



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

ANALÝZA DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ PŮSOBÍCÍCH NA ŽELEZNIČNÍ VÝHYBKY ANALYSIS OF DYNAMIC EFFECTS ACTING ON RAILWAY CROSSINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

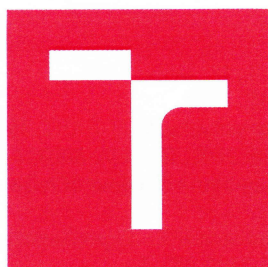
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Daniela Vukušičová

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
PRACOVISŤE	Ústav železničních konstrukcí a staveb

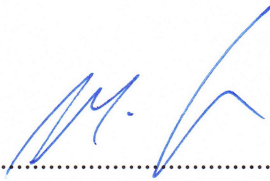
ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Daniela Vukušičová
NÁZEV	Analýza dynamických účinků působících na železniční výhybky
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016


.....
doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- Jurda K., Drahoš M.: Železniční spodok a svršok I., II., Nadas 1988
Vlasák J.: Výhybky a výhybková spojení, NADAS, 1983
Smutný J., Pazdera L.: Železniční stavby – měřicí technika, VUT FAST, 1998, ISBN 80-214-0976-2
Coenraad Esveld: Modern railway track, TU Delft, 2001, ISBN 90-800324-3-3
Popp K., Schiehlen W.: System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade, Springer, ISBN 3540438920, 2002
Moravčík M., Moravčík M.: Mechanika železničních tratí 3 – Experimentálna analýza namáhania a pretvorenia komponentov trate, EDIS, Žilina, 2002, ISBN 80-7100-985-7
Plášek O., Zvěřina P., Svoboda R., Mockovčík M.: Železniční stavby, Cerm, 2004, ISBN 80-214-2621-7
Hodnocení dynamických účinků působících na výhybky, Certifikovaná metodika, Ministerstvo Dopravy - odbor kosmických aktivit a ITS, 124/2014-710-VV/1, 2014

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Podkladem pro výběr a srovnání zejména nových částí kolejového svršku jsou kromě teoretické analýzy (modelování), také statické a dynamické zkoušky prováděné v laboratoři a v terénu (přímo v koleji). Nutno podotknout, že teoretická analýza aplikací matematického modelování často vychází ze značně zidealizovaných předpokladů. Proto je vhodné jednotlivé konstrukce ověřovat měřeními. Náplní diplomové práce bude experimentální analýza dynamických účinků působících na výhybky včetně návrhu, případně úpravy již existující metodiky měření a analýzy naměřených parametrů. Předpokládá analýza naměřených dat se zaměřením na rozvoj dynamických parametrů v čase a se zaměřením na vliv tuhosti uzlu upevnění na rozvoj dynamických parametrů. K vyhodnocení naměřených dat bude studentkou zvolen vhodný matematický aparát. Předpokládá se využití matematických metod v časové a frekvenční oblasti. Součástí práce bude rovněž srovnání parametrů testovaných konstrukcí a doporučení pro praxi.

Doporučené přílohy:

- Rozbor současného stavu dané problematiky
- Návrh metodiky měření dynamických parametrů
- Analýza měřených dat v časové oblasti
- Analýza měřených dat ve frekvenční oblasti
- Srovnání testovaných konstrukcí
- Závěry a doporučení

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....
prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
Autor práce Bc. Daniela Vukušičová

Škola Vysoké učení technické v Brně
Fakulta Stavební
Ústav Ústav železničních konstrukcí a staveb
Studijní obor 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Studijní program N3607 Stavební inženýrství

Název práce Analýza dynamických účinků působících na železniční výhybky

Název práce v anglickém jazyce Analysis of dynamic effects acting on railway crossings

Typ práce Diplomová práce

Přidělovaný titul Ing.

Jazyk práce Čeština

Datový formát elektronické verze PDF

Abstrakt práce Práce je zaměřena na měření a analýzu dynamických účinků v železničních výhybkách. V rámci práce byly porovnány dvě výhybky stejného typu s odlišnou pružností v uzlu upevnění. Pozornost byla zaměřena na oblast srdcovky výhybky, kde dochází k největším dynamickým účinkům. Cílem práce je srovnání srdcovek výhybek z hlediska dynamického chování a stanovení vlivu zpružnění uzlu upevnění na šíření dynamické energie konstrukcí. Součástí práce je také volba vhodné metodiky měření a návrh matematického aparátu pro vyhodnocení dynamických dějů ve výhybkách.

Abstrakt práce v anglickém jazyce This thesis is focused on measurement and analysis of dynamic effects on railway turnouts. Two same-type turnouts with different fastening elasticity were chosen. My attention was focused mainly on the crossing part of the turnout, where the highest dynamic impacts occur. The point of the thesis is comparison of the crossing part of turnouts in term of dynamic behaviour and assessment of influence of soft rail pads on spread of dynamic energy through the construction. A part of the thesis is choice of methodology of the measurement and proposal of convenient mathematical apparatus for analysing of the dynamic effects on crossings.

Klíčová slova výhybka, srdcovka, měření dynamických účinků, pohyby pražců, vibrace

Klíčová slova v anglickém jazyce turnout, crossing part, measurement of dynamic effects, bearers displacement, vibrations

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017



Bc. Daniela Vukušičová
autor práce

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Daniela Vukušičová *Analýza dynamických účinků působících na železniční výhybky*. Brno, 2017. 80 s., 181 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2017



Bc. Daniela Vukušičová
autor práce

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na měření a analýzu dynamických účinků v železničních výhybkách. V rámci práce byly porovnány dvě výhybky stejného typu s odlišnou pružností v uzlu upevnění. Pozornost byla zaměřena na oblast srdcovky výhybky, kde dochází k největším dynamickým účinkům. Cílem práce je srovnání srdcovek výhybek z hlediska dynamického chování a stanovení vlivu zpružnění uzlu upevnění na šíření dynamické energie konstrukcí. Součástí práce je také volba vhodné metodiky měření a návrh matematického aparátu pro vyhodnocení dynamických dějů ve výhybkách.

KLÍČOVÁ SLOVA

výhybka, srdcovka, měření dynamických účinků, pohyby pražců, vibrace

ABSTRACT

This thesis is focused on measurement and analysis of dynamic effects on railway turnouts. Two same-type turnouts with different fastening elasticity were chosen. My attention was focused mainly on the crossing part of the turnout, where the highest dynamic impacts occur. The point of the thesis is comparison of the crossing part of turnouts in term of dynamic behaviour and assessment of influence of soft rail pads on spread of dynamic energy through the construction. A part of the thesis is choice of methodology of the measurement and proposal of convenient mathematical apparatus for analysing of the dynamic effects on crossings.

KEYWORDS

turnout, crossing part, measurement of dynamic effects, bearers displacement, vibrations

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat všem, kteří se svou činností jakkoliv podíleli na vzniku této diplomové práce.

Zvláštní vděk si zasluhuje můj vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D., který se mi věnoval nad míru svých povinností a předal mi velké množství svých znalostí a zkušeností. Svou vstřícností a časem obětovaným konzultacím mi dal možnost se podílet na řešení této zajímavé i náročné problematiky.

Dále chci poděkovat prof. Ing. Lubošovi Pazderovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc jak při měření, tak při vyhodnocování dat.

Na měřeních se podíleli také moji kolegové z Ústavu železničních konstrukcí a staveb, jmenovitě Ing. Jan Valehrach, Ing. Jaroslav Bílek a Ing. Petr Guziur, kterým bych chtěla poděkovat za výpomoc při přípravě a realizaci měření, při zajišťování bezpečnosti při pohybu v kolejišti a při zaznamenávání potřebných dat.

V neposlední řadě si moji vděčnost zasluhuje můj manžel Ing. Ivan Vukušič, Ph.D., který mi byl po celou dobu velkou oporou, pomáhal mi při všech měřeních a svými odbornými znalostmi a radami také přispěl ke vzniku tohoto díla.

Obsah

Obsah.....	1
1. Úvod.....	3
2. Cíle práce.....	5
3. Současný stav řešené problematiky.....	5
3.1. Namáhání srdcovky	6
3.1.1. Mechanismus přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky.....	6
3.1.2. Optimalizace geometrie přechodu	9
3.1.3. Materiál srdcovky výhybky	11
3.1.4. Tuhost uložení konstrukce výhybky.....	11
3.1.5. Ostatní vlivy ovlivňující zatížení srdcovky.....	16
4. Teoretický rozbor problematiky.....	20
5. Metodika měření	25
5.1. Měření pohybového chování konstrukce.....	25
5.2. Přenos vibrací konstrukcí výhybky.....	26
6. Matematický aparát	28
6.1. Časová oblast	29
6.1.1. Efektivní hodnota zrychlení vibrací	30
6.2. Frekvenční oblast.....	31
6.2.1. Fourierova transformace.....	31
6.2.2. Diskrétní Fourierova transformace – DFT	31
6.2.3. Fast Fourier Transform – FFT	31
6.2.4. Welchova metoda	32
6.3. Časově-frekvenční oblast.....	32
6.3.1. Krátkodobá (okénková) Fourierova transformace (STFT).....	32
7. Parametry měření	33

8. Popis lokality měření a měřených výhybek	34
9. Vyhodnocení provedených měření.....	35
9.1. Vyhodnocení pohybového chování konstrukce	36
9.1.1. Pohybové chování pražce v přechodové zóně.....	40
9.1.2. Pohybové chování pražců podél srdcovky výhybky	43
9.2. Vyhodnocení zrychlení vibrací na konstrukci výhybek.....	47
9.2.1. Vyhodnocení v časové oblasti	48
9.2.2. Vyhodnocení ve frekvenční oblasti	56
9.2.3. Vyhodnocení ve frekvenční oblasti – Welchova metoda	59
9.2.4. Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti.....	69
9.3. Celkové vyhodnocení srovnávaných konstrukcí	70
10. Závěr a doporučení	71
Seznam použité literatury a dalších informačních zdrojů	72
Seznam symbolů a zkratk	76
Seznam příloh.....	79

1. Úvod

Výhybky a výhybkové konstrukce jsou klíčovou a nenahraditelnou součástí železniční tratě. Zároveň z hlediska dynamických účinků patří k nejvíce zatíženým místům na železniční dopravní cestě. Jedná se nejen o místo s přerušením plynulosti jízdní dráhy, ale také o místo se změnou tuhosti. Ačkoliv délka koleje s výhybkami představuje jen malou část železniční sítě, údržba výhybek (včetně kolejových křižovatek a jiných speciálních kolejových konstrukcí) generuje poměrně velké náklady na údržbu, které v porovnání s běžnou kolejí jsou mnohonásobně vyšší. [1, 2, 3]. Je to dáno především složitým silovým působením, které vyvolává průjezd vlakové soupravy výhybkou a také nutností udržovat mnoho součástí, z nichž se výhybková konstrukce skládá. Studium působení dynamických účinků na konstrukci výhybky nám pomůže objasnit některé zákonitosti, které lze využít pro budoucí optimalizaci konstrukce, která by měla vést k prodloužení její životnosti.

Matematické modelování se v posledních letech opět zdokonalilo a při návrhu nových konstrukčních řešení má svoji nezastupitelnou roli. Avšak vývoj a ověřování jakýchkoliv nových konstrukčních řešení musí od matematického modelu a laboratorních zkoušek probíhat v poslední a nejdůležitější části také v podmínkách plného provozu. Reálné podmínky uložení konstrukce a její zatížení nelze matematickým modelem ani laboratorními testy zcela postihnout. Z hlediska uložení konstrukce se jedná především o nestejněmorné podepření pražců a dynamické chování pražcového podloží. Z hlediska silového působení na konstrukci se v reálném provozu objevují i vozy s velkým ojetím kol a s vadami na pojížděné ploše kol, které mohou mnohonásobně překročit uvažované silové působení. Konstrukce výhybky musí všechny tyto reálné podmínky úspěšně zvládnout. Proto je klíčové znát skutečné dynamické účinky působící na výhybku, které je možné zpětně promítnout do optimalizace jednotlivých částí konstrukce.

Tato práce se zabývá měřením dynamických účinků přímo in-situ za plného provozu a získaná data proto odpovídají reálnému dynamickému namáhání. Měření proběhla v železniční stanici Ústí nad Orlicí a jsou porovnány dvě konstrukce výhybky, které odlišuje pouze rozdílná tuhost v uzlu upevnění. Porovnávané výhybky č. 3 a 4 jsou součástí jednoduché kolejové spojky a jsou pojížděny v přímém směru plnou traťovou rychlostí. Celkem proběhlo 6 měření dynamických účinků, po třech na každé výhybce.

Získaná data lze využít nejen pro budoucí optimalizaci konstrukce, ale mohou být využita i při návrhu diagnostického zařízení pro měření dynamických účinků. Náklady na

životní cyklus výhybky lze snížit nejen optimalizací konstrukce, ale také lepším a efektivnějším plánováním údržbových prací. V práci se proto pokusím zaměřit i na tuto oblast.

