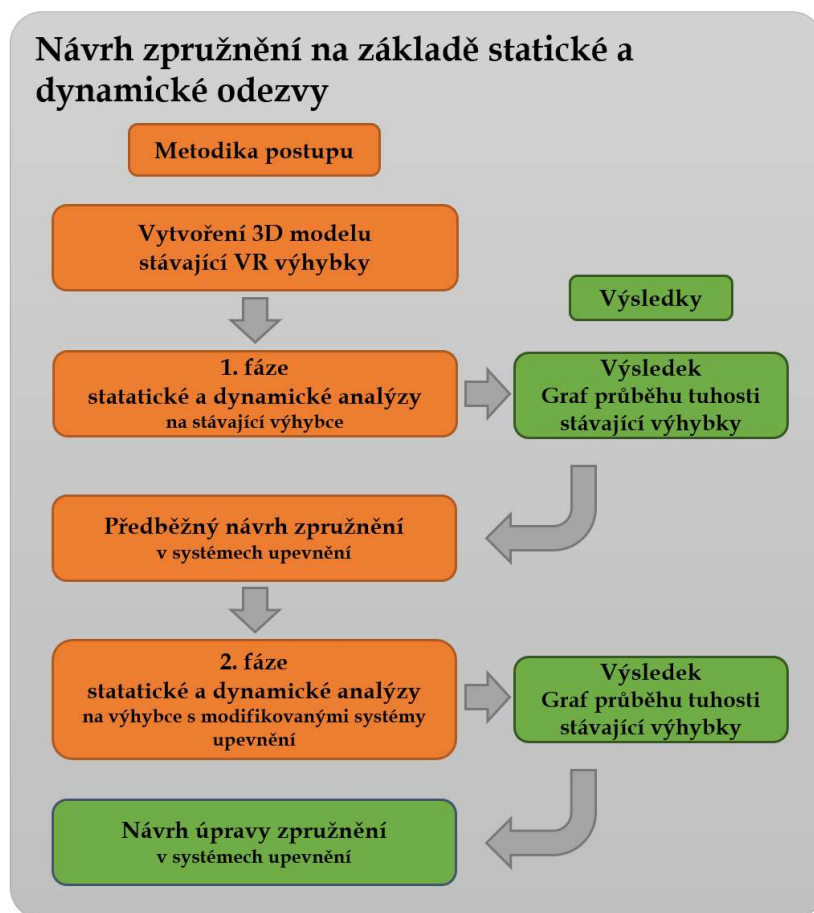
4 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ NA ZÁKLADĚ ZJIŠTĚNÉ STATICKÉ A DYNAMICKÉ ODEZVY

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 jakéhokoli typu (ZMB 3, ZPTZ apod.). Toto řešení bylo následně **provozně ověřeno s pozitivními výsledky** (viz výše). 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 reprezentant 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. 11.

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. 11 Postup dílčích činností vedoucích k dosažení cíle

4.1 METODIKA ZPRACOVÁNÍ

4.1.1 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 následujícím obrázku s detailem srdcovkové části.

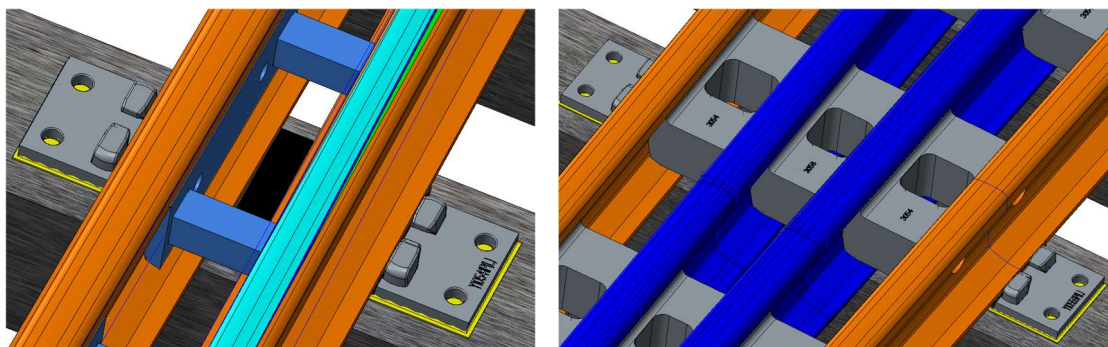
Z hlediska celého modelu jsou nejsložitější část srdcovková a část výměnová. Části střední (celkem dvě vzhledem k délce) a dodatky před a za výhybku nejsou z hlediska konstrukčního řešení významně odchylné od běžných výhybek. Konstrukční řešení všech systémů upevnění vychází

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 dvojítm pružným kroužkem.