2. Cíle práce

- Rešerše dostupné literatury – seznámit se s poznatky z dané problematiky a s novými příspěvky za poslední léta (ať už se jedná o modelování nebo o experimentální činnost v problematice dynamických účinků působících na železniční výhybky i na kolej obecně)
- Podílet se na organizaci a realizaci zkušebních měření – pomáhat s přípravou a kontrolou veškerého vybavení k měření, komunikovat s ostatními členy měřicího týmu a vybrat vhodný termín pro měření, aktivně se podílet na instalaci snímačů do koleje a na procesu získávání všech potřebných dat pro vyhodnocení
 - Zvolit vhodný matematický aparát k vyhodnocení naměřených dat v časové i frekvenční oblasti
 - Porovnat dynamické chování konstrukcí – porovnání bude provedeno na základě vyhodnocení pohybového chování konstrukcí a přenosu vibrací těmito konstrukcemi. Měření na obou výhybkách budou provedeny několikrát, s přiměřeným časovým odstupem, aby bylo možné porovnat tyto konstrukce i z hlediska narůstání dynamických účinků v čase.
 - Zformulovat závěry a doporučení pro praxi

3. Současný stav řešené problematiky

V posledních desetiletích se stále zvyšují nároky na únosnost železniční dopravní cesty, což vede k zvyšování tuhosti. Na našich tratích se používají téměř výhradně betonové pražce, které mají větší hmotnost a ohybovou tuhost a zároveň menší pružnost, než pražce dřevěné. Spolu se zvyšováním rychlostí to vede k velkému namáhání kolejového lože, které pod zatížením mění svůj tvar. Největší problémy se objevují v místech změny tuhosti kolejové jízdní dráhy, jako jsou přechodové oblasti mostů a také výhybky [4, 5, 6]. Ve výhybce se nejen mění tuhost kolejové jízdní dráhy, ale také je to místo, kde kolo přechází z opornice na jazyk a z křídlové kolejnice na srdcovkový klín (případně naopak). V závislosti na kvalitě geometrie přechodu se v těchto místech vyskytuje další dynamické namáhání konstrukce. Proto je práce orientována právě na oblast srdcovky výhybky.

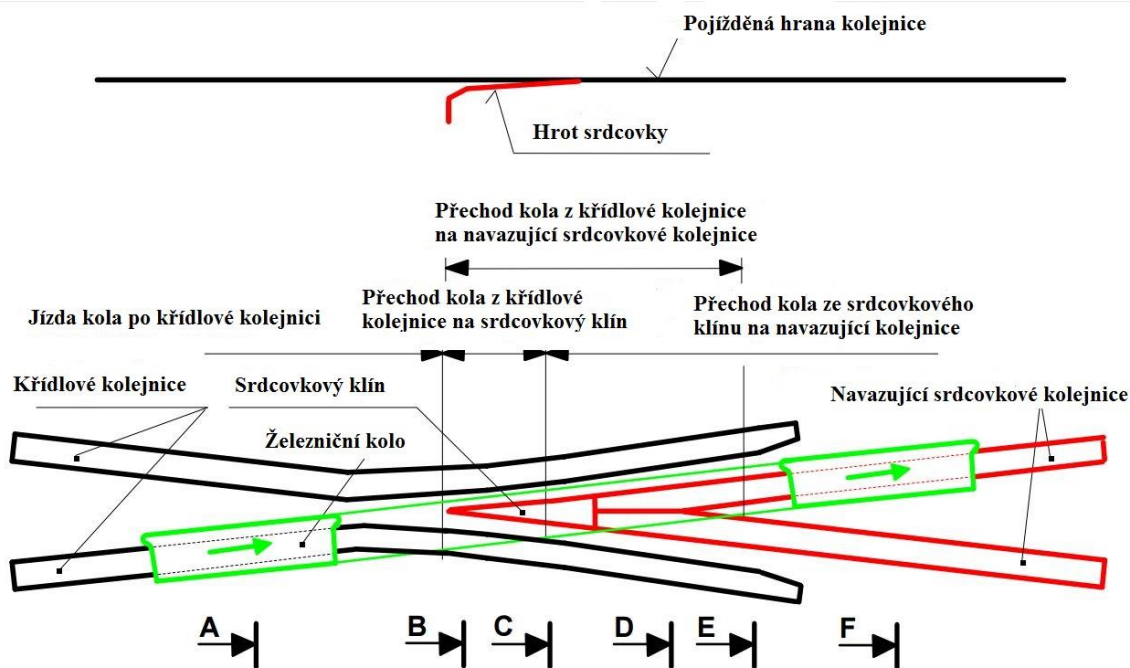
3.1. Namáhání srdcovky

Srdcovková část výhybky je tvořena křídlovými kolejnicemi, srdcovkovým klínem a srdcovkovými kolejnicemi navazujícími na srdcovkový klín. Nejdůležitějším místem této části z hlediska dynamických účinků je oblast přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, kde dochází, v závislosti na kvalitě geometrie přechodu, k dynamickému rázu. Tento ráz se přes pražce přenesení do kolejového lože, které je tím extrémně namáháno, což vede k obroušování zrn kameniva šterkového lože na styku s pražcem. V důsledku toho dochází k degradaci tvaru kolejového lože pod pražcem a to způsobí nedostatečné podepření výhybky. Pokud není výhybka dostatečně podepřena, zhroutlí se geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a celý proces degradace se tím velmi urychlí. Srdcovka výhybky je více a více namáhána, což může končit až lomem srdcovky [5, 7].

Z výše uvedeného je zřejmé, že nejdůležitější je udržení geometrie přechodu v co nejlepším stavu, jedná se o klíčovou záležitost pro životnost srdcovky výhybky. Pod pojmem geometrie přechodu se však skrývá velké množství parametrů, které ji ovlivňují.

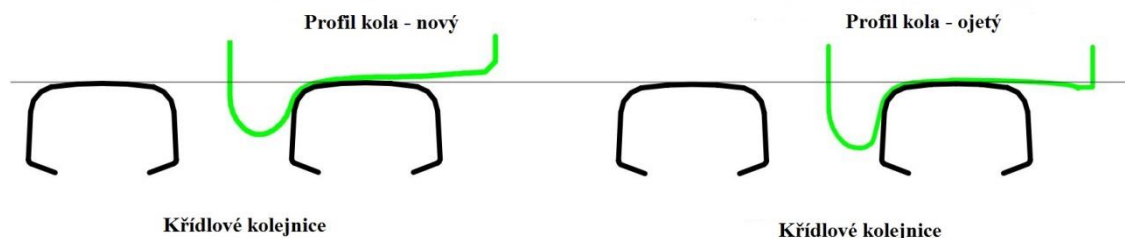
3.1.1. *Mechanismus přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky*

Mechanismus přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky je velmi složitý prostorový problém. Touto problematikou se u nás dlouhodobě zabývá tým okolo doc. Zelenky z Univerzity Pardubice, například zde [8]. V zahraničí lze také nalézt několik týmů, které se touto problematikou zabývají, z poslední doby například zde [9, 10, 11, 27]. Kolo prochází při přejezdu srdcovkou v podstatě třemi fázemi. Nejprve jede po křídlové kolejnici, poté jede v přechodové zóně po křídlové kolejnici a po srdcovkovém klíně a v poslední fázi jede už po srdcovkovém klíně a po navazující kolejnici. Velmi dobře je to vidět na *Obr. 3.1.1.1*. Problém nastává v případech, kdy jsou kola příliš ojetá a mají už válcový tvar, nebo, nejhůře, jízdní obrys kola již má konkávní tvar. Poté dochází k tomu, že kolo se během průjezdu srdcovkou opírá v jiných bodech, než je předpokládáno a v určitém místě v podstatě padá na srdcovkový klín nebo naráží do křídlové kolejnice. Podrobněji je problematika zřejmá z řezů na obrázcích na *Obr. 3.1.1.2* až *Obr. 3.1.1.7*. Vlevo je vždy řez s novým kolem a vpravo s kolem ojetým s konkávním tvarem.



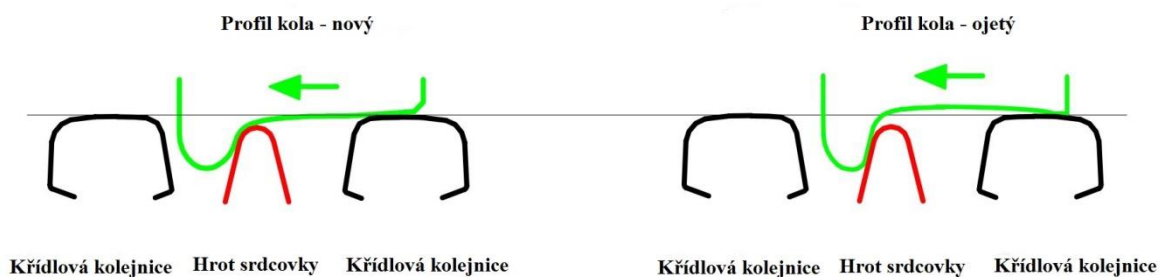
Obr. 3.1.1.1 Schematické znázornění přejezdu dvojkolí přes srdcovku – pohled shora [12]

Na Obr. 3.1.1.2 je vidět situace, kdy je kolo zcela nesené křídlovou kolejnicí, tedy situace jako v běžné koleji. Zde se rozdíl mezi novým a ojetým kolem zatím neprojevuje, tedy s ohledem na zvýšené dynamické účinky, ale kontaktní geometrie u ojetého kola není ani zde ideální.



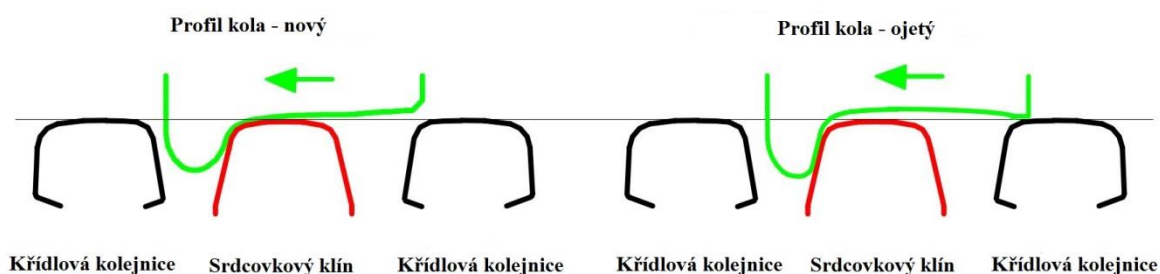
Obr. 3.1.1.2 Řez A – vlevo nové kolo, vpravo ojeté [12]

Na Obr. 3.1.1.3 je již situace, kdy kolo přechází z křídlové kolejnice na srdcovkový klín. Vlevo je vidět, že nové kolo je již nesené křídlovou kolejnicí a částečně i srdcovkovým klínem, k tomu dochází v šířce okolo srdcovkového klínu 20 mm [12]. U nového kola je tedy přechod plynulý a impaktní zatížení je minimální. Zatímco vpravo u kola ojetého je vidět, že je nesené stále křídlovou kolejnicí a srdcovkový klín je pod kolem o několik milimetrů. V závislosti na ojetí kola může už kousek za tímto místem ojeté kolo doslova spadnout na srdcovkový klín, což generuje velké impaktní zatížení.



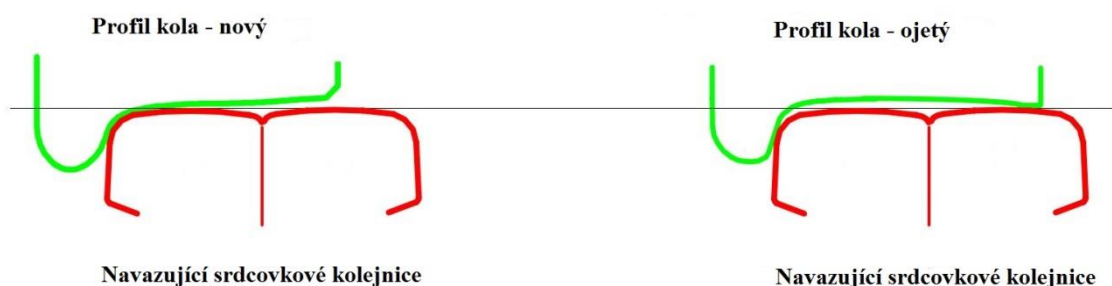
Obr. 3.1.1.3 Řez B – vlevo nové kolo, vpravo ojeté [12]

Na Obr. 3.1.1.4 je vlevo nové kolo již zcela neseno srdcovkovým klínem. Vpravo je ojeté kolo stále neseno křídlovou kolejnicí a podle velikosti ojetí může i v těchto místech zatížit impaktním zatížením srdcovkový klín.



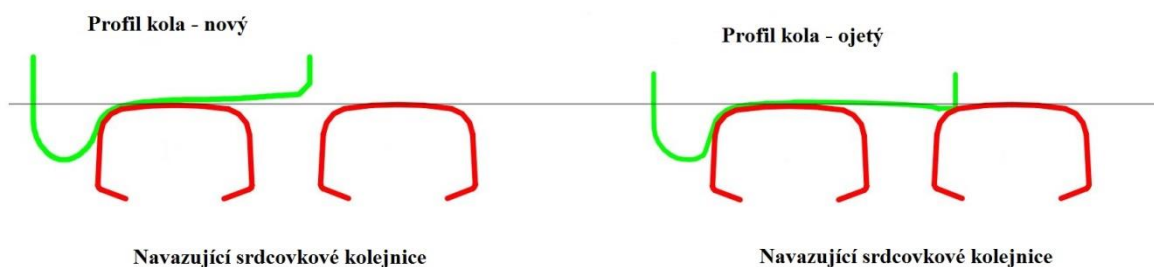
Obr. 3.1.1.4 Řez C – vlevo nové kolo, vpravo ojeté [12]

Na Obr. 3.1.1.5 je vlevo nové kolo zcela neseno odlítkem srdcovkového klínu nebo, jako na tomto obrázku, navazující srdcovkovou kolejnicí dle konstrukce výhybky. Vpravo kolo s konkávním profilem je stále neseno na pravé straně a hrozí tam impaktním zatížením odlitku srdcovky, nebo navazující kolejnici.



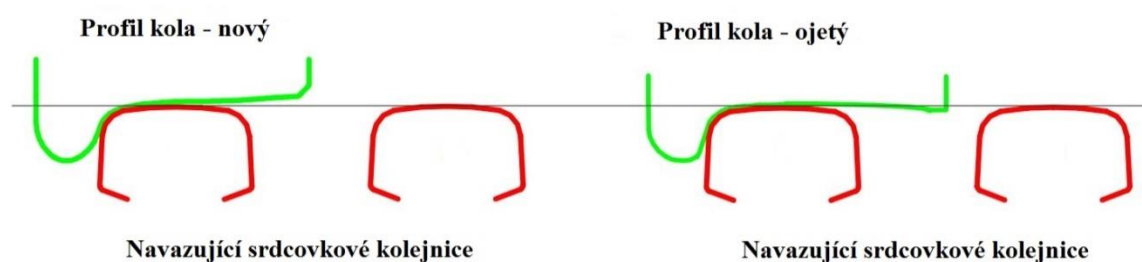
Obr. 3.1.1.5 Řez D – vlevo nové kolo, vpravo ojeté [12]

Na Obr. 3.1.1.6 vlevo se u nového kola nic neděje a je již zcela neseno navazující levou srdcovkovou kolejnicí. U kola ojetého na pravé straně se vlivem velkého konkávního ojetí kolo propadlo na levou navazující kolejnici a způsobilo velké impaktní zatížení.



Obr. 3.1.1.6 Řez E – vlevo nové kolo, vpravo ojeté [12]

Na posledním řezu Obr. 3.1.1.7 již není z hlediska dynamického zatížení mezi oběma koly rozdíl, obě jsou již zcela nesený levou navazující srdcovkovou kolejnici.



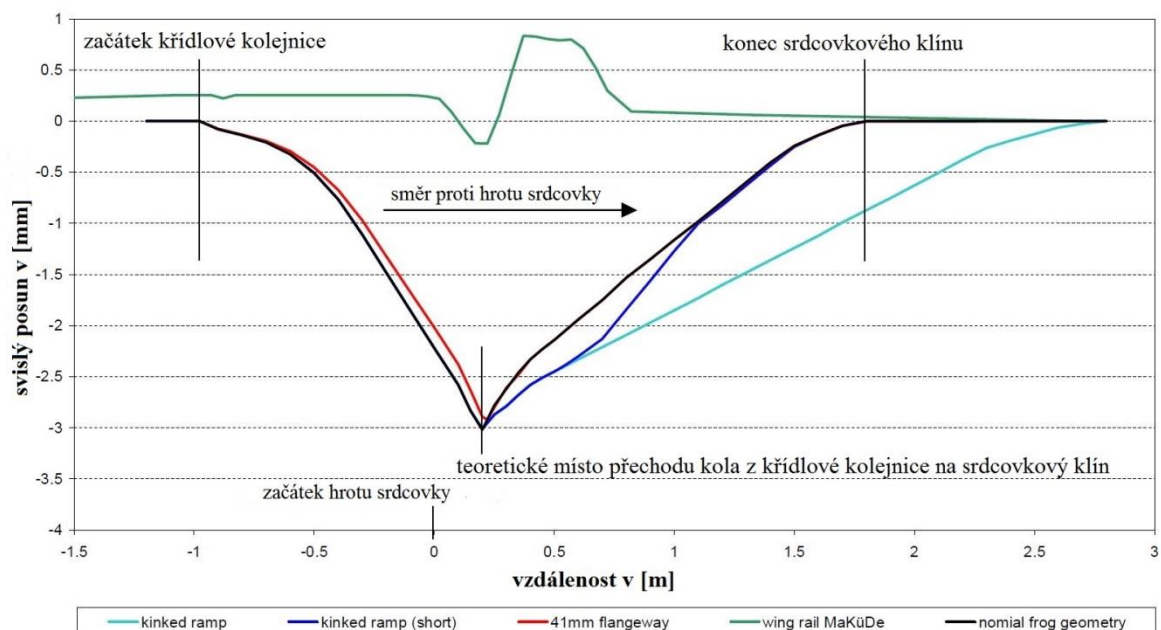
Obr. 3.1.1.7 Řez F – vlevo nové kolo, vpravo ojeté [12]

Z výše uvedeného je zřejmé, že ojeté kolo má jinou trajektorii pohybu a zatěžuje srdcovku větším impaktním zatížením, než je tomu u plynulého přechodu nového kola. Samozřejmě je možné geometrii přechodu částečně přizpůsobit i ojetým kolům, ale kolům s válcovým nebo konkávním průřezem nebude možné geometrii přizpůsobit nejspíše nikdy.

3.1.2. Optimalizace geometrie přechodu

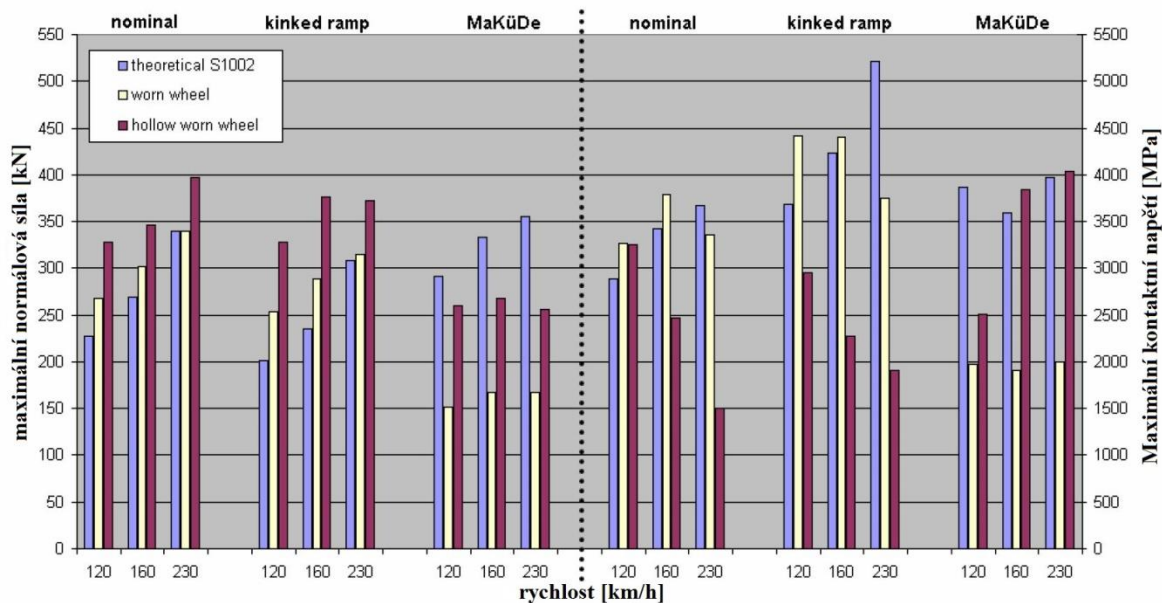
Jak bylo výše uvedeno, tvar a ojetí kola má velký vliv na impaktní zatížení srdcovky, proto je v rámci optimalizace geometrie přechodu snaha o co nejlepší přechod pro většinu kol v provozu. V poslední době se touto problematikou zabýval velký evropský projekt Innotrack [13]. V rámci tohoto projektu byly modelovány tři typy úprav geometrie přechodu. První typ úpravy nazvaný anglicky „kinked ramp“ spočívá ve zmenšení úhlu, pod kterým kolo najíždí na srdcovkový klín (jsou řešeny dvě varianty: zkrácená a delší). Druhý typ úpravy spočíval v zúžení žlábků u srdcovky na 41 mm, kdy byla snaha dovolit dvojkolím co nejmenší příčný pohyb. Třetí úprava řeší nadvýšení křídlové kolejnice dle tvaru MäKuDe (vyvinutý firmou DB Systemtechnik), tato úprava minimalizuje impaktní

zatížení srdcovkového klínu. Všechny úpravy jsou schematicky znázorněny v podélném řezu geometrie přechodu na *Obr. 3.1.2.1*.



Obr. 3.1.2.1 Podélný řez geometrie přechodu – schematické zobrazení jednotlivých úprav [13]

Pro tři výše uvedené úpravy byly poté provedeny simulace přejezdu lokomotivou BR101 s kolovou silou 107 kN, tuhost uložení koleje byla uvažována 500 kN/mm, směr pojezdu proti hrotu. Simulace byla provedena pro tři typy kol, nový tvar S1002, ojeté (worn wheel) a ojeté s konkávním tvarem jízdní plochy (hollow worn wheel). Výsledky simulací je možné vidět na obrázku *Obr. 3.1.2.2*. V levé části jsou výsledky maximální normálové síly a vpravo jsou výsledky maximálních kontaktních napětí. Jak je patrné z obou částí grafu, tak především pro ojetá kola dosahuje výrazně nižších hodnot úprava geometrie přechodu MaKuDe. Obdobná úprava je používána i na srdcovkách v síti SŽDC.



Obr. 3.1.2.2 Maximální normálová síla a kontaktní napětí při simulaci přejezdu lokomotivy přes srdcovku výhybky [13]

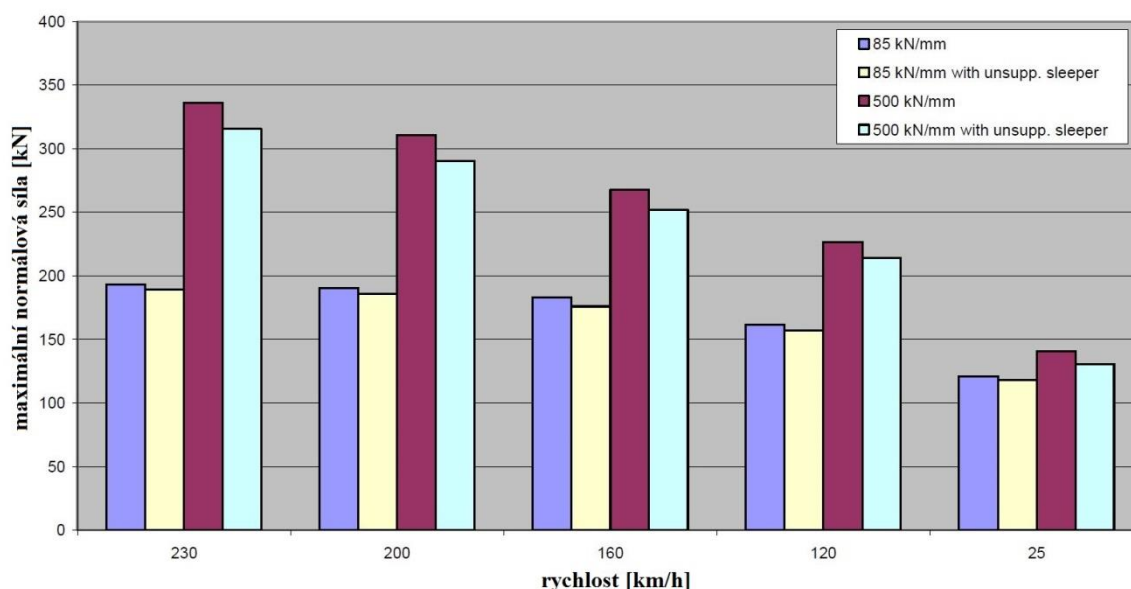
3.1.3. Materiál srdcovky výhybky

Materiál srdcovky výhybky samozřejmě ovlivňuje samotnou geometrii přechodu, a tím i velikosti dynamických sil. Materiál srdcovky výhybky musí odolávat velkým kontaktním napětím a impaktnímu zatížení a nesmí mít přitom velké opotřebení, aby se geometrie přechodu udržela pokud možno co nejdéle v ideálním stavu. Tyto vlastnosti splňují i u nás používané manganové a bainitické oceli. U nás se v současnosti používá bainitická ocel Lo17MnCrNiMo [14]. Volba vhodného materiálu pro srdcovky výhybky bude vždy jistým kompromisem mezi tvrdostí, pevností v tahu, únavovou pevností a celkovými náklady životního cyklu. Při volbě materiálu se musí vzít v úvahu také intenzita dopravy přes výhybku [15, 16]. Poměrně obsáhle se problematice materiálů pro železniční výhybky věnuje tato práce [28].

3.1.4. Tuhost uložení konstrukce výhybky

Tuhost uložení výhybky je klíčovou záležitostí z hlediska velikosti dynamického zatížení srdcovky. Existuje několik odborných prací, které se této problematice věnují [12, 13, 20, 21, 22]. Tuhost uložení lze ovlivnit v uzlu upevnění, především volbou vhodné podložky pod patu kolejnice, další možností je použití podpražcových podložek. V rámci projektu Innotrack [13] byl simulován vliv tuhosti koleje na dynamické účinky v srdcovce výhybky. Simulována byla srdcovka výhybky 1:12-500, tedy výhybka, která je i u nás často používanou konstrukcí zvláště pro první a poslední výhybky ve stanici, tedy ty, které

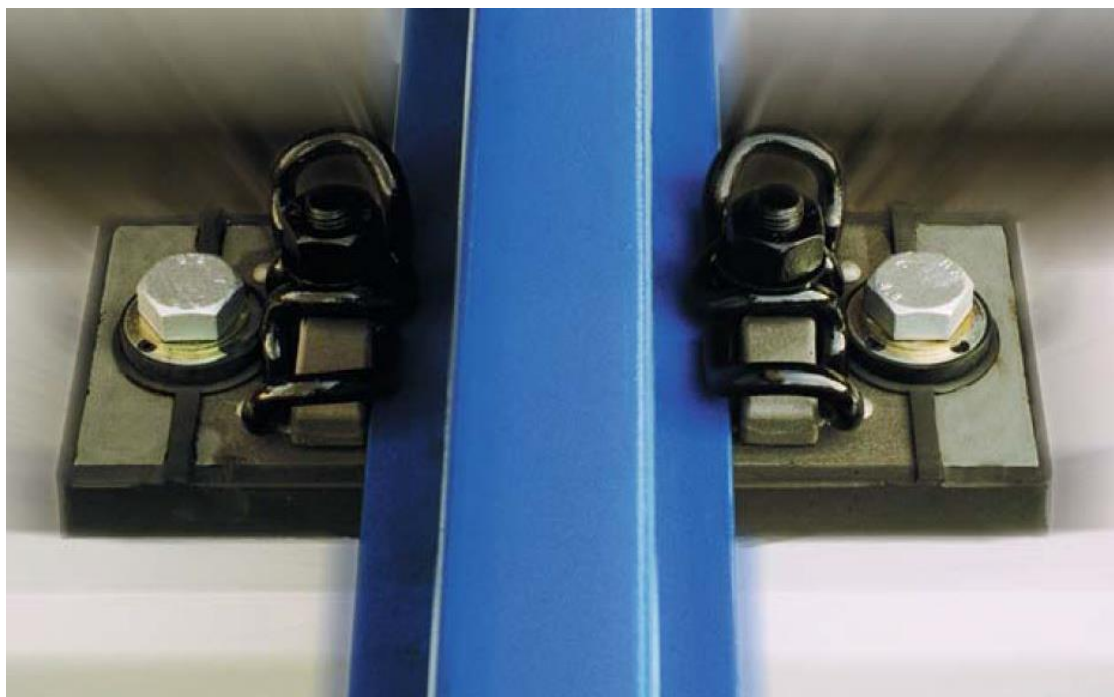
jsou pojížděny v přímém směru maximální traťovou rychlostí. Z hlediska silového působení na srdcovku byla simulována lokomotiva BR101 s kolovou silou 107 kN, profil kola byl použit referenční S1002 a směr pojíždění proti hrotu. Pro simulaci byly zvoleny dvě tuhosti koleje, klasická 500kN/mm a poté tuhost snižená na 85 kN/mm použitím pružnější podložky pod patu kolejnice. V obou variantách byl simulován ještě špatně podepřený pražec v přechodové oblasti. Výsledky simulace jsou na *Obr. 3.1.4.1*. Z výsledků simulace je vidět, že kontaktní normálová síla se zvětšuje s rychlostí vlaků a také, že výrazně pomaleji se zvyšuje, když je tuhost koleje snížena použitím pružnějších podložek pod patu kolejnice. V simulaci také vychází lépe, když je v přechodové oblasti jeden špatně podepřený pražec. Tuto záležitost ale vnímám jako čistě teoretickou, neboť v rámci měření provedených Ústavem železničních konstrukcí a staveb Vysokého Učení Technického v Brně v reálném provozu bylo prokázáno, že špatně podepřený pražec v dlouhodobějším horizontu vede k nárůstu dynamických účinků [5, 7, 17].