Obr. 12 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 [62]

Srdcovková část výhybky (viz obr. 12) 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 ilustrativního obr. 13.



Obr. 13 Ilustrativní obrázek systémů upevnění před odlévaným rámem PHS a za odlévaným rámem PHS vč. patrných vložek

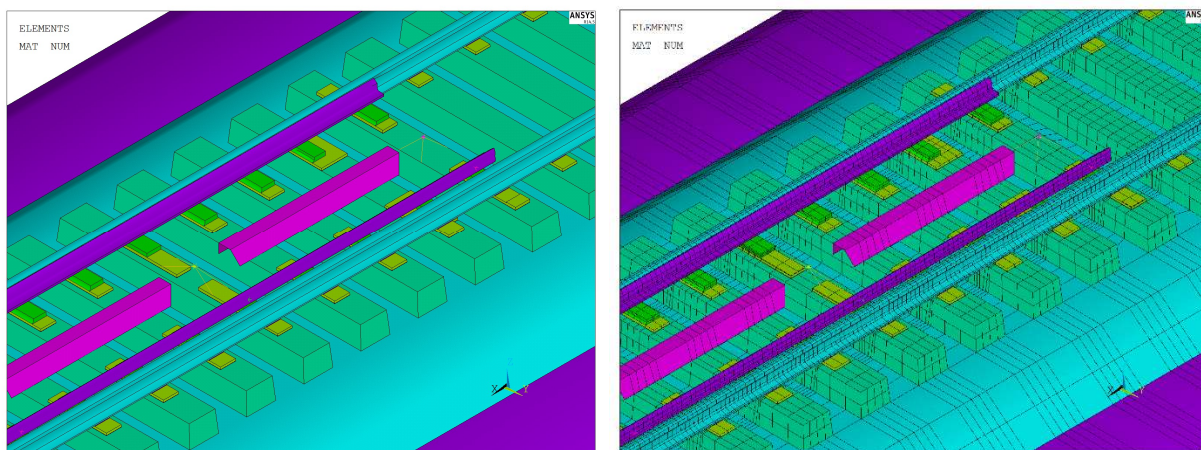
Srdcovka je konstruována s odlévaným rámem z bainitické oceli s přivařenými přípojnými kolejnicemi směrem ke střední části a s přivařenými křídlovými kolejnicemi standardního širokopatního profilu pokračujícími směrem ke konci výhybky. Krajiní kolejnice jsou řešeny standardně bez použití přídržnic vzhledem k nepřerušené pojížděné 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 bezстыkové 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

systemy DTZ 6/3 včetně snímače rozřezu, které byly následně do výpočtového modelu vloženy jako soustředěné hmotnosti do těžiště zařízení.

4.1.2 Vytvoření konečně prvkového modelu pro analýzu

Na zpracování statické a dynamické odezvy se podílel zejména Ústav stavební mechaniky Fakulty stavební VUT v Brně, se kterým bylo v této věci úzce spolupracováno. [63] 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) [63].



Obr. 14 Ukázka zjednodušení oblasti začátku výhybky po importu do sw. ANSYS, vpravo pak s vytvořenou sítí konečných prvků [63]