Obr. 3.1.4.1 Vliv rychlosti vlaku a tuhosti koleje na maximální normálovou sílu [13]

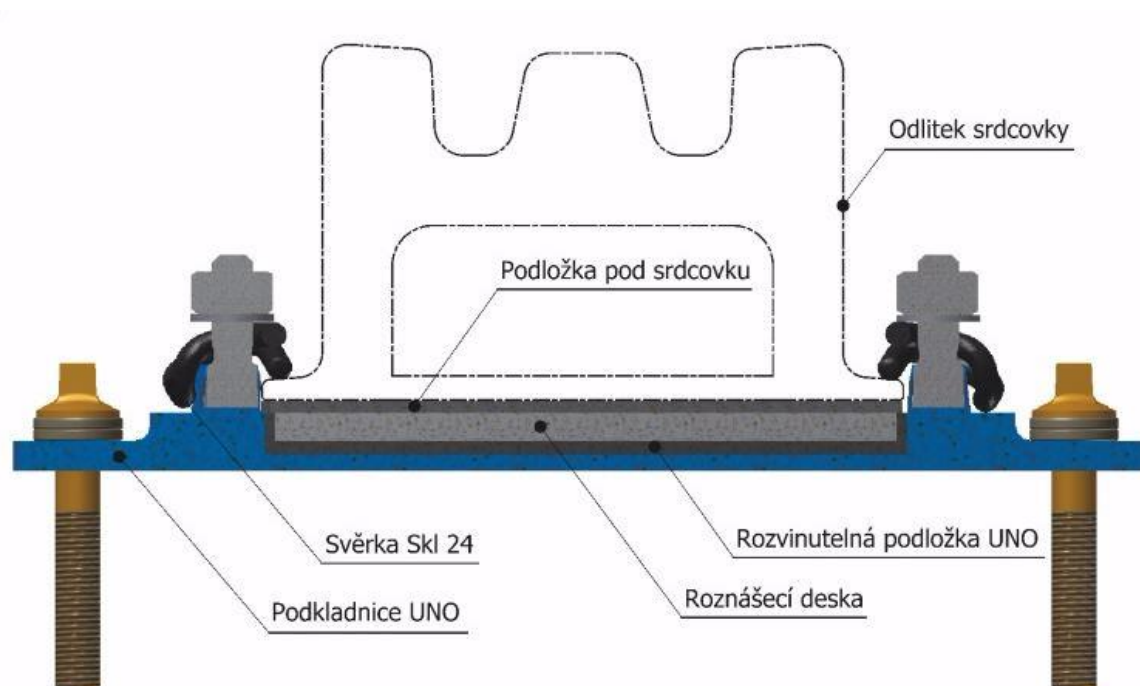
V rámci zkušebních měření [5] bylo testováno také upevnění ERL 30 od firmy Voestalpine BWG GmbH & Co KG. U tohoto typu upevnění je podkladnice tvořena vulkanizovaným elastomerem, který je kryt plechem s žebry, ke kterému jsou přichyceny svěrky držící patu kolejnice *Obr. 3.1.4.2*. Zkušební měření a porovnání konstrukce výhybky s upevnění KS a upevnění ERL proběhla v železniční stanici Poříčany [5]. Měření prokázala přínos uzlu upevnění s vulkanizovanými podložkami na snížení dynamického rázu působícího na srdcovku výhybky. Uzel upevnění s vulkanizovanými podložkami

nejen lépe tlumil dynamické namáhání, ale také snížil namáhání práčů a rozložil namáhání na více práčů [5].



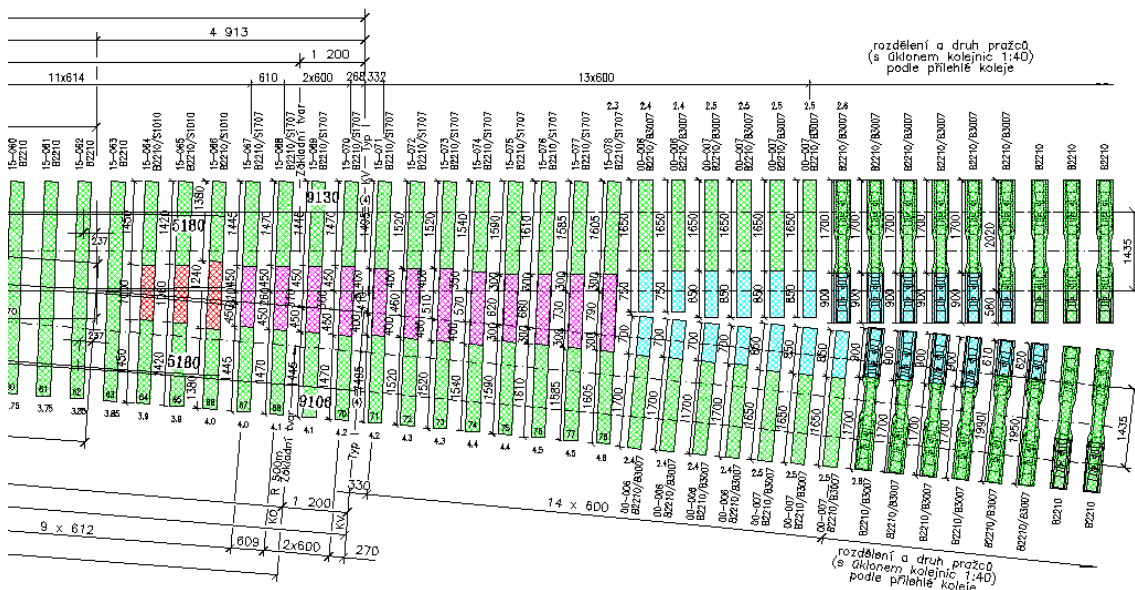
Obr. 3.1.4.2 Systém upevnění ERL 30 [18]

Další zkušební úsek se zpružněním v uzlu upevnění je v železniční stanici Ústí nad Orlicí, kde je použit nově vyvinutý uzel upevnění TA3718. Jde o modifikaci klasického uzlu upevnění v srdcovce výhybky KS, ve kterém spodní část odlitku srdcovky leží na žebrových podkladnicích s pružnou podložkou. Bylo vyvinuto řešení, ve kterém byla vytvořena podkladnice s žebry a vyfrézovanou kapsou, do které je vložena rozvinutelná pružná podložka tloušťky 8 mm s roznášecí deskou (viz *Obr. 3.1.4.3*). Až na této roznášecí desce je uložena obvyklá pružná podložka pod srdcovku a na ní leží odlitek srdcovky upevněný standardními pružnými svěrkami Sk124. Zpružnění je realizováno v srdcovkové části pouze pod odlitkem srdcovky, jedná se o 9 uzlů upevnění [46]. Provozního ověření tohoto uzlu upevnění jsem se aktivně účastnila a podílela se na organizaci měření i vyhodnocení. Výsledky jsou součástí této diplomové práce.



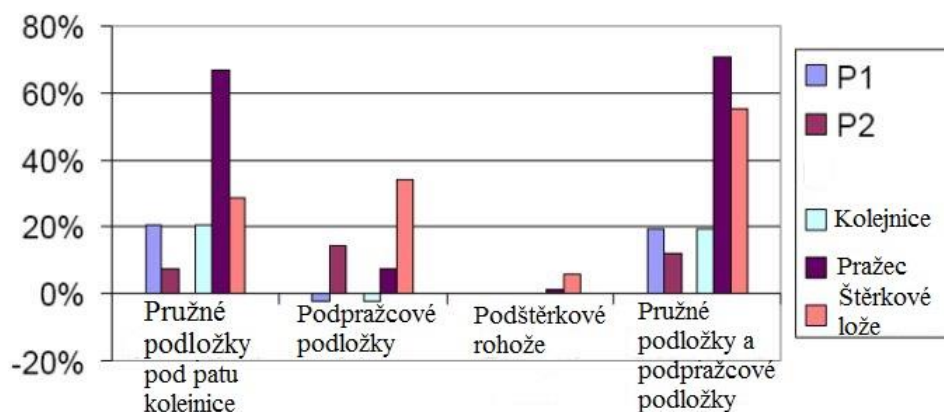
Obr. 3.1.4.3 Nový uzel upevnění pro výhybky v Ústí nad Orlicí [46]

Další možností zpružnění kolejové jízdní dráhy je použití podpražcových podložek. I v síti SŽDC je již několik zkušebních míst, kde se podpražcové podložky ve výhybkách zkoušejí. Zkušební místa jsou například v železniční stanici Planá nad Lužnicí a v železniční stanici Ústí nad Orlicí. Primární funkcí podpražcových podložek je ochrana šterkového lože, které je v celém systému nejslabším prvkem [23]. Jedná se o další pružný prvek v konstrukci, který snižuje dynamické účinky, i když jen v omezené míře [22]. Díky podpražcovým podložkám se zvětší kontaktní plocha mezi šterkem a pražcem z 5 – 8 % bez podpražcových podložek na 30 – 35 % s podpražcovými podložkami [24]. Návrh tuhostí podpražcových podložek a výsledky z provozního ověřování podpražcových podložek ve výhybkách jsou shrnuty v práci [25]. V srdcovkové části výhybky jsou navrženy různé tuhosti podpražcových podložek. Cílem byla homogenizace zatlačení pražců ve výhybce [25]. Rozložení je zřejmé z *Obr. 3.1.4.4*, podložky s nejmenší tuhostí jsou umístěny přímo pod přechodovou oblastí (na *Obr. 3.4.1.4* vyznačeny červenou barvou, statický modul ložnosti $0,100 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$), druhou nejnižší tuhost nají podložky uprostřed dlouhých výhybkových pražců za hrotem srdcovky (na *Obr. 3.4.1.4* vyznačeny fialovou barvou, statický modul ložnosti $0,170 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$), největší tuhost mají podložky na koncích krátkých výhybkových pražců a navazujících pražců pod kolejnicemi navazujícími na srdcovkový klín (na *Obr. 3.4.1.4* vyznačeny tyrkysovou barvou, statický modul ložnosti $0,300 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$), zbytek vyznačené části výhybky má podpražcové podložky střední tuhosti (na *Obr. 3.4.1.4* vyznačeny zelenou barvou, statický modul ložnosti $0,250 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$).



Obr. 3.1.4.4 Uspořádání podpražcových podložek po délce výhybky [25]

Nejlépe je možné dynamické síly utlumit kombinací pružných podložek pod patu kolejnice a podpražcových podložek (zkratka USP z anglického Under Sleeper Pads). Na Obr. 3.1.4.5 je vyhodnocení výzkumu, jak se zredukuje dynamické síly $P1$ a $P2$ (vysvětleno v kapitole teoretický rozbor problematiky) při různých úpravách tuhosti kolejové jízdní dráhy, a také jak to ovlivní zatížení kolejnic, pražce a šterkového lože [22].



Obr. 3.1.4.5 Redukce dynamických sil použitím pružných prvků v konstrukci koleje [22]

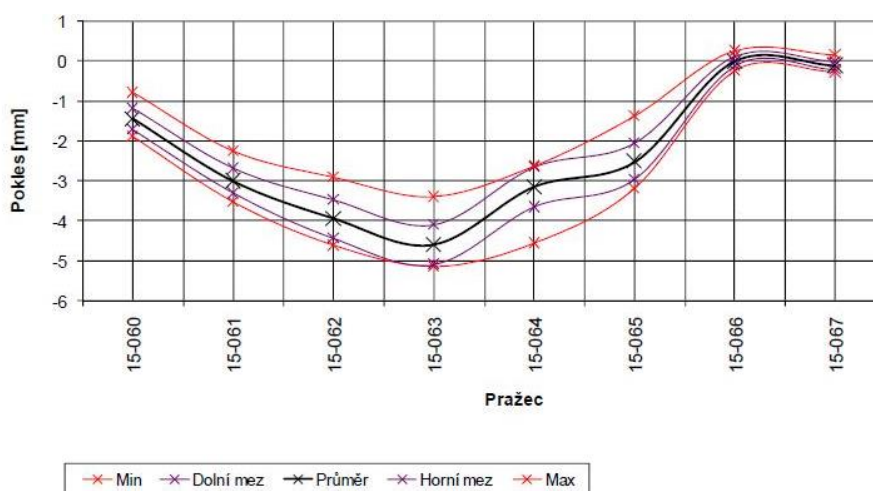
Z Obr. 3.1.4.5 je vidět, že nejlepšího výsledku bylo dosaženo kombinací pružných podložek pod patu kolejnice a podpražcových podložek. Nejmenší vliv na dynamické síly a zatížení železničního svršku mají podšterkové rohože, nicméně mají svůj smysl pro ochranu železničního spodku, a tím mohou mít i svůj vliv na redukcii nehomogenních zatlačení pražců, a tím i na snížení dynamického namáhání. V rámci evropského projektu TURNOUTS [26] bylo modelováno a kalibrováno měřením několik různých úprav na

výhybkách a byl sledován jejich přínos na snížení dynamických účinků. Nejúčinnější se ukázali úpravy geometrie přechodu výhybky v kombinaci s pružnými prvky v konstrukci koleje.

V disertační práci [19] je myšlenka, že tuhost podložek pod patu kolejnice by se také mohla měnit s ohledem na místo, kde je podložka použita. V podstatě by mohlo být i u podložek pro patu kolejnice postupováno podobně, jako tomu bylo v disertační práci [25] týkající se podpražcových podložek viz výše. Pokud bude provozní ověřování nového pružnějšího uzlu upevnění úspěšné, což napoví i tato diplomová práce, mohly by se v rámci údržby i vyměnit u některých vybraných výhybek podložky pod patou kolejnice za pružnější. Celému procesu samozřejmě musí předcházet ověření modelem a laboratorní zkoušky. Tím by mohlo být celkem jednoduše a s relativně malými náklady dosaženo snížení dynamických účinků na výhybkách, a tím by byla i prodloužena jejich životnost.

3.1.5. Ostatní vlivy ovlivňující zatížení srdcovky

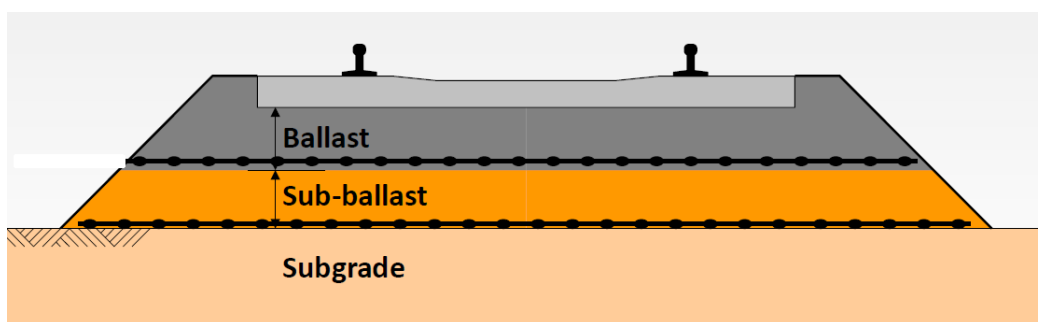
Štěrkové lože je velmi důležitou součástí kolejové jízdní dráhy, nese kolejový rošt, přenáší zatížení na pláň tělesa železničního spodku, zajišťuje odpor proti příčnému a podélnému posunutí koleje a také umožňuje směrovou a výškovou úpravu koleje. Ve výhybce je kolejové lože extrémně namáháno především díky impaktnímu zatížení na srdcovkách výhybek. Proto velmi často dochází k drcení hran kolejového lože na styku s pražcem a k postupnému vytváření volných prostor především přímo pod hrotem srdcovky, kde je zatížení největší. Na několika experimentálních měřeních, kterých jsem se i účastnila, se potvrdila teorie, že se postupně v okolí srdcovky výhybky vytvoří poklesová kotlina s maximem pod nejvíce zatíženým pražcem v přechodové zóně [5], viz *Obr. 3.1.5.1.*



Obr. 3.1.5.1 Průběh zatlačení pražců podél srdcovky výhybky [31]

Na *Obr. 3.1.5.1* je “ohybová křivka” podél srdcovky výhybky, maximální zatlačení je na pražci v přechodové zóně [5]. Kvalita podepření pražců hraje klíčovou roli zvláště ve výhybkách, proto by měla být snaha štěrkové lože ochránit před extrémním dynamickým namáháním, řešením je použití pružných elementů v konstrukci, jako jsou výše popsané podložky pod patu kolejnice a podpražcové podložky. Další možností je vyztužení štěrkového lože, které má také dílčí pozitivní výsledky.

Vytužení kolejového lože je možné provést v jedné vrstvě, nebo ve více vrstvách, jak je naznačeno na *Obr. 3.1.5.2*. Velmi dobré výsledky dosahuje vyztužení pomocí geomříží (*Obr. 3.1.5.2*), které se teď zkouší v několika zemích, viz. například *Obr. 3.1.5.3* z pokládky na železničním koridoru u Bratislavy.



Obr. 3.1.5.2 Schéma vyztužení kolejového lože ve dvou vrstvách [29]

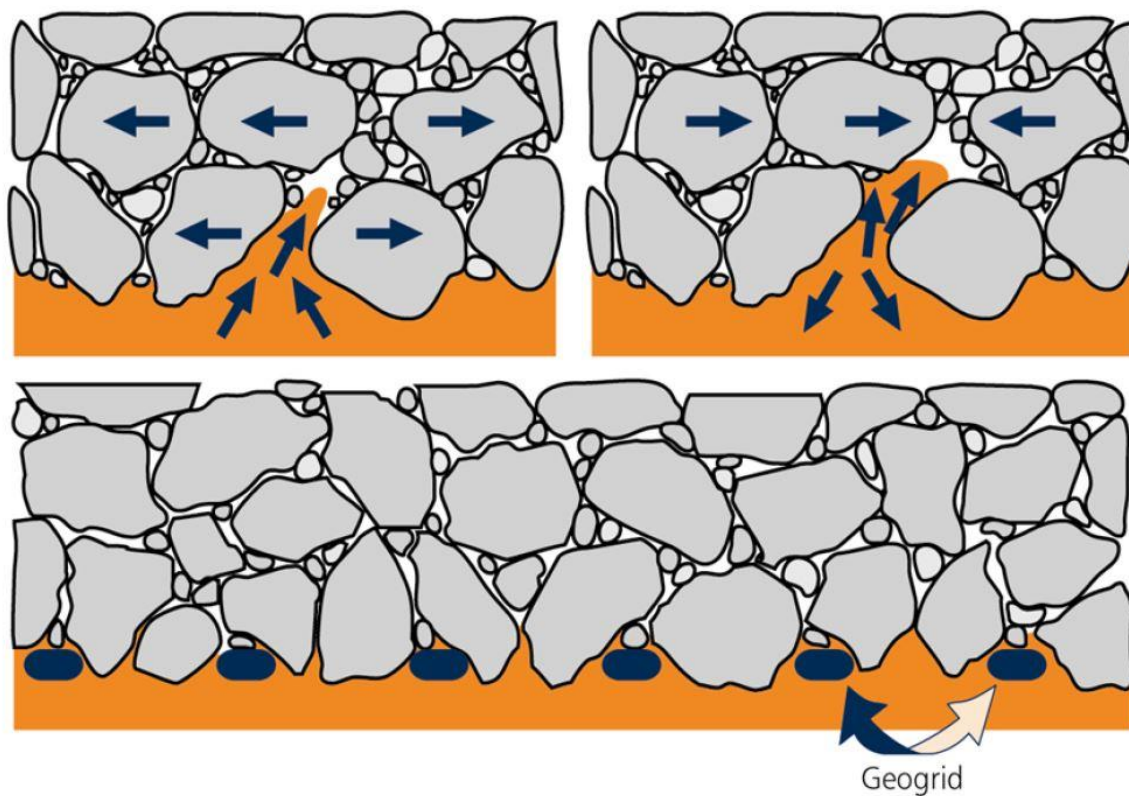


Obr. 3.1.5.3 Pohled na geomříž firmy Tensar [29]



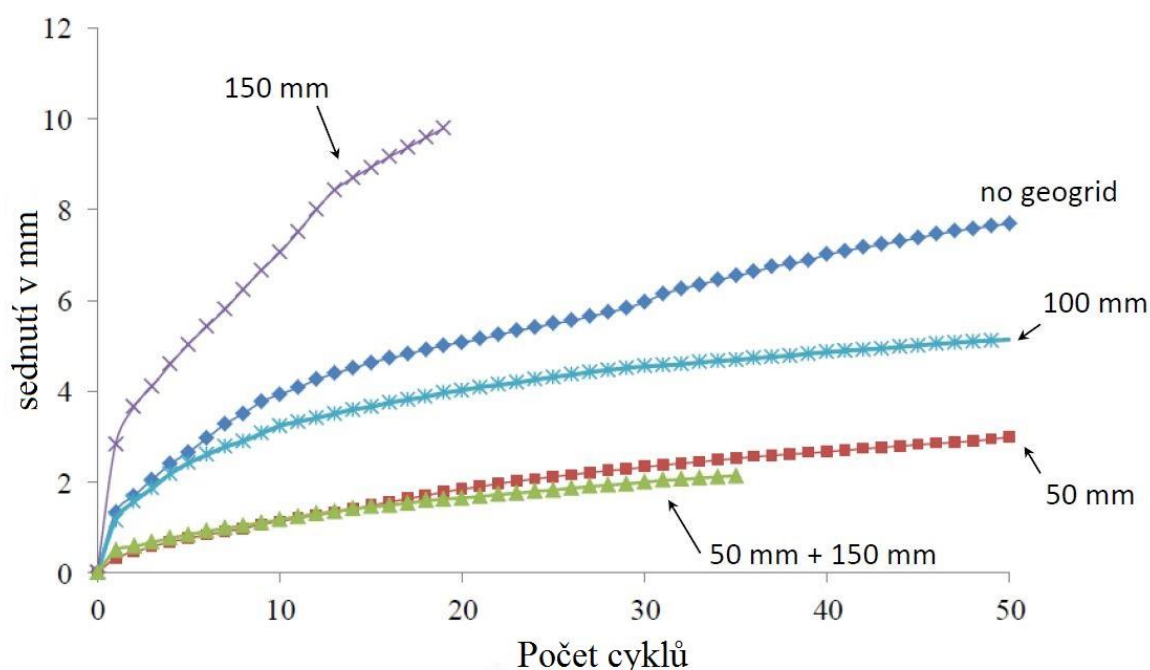
Obr. 3.1.5.4 Pokládka geomříže na železničním koridoru u Bratislavy [29]

Výhoda geomříže spočívá především v tom, že zrna šterku se do ní zaklíní, a tím šterková vrstva lépe drží tvar a je také méně náchylná na pronikání jemnozrnných částic, jak je schematicky naznačeno na Obr. 3.1.5.5.



Obr. 3.1.5.5 Schematicky naznačená funkce geomříže [29]

Na *Obr. 3.1.5.5* je schematicky znázorněno, jak se zrna šterku od sebe vzdalují a zase přibližují, a tím „pumpují“ jemnozrné částice dovnitř šterkové vrstvy, což znázorňují horní obrázky. U šterkové vrstvy s geomříží je tento pohyb omezený, a tím je i obtížnější transport jemnozrných částic do šterkové vrstvy. Jemnozrné částice snižují soudržnost zrn, a tím je únosnost šterkové vrstvy. V rámci výzkumu [30] byly provedeny laboratorní testy geomříží. Geomříž byla kladena do různé výšky od spodní hrany testovací vany. Hloubka a šířka testovací vany byla 300 mm a délka 1400 mm. Do vany bylo navrstveno šterkové lože do klasického tvaru lichoběžníku a zatěžováno deskou simulující pražec. Tloušťka šterkového lože byla na začátku testu 300 mm. Na *Obr. 3.1.5.6* jsou výsledky laboratorních testů.



Obr. 3.1.5.6 Výsledky laboratorních zkoušek geomříží [30]

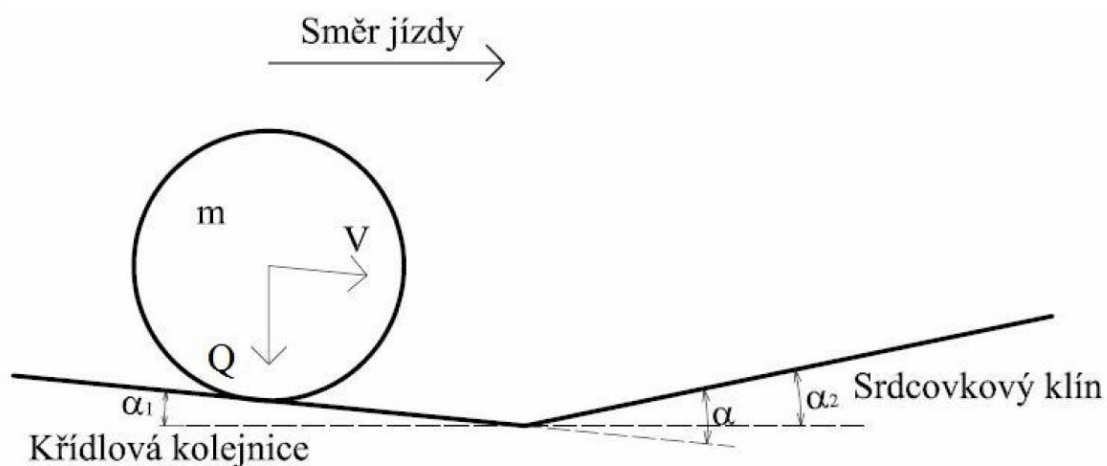
Z grafu na *Obr. 3.1.5.6* je vidět, že nejlepší výsledků dosáhla geomříž ve dvou vrstvách, protože má nejmenší sednutí šterkové vrstvy. Nicméně téměř totožného výsledku dosáhla i geomříž 50 mm od spodní vrstvy, což je 250 mm pod ložnou plochou pražce, tedy ještě mimo dosah podbíjecích pěchů, a je tedy reálné zabudování do koleje bez omezení podbíjení. Na základě analýz by bylo vhodné uvažovat o zkušebním úseku pro geomříž i ve výhybkách.