4.1.3 Předběžný variantní návrh konstrukčního řešení zpružnění

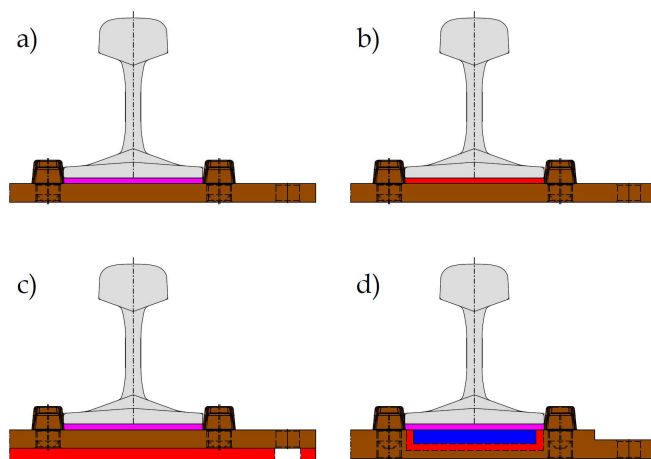
Stávající stav konstrukčního zpracování vysokorychlostní výhybky nijak nereflektuje změny v tuhosti jízdní dráhy. Po získání výsledků výpočtového modelování stávajícího stavu je tedy potřeba navrhnout předběžný způsob zpružnění v systému upevnění, které bude vstupovat do další fáze výpočtového modelování s upravenými systémy upevnění. Hlavní inspirací pro návrh zpružnění byla provedená rešerše způsobů zpružnění se zohledněním výsledků vyhodnocení zkušebního úseku s výhybkami se zpružněním v žst. Ústí nad Orlicí. 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 užitá pryžová, za podložku z nějakého modernějšího materiálu (jako např. Cellentic® nebo Sylodyn®).

Nejproblematictější z celé výměnové části se jeví **srdcovková část** výhybky, a to z hlediska komplikovaného řešení systémů upevnění, které bylo nastíněno v kap. 4.1.1. 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. 15. 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. 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 zpružených konvenčních výhybkách provozně ověřovaných v žst. Ústí nad Orlicí.



Obr. 15 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 způsoby zpružnění pro jednotlivé typické uzly upevnění v oblasti srdcovky dle řešení systému upevnění UNO3718 (varianta d) a modifikovaná varianta b) kde nebylo možno dobře aplikovat varinatu d), tj. v oblasti odlévaného rámu srdcovky. Tento návrh následně dále vstupoval do výpočtu.

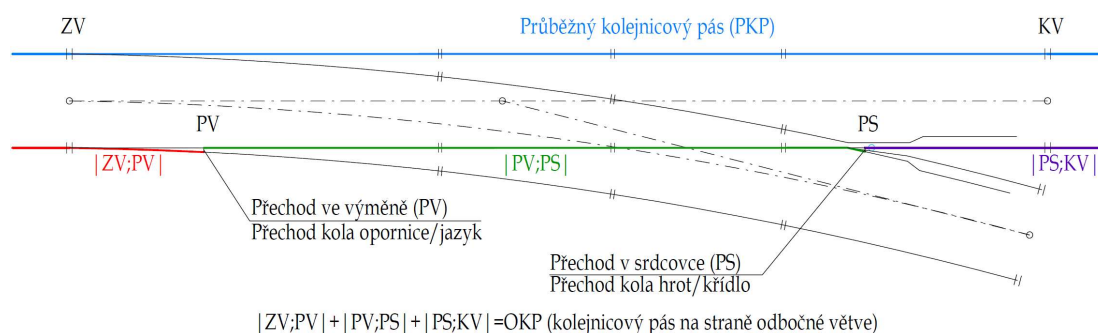
4.1.4 Úpravy na výpočtovém modelu se zahrnutím zpružnění

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 [64].

4.2 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

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 řešerše obr. 3 a obr. 4.

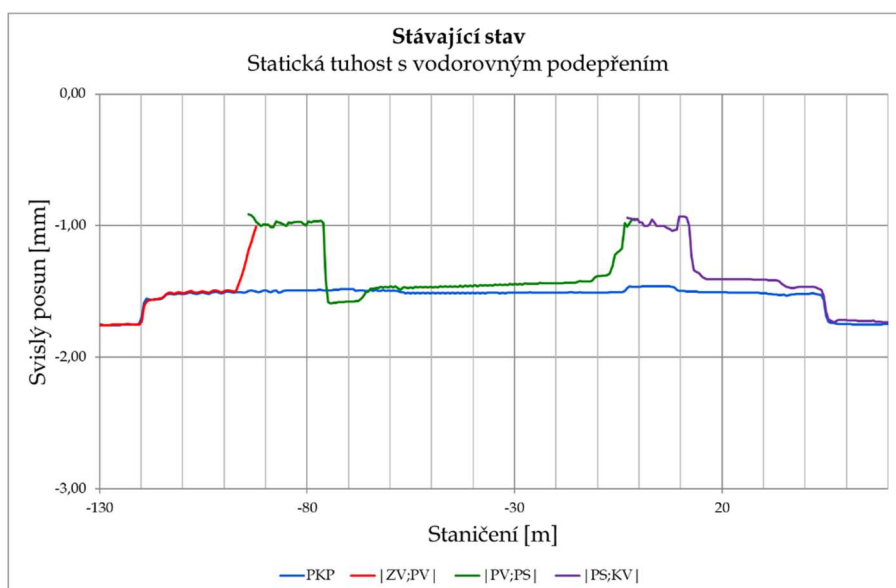
Stěžejním výsledkem této kapitoly je konkrétní návrh zpružnění, který popisuje použití podložek o konkrétních charakteristikách do vybraných systémů upevnění vysokorychlostní výhybky. Pro výsledky tuhosti podél výhybky je použita konvence označení kolejnicových pásů dle obr. 16. Zde uvedené grafy budou vyjadřovat tuhost jízdní dráhy pouze přímým směrem výhybky.



Obr. 16 Barevné označení kolejnicových pásů použité v následujících grafech

4.2.1 Výsledky výpočtu na výhybce se stávajícími systémy upevnění

Výsledný graf průhybů kolejnic pro případ podložek se statickými tuhostmi je uveden na obr. 17. Grafy tvoří spojnice mezi 354 body a odpovídají zatížení dvěma kolovým silám jedné nápravy ($2 \times 112,5$ kN). Vodorovná osa označená *Staničení* odpovídá polohám zatížení silami vázaných na souřadnice osy x výpočtového modelu, počátek (tedy 0) je v matematickém bodě křížení srdcovky.



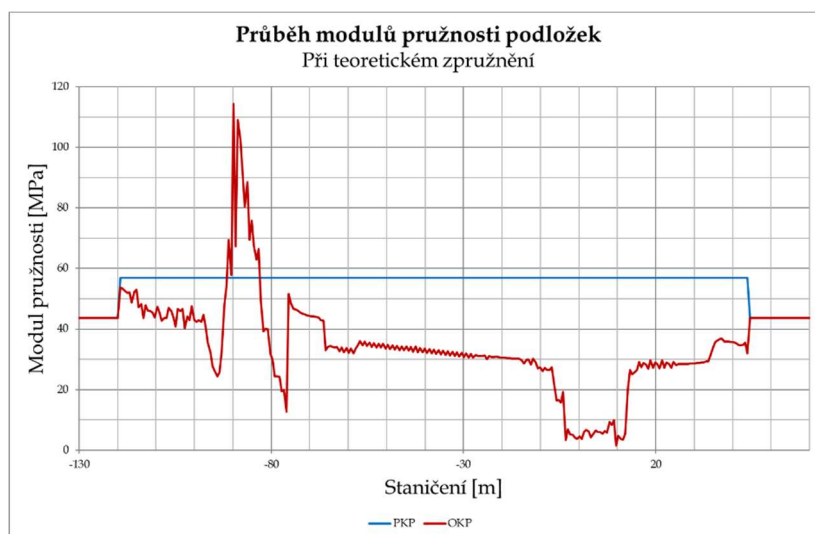
Obr. 17 Svislý posuv hlav kolejnic pro případ modelu s vodorovně neposuvným uložením. Vysvětlení legendy viz obr. 16 [63]

Na první pohled lze z grafů identifikovat velkou podobnost s dříve publikovanými pracemi, viz kap. 1.2, resp. obr. 3 a obr. 4. Lze říci, že výsledky tuhosti kolejové jízdní dráze ve výhybce bez zpružnění jsou očekávané. 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. Tuhá oblast výměny končí poslední kluznou stoličkou s přechodem na patrové podkladnice. 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. Rovněž oblast za rámem s křídlými kolejnicemi a instalovanými vložkami pro zajištění přenosu sil z bezstykové koleje působí velmi tuze. Před bodem konce výhybky toto významné ztužení opět klesne na ztužení vyvolané použitím výhybkových pražců [5, 63, 65, 66].