Zatížení srdcovky výhybky samozřejmě ovlivňuje i vhodná údržba, tím myslím broušení, navařování, podbíjení apod. Je to vhodná a kvalitní údržba, která dokáže prodloužit životnost srdcovek. K plánování dlouhodobé údržby by mohlo být využito i měření dynamických účinků ve výhybkách [5].

Správný návrh a provedení železničního spodku má zásadní vliv na budoucí dynamické účinky na výhybkách [31]. Všechny výše popsané opatření se minou účinkem, pokud nebude mít konstrukce železničního spodku dostatečnou deformační odolnost. Zejména projektová příprava by měla na tuto skutečnost pamatovat a geologické průzkumy v oblasti zhlaví železničních stanic by měli být provedeny podrobně a s velkou pečlivostí. Stavební dozor by pak měl dbát dodržování všech pravidel při zřizování a kontrole únosnosti železničního spodku. Chyby na železničním svršku lze odstranit, chyby na železničním spodku se odstraňují velmi těžce a s velkými náklady [5].

4. Teoretický rozbor problematiky

Jak již bylo popsáno výše, přejezd kola klasickou pevnou srdcovou je velmi složitý prostorový problém. Celkově se tato složitá prostorová úloha často zjednodušuje. V ideálním případě je geometrie přechodu navržena tak, že kolo plynule bez poklesu přejíždí z křídlové kolejnice na srdcovkový klín. Toto je však pouze teoretická možnost, protože jak srdcovky výhybky, tak kola podléhají opotřebení. Zjednodušení spočívá například v tom, že kolo jede po křídlové kolejnici, která se odklání od osy koleje, aby se vytvořil prostor pro srdcovkový klín, vlivem geometrie kola a křídlové kolejnice kolo často mírně klesá pod úhlem α_1 . Po nárazu na srdcovkový klín kolo opět stoupá pod úhlem srdcovkového klínu α_2 , dokud na konci přechodové zóny opět nezaujme výchozí polohu. Zjednodušeně je to naznačeno na Obr. 4.1.

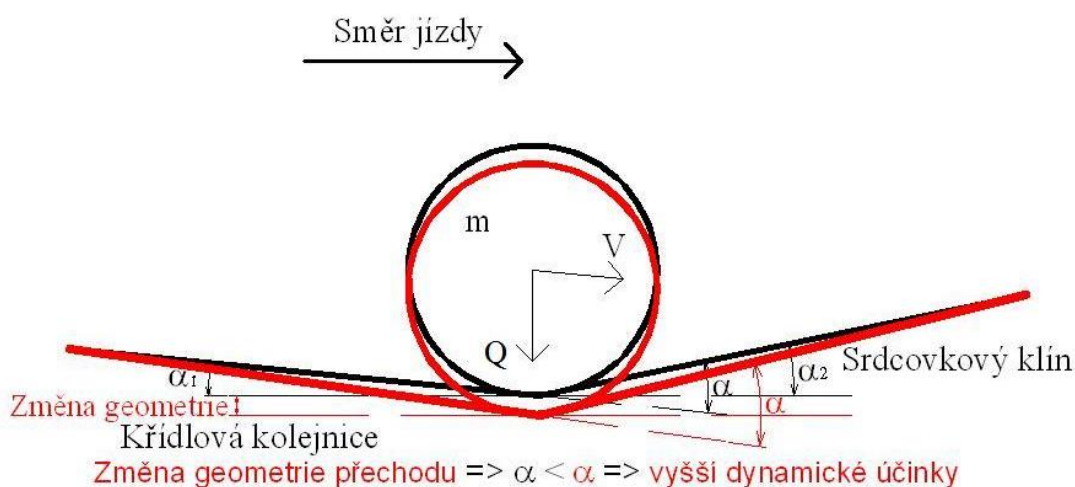


Obr. 4.1 Zjednodušený model pohybu kola přes srdcovku [32]

Jak je z Obr. 4.1 zřejmé, tak celkový úhel, pod kterým kola naráží na srdcovkový klín je $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, v tomto úhlu α je tedy zjednodušeně popsán vliv geometrie přechodu

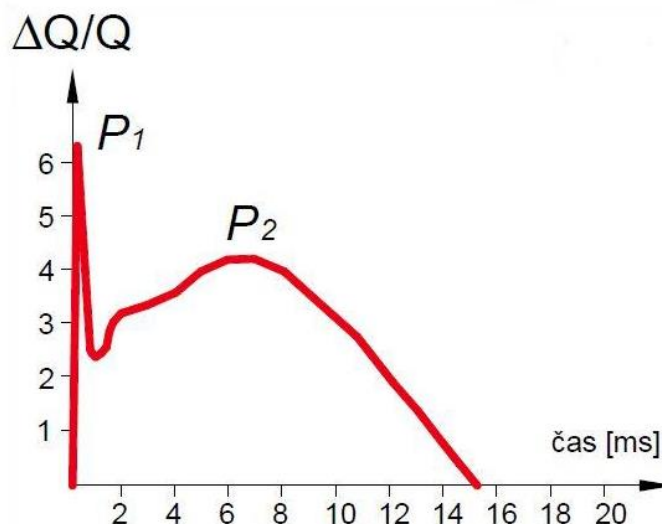
na dynamické zatížení srdcovky výhybky. Samozřejmě, že úhly na *Obr. 4.1* jsou pro názornost značně zvětšeny, ve skutečnosti se jedná o poměrně malé úhly.

Na geometrii přechodu se samozřejmě může podepsat kvalita podepření výhybky, jak bylo popsáno výše, pod přechodovou oblastí srdcovky se často vytváří dno poklesové kotliny. To má samozřejmě i vliv na geometrii přechodu a na úhel α , na kterém závisí dynamické namáhání srdcovky výhybky, jak je naznačeno na *Obr. 4.2*. Z *Obr. 4.2* a provedených měření [5, 31] je patrné, že změna vlivem špatného podepření konstrukce může podstatně zhoršit celkovou geometrii přechodu reprezentovanou úhlem α a podstatně tak zvýšit dynamické účinky na srdcovce výhybky [5, 31].



Obr. 4.2 Přejezd kola přes srdcovku při poklesu pražce pod srdcovkou [5]

Odbornou veřejností je všeobecně přijímána následující hypotéza týkající se dynamického zatížení (dynamického rázu) na srdcovce výhybky. První odezva srdcovky na dynamický ráz, při přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, se odehraje jako „vysokofrekvenční kontaktní proces“ („tvrdý ráz“) a je popsán silou P_1 . S ohledem na stav napjatosti, P_1 ovlivní hlavu srdcovky a způsobí typické rozložení kontaktního napětí. Po prvním kontaktu kola s hrotem srdcovky je změna hybnosti neodpružené hmotnosti přenesena na celý systém, který neobsahuje jen srdcovku, ale zahrnuje také sousední kolejnice, podložky pod kolejnicí, pražce a pražcové podložky, tento ráz může být nazýván spíše jako „nízkofrekvenční ohybový proces“ („měkký ráz“), přičemž odpovídající síla je označena jako P_2 . S ohledem na stav napjatosti, P_2 ovlivňuje patu srdcovky a kolejnice, kde vzniká napětí od ohybu [32]. Při stanovení životnosti se zpravidla uvažuje právě toto napětí, viz [33]. Situace může být vyjádřena grafem na *Obr. 4.3*.



Obr. 4.3 Dynamické síly na srdcovce výhybky [34]

Po nárazu kola se šíří vibrační energie od povrchu srdcovky směrem dolů k relativně tuhé podkladnici a pražci, na kterých je srdcovka uložena. Malá část energie je zachycena vnitřním tlumením samotné srdcovky, část energie je utlumena na podložce a pražci, ale část energie se také odrazí zpět, což je patrné na poklesu a následném stoupaní silových účinků mezi silovým vrcholem P_1 a P_2 na Obr. 4.3. Celková energie působící na srdcovku se skládá z deformační a kinetické, přitom kinetická energie aktivuje určitou hmotnost srdcovky [32]. U každého silového vrcholu působí jiná efektivní hodnota hmotnosti koleje. V případě síly P_1 se jedná zejména o hmotnost malé části srdcovky, což dokázali publikované analýzy metodou konečných prvků [35]. Tato hmotnost je vzhledem k relativně vysoké neodpružené hmotnosti kola poměrně malá. V případě hmotnosti pro výpočet silového vrcholu P_2 se již, naopak, jedná o hmotnost nezanedbatelnou, neboť změna hybnosti se přenesla na celý systém a spolu se srdcovkou již působí i okolní kolejnice, pražce a pražcové podloží. Silový vrchol P_1 se na konstrukci výhybky projeví především povrchovou deformací hrotu srdcovky, případně křídlové kolejnice, dle převládajícího směru jízdy. Silový vrchol P_2 pak zatěžuje srdcovku výhybky, okolní kolejnice a pražce ohybovým napětím.

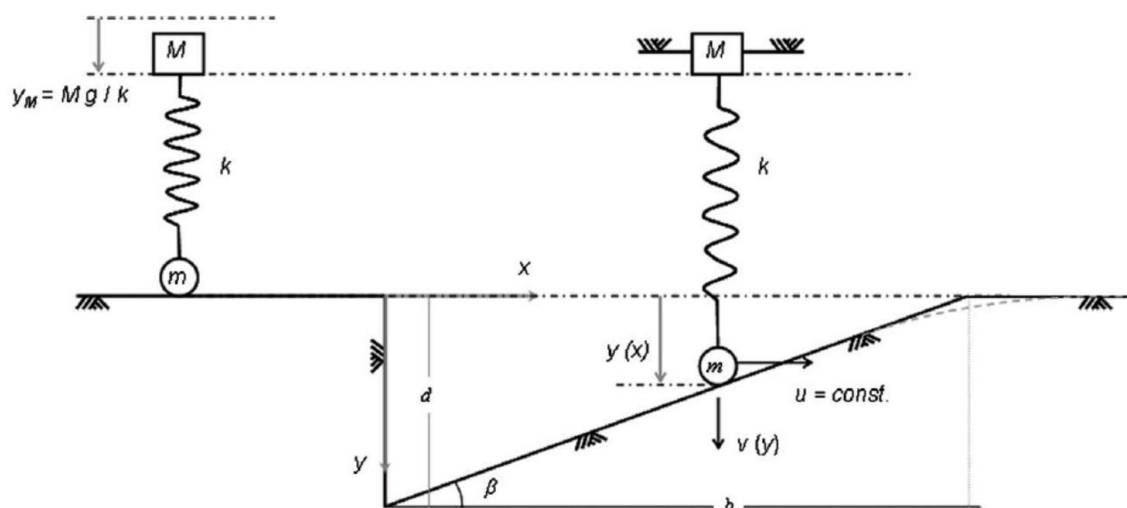
Síly P_1 a P_2 lze vypočítat dle následujících vzorců [33]:

$$P_1 = P_0 + \alpha v \sqrt{\frac{k_H m_{T1}}{1 + \frac{m_{T1}}{m_U}}}, \quad (4.1)$$

$$P_2 = P_0 + \alpha v \sqrt{\frac{m_U}{m_U + m_{T2}}} \left[1 - \frac{c_T \pi}{4 \sqrt{k_{T2} (m_U + m_{T2})}} \right] \sqrt{k_{T2} m_U}, \quad (4.2)$$

kde P_0 je statická síla na kontaktu kolo kolejnice (odpovídá kolové síle Q [kN]), α je celkový úhel, pod kterým kolo narazí do srdcovky výhybky ($\alpha_1 + \alpha_2$) [rad], v je rychlost vlaku [$m \cdot s^{-1}$], k_H je Hertzova kontaktní tuhost [$N \cdot m^{-1}$], m_{T1} je spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje [kg] pro výpočet síly P_1 , m_U je neodpružená hmotnost [kg], m_{T2} je spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje [kg] pro výpočet síly P_2 [kg], k_{T2} je ekvivalentní tuhost koleje pro výpočet P_2 [$N \cdot m^{-1}$], c_T je ekvivalentní tlumení koleje pro výpočet P_2 [$N \cdot s \cdot m^{-1}$] [5].

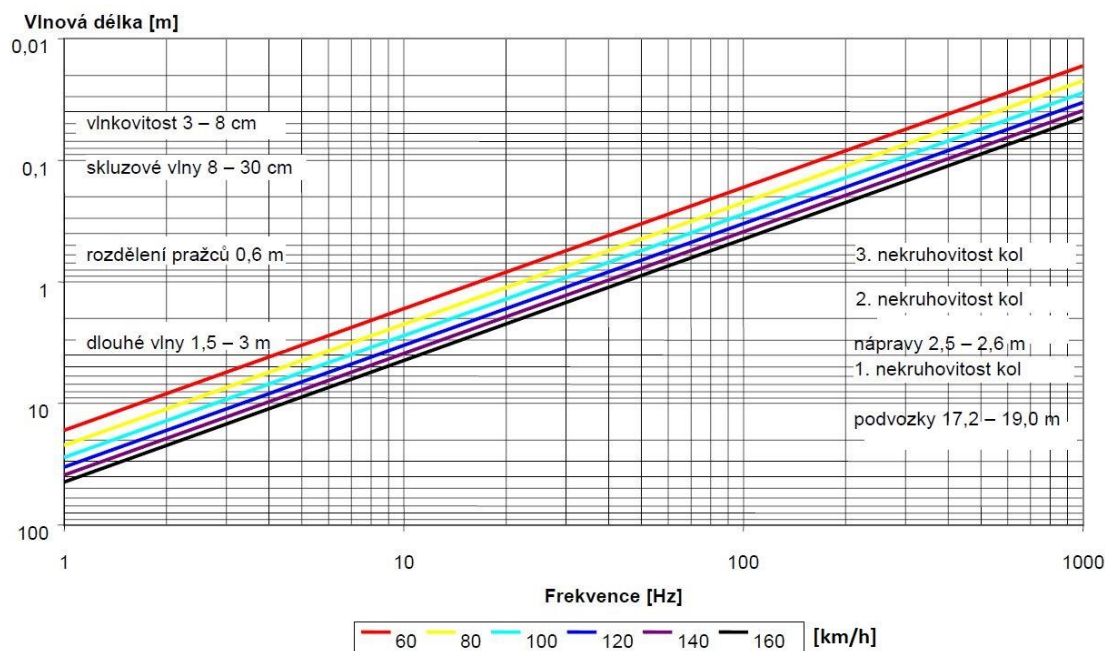
V rámci výzkumu [26] se řešitelský kolektiv zabýval rovněž modelem, kdy kolo doslova spadne na srdcovkový klín, jak jsem psala výše v případech, kdy je kolo velmi ojeté, nebo má již jízdní plocha konkávní tvar. Taková situace je schematicky zobrazena na Obr. 4.4. Model kalibrovali měřením, výsledky dosažené potvrdily, že kolejová kontaktní síla se při pádu na srdcovku zvýšila až trojnásobně.