4.2.2 Výsledky výpočtu na výhybce se zpružněnými systémy upevnění

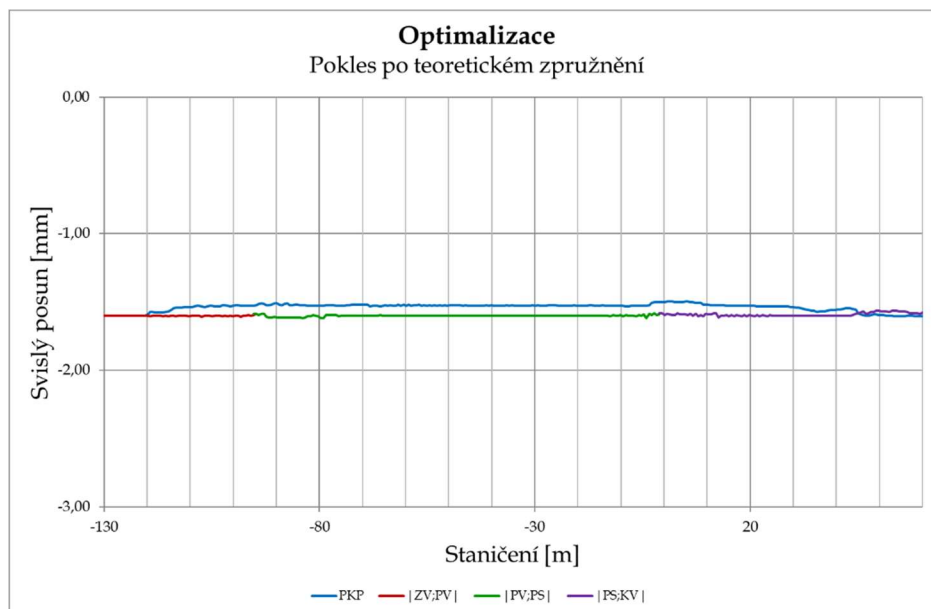
Po návrhu zpružnění do systémů upevnění a úpravy výpočtového modelu bylo cílem následující potlačení nepravidelností průhybu kolejnic. Nejprve bylo spočítána čistě teoretická optimalizace tuhostí podložek tak, aby průhybová křivka podél výhybky byla co nejhladší, tj. aby byly eliminovány oblasti s významně jiným průhybem kolejnic v grafech průběhů tuhosti na stávající variantě, viz obr. 17.

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 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).



Obr. 18 Moduly pružnosti pro optimální variantu. Křivka PKP je kolejnicový pás jdoucí přímou opornicí, OKP je kolejnicový pás jdoucí přímým jazykem a přes srdcovku [64]

Na prvním uvedeném obr. 18 je výsledný průběh hodnot modulů pružnosti podložek pro teoreticky optimalizovanou variantu. Svislá osa představuje 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. Příslušný svislý posun pojížděných kolejnic pro uvedený případ ilustruje obr. 19. V něm jsou tedy použity podložky o modulech pružnosti uvedené v grafu obr. 18.



Obr. 19 Svislý posun hlav kolejnic pro optimální variantu [64]

4.2.3 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 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 vyrobit 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.

5 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.

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**.

5.1 METODIKA ZPRACOVÁNÍ

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 [67];
- DBS 918 235 Elastische Zwischenlagen und Zwischenplatten [68];
- 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 [69].

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.