Obr. 4.4 Dynamické síly na srdcovce výhybky [26]

V rámci výzkumu [26] uvedeného výše však přejížděli přes srdcovku výhybky lokomotivou maximální rychlostí $55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, takže lze předpokládat, že v extrémních případech bude muset srdcovka odolávat mnohem většímu nárůstu kontaktní normálové síly.

Z pohledu frekvenčního složení dynamického signálu je obecně přijímána teorie rozložení podle vlnových délek a rychlostí dle [36] viz Obr. 4.5.



Obr. 4.5 Zdroje vibrací z hlediska vlnové délky [4]

Dynamické síly P_1 a P_2 jsou z hlediska frekvenčního složení obtížněji zařaditelné, v odborné literatuře lze nalézt různé hodnoty. Například v [12] je uvedeno, že dynamická síla P_1 se projevuje nad 200 Hz a dynamická síla P_2 se objevuje v oblasti frekvencí 50 Hz až 80 Hz. V dalším výzkumu [37] lokalizují dynamickou sílu P_1 do frekvenčního pásma 70 Hz až 200 Hz a dynamickou sílu P_2 do frekvenčního pásma 20 Hz až 70 Hz, nutno ale dodat, že se jednalo o měření při rychlosti vlaků do 60 km.h⁻¹. Další výzkum [38] umístil působení dynamické síly P_2 do oblasti frekvencí 40 Hz až 50 Hz a dynamickou sílu P_1 do oblasti frekvencí 150 Hz až 200 Hz, vyšší frekvence okolo 500 Hz až 600 Hz připisují již Hetzrově kontaktu kolo-kolejnice. Poměrně rozsáhlá měření dělá ve výhybkách tým Vysokého Učení Technického v Brně, Ústav železničních konstrukcí a staveb pod vedením prof. Smutného. Na základě velkých zkušeností z měření [5] rozdělili frekvenční pásma na oblast působnosti dynamické síly P_2 (0 – 150 Hz) a oblast působnosti dynamické síly P_1 (150 – 600 Hz). Poměrně obsáhle se dynamickým silám P_1 a P_2 věnuje práce [20], kde sleduje jednotlivé vlivy na dynamické síly a je jich skutečně hodně, od rozdílné geometrie přechodu, po rozdílnou tuhost, různé podepření pražců a různé typy železničních vozidel a jejich rozdílnou rychlost přejíždění výhybky. Je pravděpodobné, že se projevy dynamických sil P_1 a P_2 mohou objevovat v širším frekvenčním spektru, jak je uvedeno zde [5].

5. Metodika měření

Pro měření dynamických účinků ve výhybkách je v České republice k dispozici certifikovaná metodika měření, která je certifikována Ministerstvem dopravy [39]. Certifikovanou metodiku vyvinul tým Vysokého Učení Technického v Brně, Ústav železničních konstrukcí a staveb pod vedením prof. Smutného. Podrobně je metodika popsána a zdůvodněna v této práci [5]. Z výše uvedených důvodů a také proto, že měření, která jsou v této diplomové práci, jsou součástí provozního ověřování nového uzlu upevnění, jsem se rozhodla metodiku měření neměnit. Pro měření jsem tedy použila certifikovanou metodiku měření, kterou jen zběžně popíši níže, protože je podrobně popsána v již v jiných pracích [39, 5]. Z certifikované metodiky jsem vybrala část, která se týká měření v srdcovkové části výhybky. Metodika je navržena pro měření in-situ bez omezení provozu na trati.

5.1. Měření pohybového chování konstrukce

Metodika je v této části navržena tak, abych byla schopna sledovat pohybové chování srdcovky pod zatížením železničními vozidly. Indukčnostní snímače dráhy jsou rozmístěny do kříže přes srdcovkovou část výhybky. Snímače jsou uchyceny k ocelovým tyčím pomocí ocelových držáků (*Obr. 5.1.1*), tyče jsou přes šterkové lože implementovány do konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku. Indukčnostní snímače dráhy jsou na *Obr. 5.1.3* vyznačeny červenými kruhy a popsány písmenem S a číslem snímače od 0 do 7. Jedna část metodiky sleduje pohyby pražců po délce srdcovky výhybky (na *Obr. 5.2.3* jsou to snímače S0, S1, S4 a S7) a druhá část sleduje pohybové chování pražce v přechodové zóně (na *Obr. 5.2.3* jsou to snímače S2, S3, S4, S5 a S6). Znat pohyby pražců po délce srdcovky výhybky nám pomůže zjistit, nakolik je geometrie přechodu ovlivněna zatlačeními pražců. Sledování pražce v přechodové zóně zase ukáže, jak je nejzatíženější pražec podepřen. Dohromady pak celkové pohyby konstrukce určí, jak se srdcovková část výhybky chová pod zatížením.



Obr. 5.1.1 Indukční snímač pohybu pražce nainstalovaný v koleji

5.2. Přenos vibrací konstrukcí výhybky

Pro sledování šíření dynamického rázu konstrukcí je nejvhodnější měření zrychlení vibrací [39, 5]. Díky této části metodiky měření získám představu, jak se dynamický ráz šíří ze srdcovky výhybky přes pražec až do štěrkového lože. Pro měření zrychlení vibrací byly použity piezoelektrické snímače zrychlení kmitání. Snímače jsou na *Obr. 5.2.3* vyznačeny fialovým čtvercem s křížkem. Každý signál ze snímačů zrychlení kmitání má svůj kód, jsou označeny velkým písmenem A, poté následuje číslo signálu od 0 do 8 (snímače v měřicím kameni jsou označeny 33) a nakonec velkým písmenem směr snímání vzhledem k ose koleje (Z – svislý směr, X – podélný směr a Y – příčný směr). Snímače jsou v rámci metodiky umístěny tak, aby byly schopny zachytit šíření vibrační energie celým systémem. Tříosý akcelerometr umístěný na patě křídlové kolejnice (*Obr. 5.2.1*) sleduje velikost dynamického rázu, který působí na srdcovku výhybky (A4Z, A5X, A6Y na *Obr. 5.2.3*). Ve svislém směru (A4Z) se zachytí velikost svislé složky dynamického rázu na srdcovku, resp. ta část, která je přenesena do paty křídlové kolejnice, v podélném směru je to signál označený A5X a v příčném směru A6Y. Další snímače jsou jednoosé a jsou umístěny tak, aby bylo co nejlépe zachyceno šíření dynamického rázu ze srdcovky výhybky přes pražec až do štěrkového lože. Umístění snímačů je následující (viz také *Obr. 5.2.3*):

- A3Z – na pražci pod hrotem srdcovky
- A0Z – na tzv. měřicí tyči, která je zapuštěna do štěrkového lože v blízkosti hrotu srdcovky [5, 39]

Přenos vibrační prážcem budou sledovat tyto snímače:

- A1Z – za hlavou pražce v přímé větvi
- A2Z – v ose přímé větve
- A4Z – na patě křídlové kolejnice v přímé větvi
- A7Z – v ose odbočné větve
- A8Z – za hlavou pražce v odbočném směru

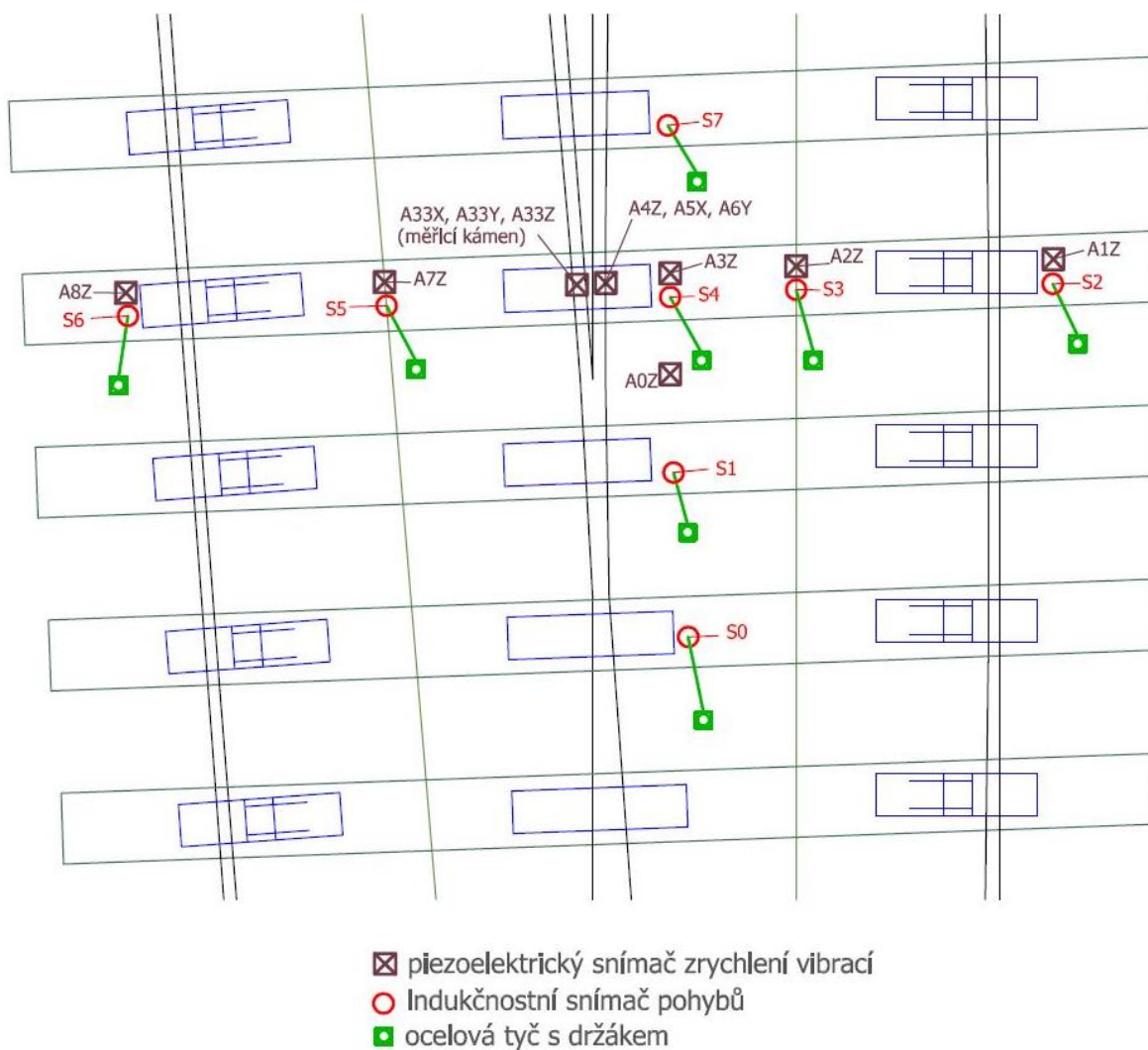
V rámci certifikované metodiky byly rovněž vyvinuty měřicí kamene do šterkového lože, které byly u sledovaných výhybek umístěny na několika místech. V rámci této diplomové práce se budu zabývat vyhodnocením dat z měřicího kamene přímo pod pražcem pod hrotem srdcovky. Měřicí kámen tvoří tříosý akcelerometr typu MEMS vestavěný do šterkového zrna (*Obr. 5.2.2*).