5.2 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

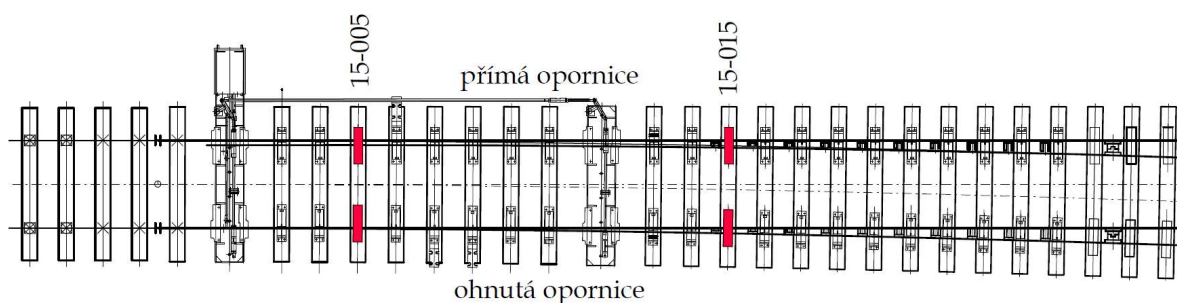
V rámci této disertační práce byly provedeny následující laboratorní zkoušky tuhosti podložek:

- užitá podložka systému upevnění KSN 20;
- nová podložka systému upevnění KSN 20.

V rámci sledování zkušebního úseku výhybek se zpružněným upevněním v žst. Ústí nad Orlicí 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 VUT.



Obr. 20 Podložky vybrané pro vytěžení a lab. zkoušení

5.2.1 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 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 [38–41]. Na zkušebním úseku pak probíhalo jak **vlastní měření, na které je zaměřena tato disertační práce (nivelace, 3D skenování poježděných 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 **připraven 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.).

6.1 STANOVENÍ ZÁSAD PRO KONSTRUKCI VÝHYBEK VEDOUCÍCH 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 uvěřování 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 neprokázal 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. 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 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 vykonáváno 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.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [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 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.
- [8] AUER, Florian, Rodolphe POTVIN, Otto PLÁŠEK and Miroslava HRUZÍKOVÁ. Podpražcové podložky v koleji. *Nová železniční technika*. 2015, **2015**(1), 21–28.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] RAIF, Lukáš, Bohuslav PUDA, Jiří HAVLÍK and Marek SMOLKA. Výhybky se zpružněnými uzly upevnění v ŽST Ústí nad Orlicí. *Silnice železnice*. 2015, 70–72.
- [13] SMOLKA, Marek, Bohuslav PUDA, Josef ZBOŘIL and Petr HAVLÍČEK. *Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění*. 2011
- [14] 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.
- [15] MUCHA, Petr. *Podklady projektu VH 18 004 Systémy upevnění do výhybek pro pevnou jízdní dráhu*. Prostějov: DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. 2021
- [16] ČECHÁK, Josef. *Výhybky: soust. T, R65, S49 první a druhé generace, UIC60*. Praha: KPM CONSULT, 2008.
- [17] KOLEKTIV. *Výhybky a ocelový materiál pro železniční svršek*. Praha: Ministerstvo hutního průmyslu a rudných dolů Hlavní správa odbytu, 1955.
- [18] VLASÁK, Jaroslav. *Výhybky a výhybková spojení*. Praha: NADAS, 1983. ISBN 31-050-83-05-92.

- [19] PLÁŠEK, Otto. *Teoretická a experimentální analýza chování betonových pražců v kolejovém loži*. Brno, 2006. b.n.
- [20] KULICH, Pavel. *Dynamická analýza koleje*. Brno, 2017. b.n.
- [21] 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.
- [22] ESVELD, Coenraad. *Modern railway track*. 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, 2001. ISBN 90-800-3243-3.
- [23] 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.
- [24] FRÝBA, Ladislav. *Vibration of solids and structures under moving loads*. Vyd. 3., a. Prague: Academia, 1999. ISBN 80-200-0715-6.
- [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] FRÝBA, Ladislav. *Dynamika železničních mostů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1992. ISBN 80-200-0262-6.
- [27] SIDERIUS, R.M. *Feasibility of EPS as a lightweight sub-base material in rail structures*. Delft: TU Delft. 1998
- [28] PLÁŠEK, Otto. *Závěrečná zpráva o realizaci projektu TA01031173 za rok 2013: Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledků za rok 2013*. 2013.
- [29] 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>
- [30] 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>
- [31] PLÁŠEK, Otto and Richard SVOBODA. *Zkušební deska pro podpražcové podložky* [online]. Available at: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0022/uv022176.pdf>
- [32] 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.
- [33] 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)
- [34] 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.
- [35] 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.

- [36] *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
- [37] RAIF, Lukáš, Bohuslav PUDA, Jiří HAVLÍK and Marek SMOLKA. Výhybky se zpruženými uzly upevnění v ŽST Ústí nad Orlicí. *Silnice železnice*. 2015. ISSN 1801-822X.
- [38] SMOLKA, Marek, Jaroslav SMUTNÝ and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Průběžná zpráva o realizaci projektu TA01031297 za rok 2012*. 2012
- [39] SMOLKA, Marek, Jaroslav SMUTNÝ and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Průběžná zpráva o realizaci projektu TA01031297 za rok 2013*. 2013
- [40] SMOLKA, Marek, Jaroslav SMUTNÝ and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Průběžná zpráva o realizaci projektu TA01031297 za rok 2014*. 2014
- [41] SMOLKA, Marek, Jaroslav SMUTNÝ and Hana KREJČÍŘÍKOVÁ. *Závěrečná zpráva o realizaci projektu TA01031297 za rok 2015*. 2015
- [42] KREJČÍŘÍKOVÁ, Hana. *Měření dlouhodobé stability výškové polohy výhybek a výhybkových konstrukcí*. 2014
- [43] KLEMENT, Miloslav. *Zásady snímání a vyhodnocení geometrického tvaru výhybkových konstrukcí pomocí 3D skeneru*. 2015
- [44] ŽÁK, Michal. *Validace měřiče provozního zatížení TONI. Ověřovací provoz. Statistika*. Prostějov: DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. 2010
- [45] SMUTNÝ, Jaroslav, Luboš PAZDERA and Ivan VUKUŠIČ. *Hodnocení dynamických účinků v konstrukci pražcového podloží výhybky*. 2014
- [46] SMUTNÝ, Jaroslav, Luboš PAZDERA and Ivan VUKUŠIČ. *Hodnocení dynamických účinků působících na výhybky*. 2014
- [47] ZELENKA, Jaromír. *Simulační výpočet dynamické odezvy lokomotivy o hmotnosti 90 t při průjezdu výhybkou*. Česká Třebová: Asociace strojních inženýrů, klub Česká Třebová. 2013
- [48] 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
- [49] ZELENKA, Jaromír, Aleš HÁBA and Martin KOHOUT. *Hodnocení dynamické odezvy vozidla při průjezdu konstrukčními částmi výhybky*. In: *21. mezinárodní seminár Traťové stroje v teorii a praxi: zborník prednášok*. Žilina: VTS pri Žilinskej univerzite, 2016, p. 181–188. ISBN 978-80-89276-52-3.
- [50] 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
- [51] *SŽDC SR103/4(S) Využívání měřících vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2010
- [52] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza dynamických parametrů ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2016.
- [53] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza dynamických parametrů ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2018.
- [54] SMUTNÝ, Jaroslav. *Analýza dynamických parametrů ve výhybkách č. 3 a č. 4 při průjezdu vlakových souprav, lokalita Ústí nad Orlicí*. 2019.

- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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
- [60] 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
- [61] 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
- [62] ZBOŘIL, Josef. *Zpráva interního výzkumně-vývojového projektu. Zpráva 14/01 projektu VH 10 100*. 2014.
- [63] 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.
- [64] 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: 2. část - Výpočty na modelu výhybky se zpružněním*. 2017.
- [65] SALAJKA, Vlastislav. *Výpočet tuhosti uložení kolejnic na pražcích se zpružněným uložením kolejové jízdní dráhy ve výhybce J60-1:12-500-I,zl,b: Statický výpočet*. 2011.
- [66] 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.
- [67] ČSN EN 13146-9 *Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 9: Stanovení tuhosti*. Praha: ÚNMZ. 2021
- [68] DBS 918 235 *Elastische Zwischenlagen und Zwischenplatten*. B.m.: Deutsche Bahn. 2006
- [69] *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

ŽIVOTOPIS 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
	WG18 – Switches and Crossings – Performance and Acceptance
Pozice v prac. skupině	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)

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.