Obr. 5.2.1 Tříosý akcelerometr umístěný na patě křídlové kolejnice



Obr. 5.2.2 Měřicí kámen



Obr. 5.2.3 Schéma použité metodiky měření

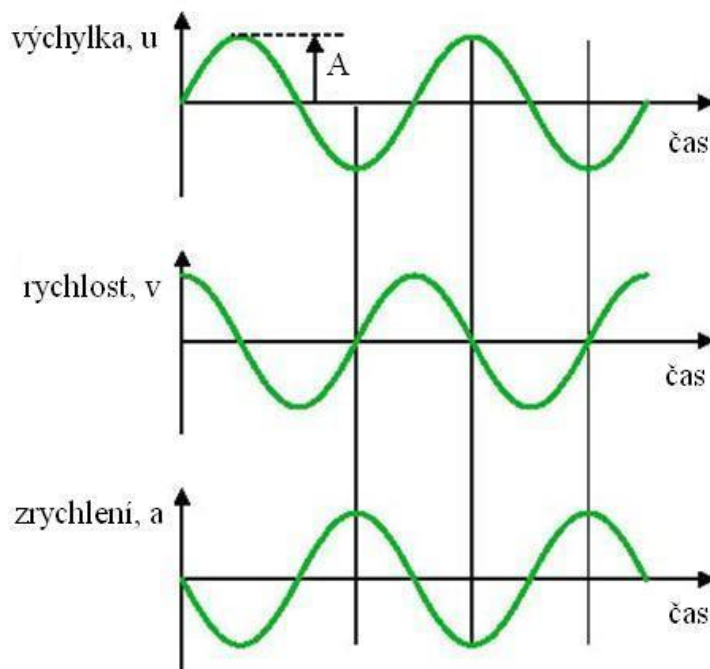
6. Matematický aparát

Při měření dynamických účinků od kolejových vozidel přímo in-situ je třeba popsat a vyhodnotit stochastický signál, což je poměrně obtížné. Aby bylo možné získat potřebné informace a porovnat mezi sebou dynamické účinky na jednotlivých konstrukcích, je výhodné hodnotit jej ve třech pomyslných rovinách. První je rovina časová, kde se budou hodnotit maximální a minimální hodnoty obsažené v měřeném signálu a především efektivní hodnota (často se užívá označení RMS, což je zkratka Root Mean Square). V časové oblasti se získá ze signálu informace, ve kterém časovém okamžiku se vyskytují maxima a minima (na které nápravě, případně kole vlaku) a také je možné získat představu o celkovém energetickém působení vlaku na konstrukci (klouzavá RMS). Pro podrobnou analýzu dynamických účinků je to však informace nedostačující, neboť není známé

frekvenční složení. Z tohoto důvodu je vhodné použití převodu signálu z roviny časové do roviny frekvenční. Tento převod lze provést pomocí metod založených převážně na Fourierově transformaci. Ve frekvenční rovině je možné provést analýzu, jaké frekvenční složky jsou v signálu nejvýraznější. Pro podrobný rozbor je vhodné použít ještě třetí rovinu vyhodnocení, a to rovinu časově-frekvenční. V této rovině je možné sledovat nejen frekvenční složení signálu, ale také výskyt frekvenčních složek v čase. V následující části je popsán použitý matematický aparát.

6.1. Časová oblast

Základními určujícími veličinami při vyhodnocování mechanického kmitání jsou výchylka, rychlost a zrychlení. Jak je patrné z *Obr. 6.1.1*, rychlost kmitání je v porovnání s výchylkou ve fázovém předstihu o $\pi/2$ a zrychlení kmitání ve fázovém předstihu o π . Jelikož v námi měřeném signálu se objevují vysokofrekvenční složky a jedná se o náhodný stochastický signál, je nejvýhodnější vyhodnocovat maxima, minima a především efektivní hodnotu (RMS) [5, 41, 42]. Minima a maxima mohou odhalit tzv. plochá kola, případně nápravu, nebo podvozek vozidla, který vykazuje oproti ostatním nestandardní chování. Také odhalí maximální špičkové hodnoty kolových sil, převedené a zachycené ve formě zrychlení vibrací [5].



Obr. 6.1.1 Grafické znázornění závislosti výchylky, rychlosti a zrychlení na čase [42]

Pokud označíme u jako výchylku, v jako rychlost, a jako zrychlení, A jako amplitudu, ω jako úhlovou frekvenci a t jako čas, pak můžeme popsat vztahy mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením kmitání následujícími vzorci:

$$u = A \cdot \sin \omega t \quad (6.1.1)$$

$$u = A \quad (6.1.2)$$

$$v = \frac{du}{dt} = A\omega \cos \omega t \quad (6.1.3)$$

$$v = A\omega = A2\pi f \quad (6.1.4)$$

$$a = \frac{d^2u}{dt^2} = A\omega^2 \sin \omega t \quad (6.1.5)$$

$$a = A\omega^2 = A \cdot 4\pi^2 f^2 \quad (6.1.6)$$

6.1.1. Efektivní hodnota zrychlení vibrací

Hodnota RMS je z hlediska hodnocení vibrací v časové oblasti nejdůležitější parametr, protože zahrnuje dobu působení vibrací, a zároveň má přímý vztah k jeho energetickému obsahu. Je tedy měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti vibrací. Efektivní hodnota zrychlení vibrací je definována dle vztahu [40].

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt}, \quad (6.1.1.1)$$

kde $a(t)$ je okamžitá hodnota zrychlení, T doba, pro kterou je třeba efektivní hodnotu určit.

V diplomové práci jsem se rozhodla použít hodnotu RMS ve formě plochy pod křivkou klouzavé RMS. Tato plocha má výhodu v tom, že vlaky jsou pak vůči sobě lépe porovnatelné. Podrobněji je to rozepsáno v této práci [5]. Pro výpočet plochy klouzavé RMS se využije vzorec 6.1.1.1 s tím, že se vždy spočítá hodnota RMS po 200 vzorcích a posune se výpočet o jeden vzorek a znovu spočítá hodnota RMS. Tím lze docílit dostatečně přesnou křivku, pod kterou se poté počítá plocha dle vzorce 6.1.1.2:

$$P = \int_a^b f(x) dx, \quad (6.1.1.2)$$

kde P je plocha pod křivkou klouzavého RMS, a a b jsou meze pro výpočet a $f(x)$ je křivka klouzavého RMS.

6.2. Frekvenční oblast

Pro převod z časové do frekvenční roviny jsem se rozhodla pro Fourierovu transformaci, respektive její modifikaci pro technické signály, tzv. rychlou Fourierovu transformaci (Fast Fourier Transform – zkratka FFT). Pro srovnání více signálů do jednoho grafu však Fourierova transformace není příliš vhodná a je lepší použít Welchovu metodu, která při vhodném nastavení dokáže vytvořit jednodušší křivku a přitom se neztratí informace o frekvenčních špičkách.

6.2.1. Fourierova transformace

Fourierova transformace patří mezi neparametrické metody, to znamená, že celá analýza se opírá pouze o změřená data. Jedná se však o nejčastější transformaci pro převod z časové do frekvenční oblasti. Fourierova transformace je definována pro spojitou funkci následujícími integrálními rovnicemi. Pro přímou transformaci platí vztah [41]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt, \quad (6.2.1)$$

kde f je frekvence, t je čas, $x(t)$ je signál v časové oblasti a $X(f)$ je jeho reprezentace ve frekvenční oblasti, j je imaginární jednotka.

6.2.2. Diskrétní Fourierova transformace – DFT

Pokud ovšem pracujeme s diskrétním (navzorkovaným) signálem, pak pro přímou Fourierovu transformaci platí vztah [43]:

$$X_k = \frac{1}{T} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi k}{T}\right) \cdot (n\Delta)} \cdot \Delta = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi k n}{N}\right)} \quad (6.2.2.1)$$

kde x_n je hodnota n -tého prvku diskrétní posloupnosti (čas $t = n\Delta$), X_k je k -tá frekvenční složka signálu, $\Delta = \frac{T}{N}$, T je doba trvání realizace, N je počet prvků naměřené posloupnosti a j je imaginární jednotka.

6.2.3. Fast Fourier Transform – FFT

Pro výpočet DFT s N vzorky je třeba provést N^2 sčítání a N^2 násobení komplexních čísel. Cooley a Tukey vypracovali metodu značného urychlení výpočtu, pro kterou se používá název Fast Fourier Transform. Podstatou této metody je volba zvláštní délky záznamu:

$$N = 2^m, \quad (6.2.3.1)$$

kde m je přirozené číslo. Hodnotám $m = 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13$ odpovídá N :

$$N = 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192 \quad , \quad (6.2.3.2)$$

vztah (6.2.2.1) se v praktických úlohách potom aplikuje pro tyto délky signálu N [44].

6.2.4. Welchova metoda

Welchova metoda je jistou modifikací algoritmu rychlé Fourierovy transformace. Digitalizovaný signál $x[n]$ ($n=0,1,2,\dots, N-1$) je rozdělen na K segmentů, každý o délce M vzorků ($x_i[m]$, $i=0,1,\dots, k-1$, $m=0,1,\dots,M-1$). Segmenty jsou umístěny buď těsně vedle sebe, pak $N=K \cdot M$, nebo se mohou překrývat. Každý segment je vážen příslušnou okénkovou funkcí $w[m]$. Po transformaci a následném výpočtu kvadrátu modulu vzniknou dílčí periodogramy $S_j[k]$. Tyto vytvoří po zprůměrování výsledný vyhlazený odhad spektrální hustoty $S[k]$. Tento odhad lze popsat následujícími vztahy. Dílčí periodogram je určen vztahem [41].

$$S_j[k] = \frac{1}{U \cdot M} \cdot \left| \sum_{m=0}^{M-1} x[m + i \cdot M] \cdot w[m] \cdot e^{\left(\frac{-j2\pi mk}{M}\right)} \right|^2, \quad (6.2.4.1)$$

kde

$$U = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} w^2[m] \quad (6.2.4.2)$$

je norma vektoru okénkové funkce, $w[m]$ je okénková funkce. Výsledný vyhlazený odhad se získá zprůměrováním dílčích periodogramů

$$\hat{S} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=0}^{K-1} S_j[k]. \quad (6.2.4.3)$$

6.3. Časově-frekvenční oblast

Z frekvenční analýzy získáme informaci, jaké frekvence nám v signálu působí, ale nezjistíme jejich časovou lokalizaci. Jinými slovy nebudeme schopni odhadnout, jestli dominantní frekvenční složky skutečně odpovídají průjezdu jednotlivých kol. Tyto informace můžeme zjistit z časově-frekvenční analýzy [5].

6.3.1. Krátkodobá (okénková) Fourierova transformace (STFT)

STFT (Short Time Fourier Transform) lokalizuje frekvenční složky v čase s konstantním (lineárním) rozlišením. Základním principem je rozdělení signálu na dostatečně malé realizace, u nichž je možno předpokládat dostatečnou stacionaritu.

To je provedeno multiplikací jisté okénkové funkce na signálu. Na každém takovém výřezu je provedena Fourierova transformace (FT). Okénko se posouvá v čase. STFT poskytuje kompromis mezi časovou a frekvenční reprezentací signálů [41]. Její definiční integrál je:

$$STFT_X^{(\omega)}(t', f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot g * (t - t')] \cdot e^{-i2\pi f(t-t')} \cdot dt, \quad (6.3.1)$$

kde g je okénková funkce, '*' komplexní konjunkce, t' časové posunutí okénka, $x(t)$ je časová reprezentace signálu a $STFT_X^{(\omega)}(t', f)$ je jeho časově-frekvenční reprezentace [41].

7. Parametry měření

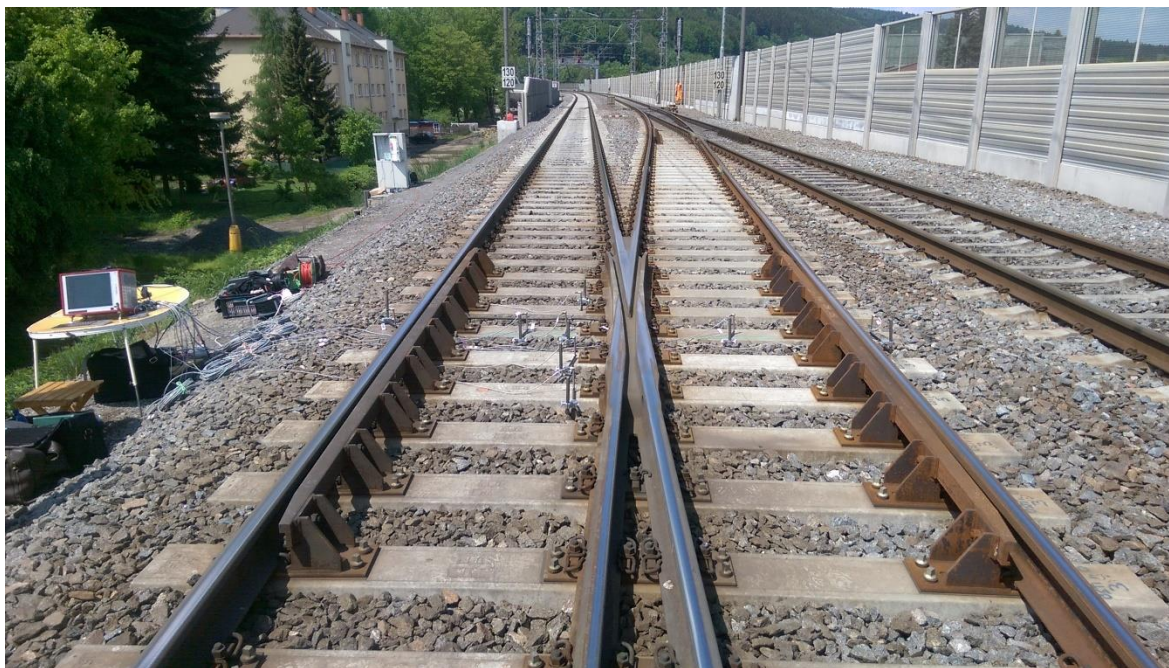
V této kapitole bych se chtěla věnovat požitému měřicímu vybavení a nastavení provedených měření. Vzhledem k tomu, že měřicí metodika je certifikována, a to zahrnuje i výběr vhodných snímačů, měřicí ústředny a parametrů měřicího řetězce [5, 39], tak jsem použila, co již bylo na mnoha měřeních s úspěchem vyzkoušeno. Pro měření dynamických účinků je na Ústavu železničních konstrukcí a staveb Vysokého Učení Technického v Brně k dispozici špičkové vybavení. Pro měření pohybů pražců byly použity indučnostní snímače dráhy od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, typ WA-10 T, které jsou dostatečně robustní, odolné (prachu a vodě těsné) a mají dostatečný pracovní rozsah 10 mm. Pro měření zrychlení vibrací byly použity akcelerometry od firmy Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. Konkrétně byly použity jednoosé snímače typu B001 a B004 a tříosý snímač typu 4524 B001. Vybrané snímače mají pevné titanové pouzdro, jsou mimořádně mechanicky odolné, velmi spolehlivé, a proto vhodné pro měření v terénu. Měřicí kameny tvoří tříosé akcelerometry typu MEMS vestavěné do šterkového zrna [5, 39]. Měřicí kameny byly zabudovány do šterkové vrstvy přímo pod pražec v přechodové zóně srdcovky výhybky již během pokládky konstrukcí v železniční stanici Ústí nad Orlicí.

Vzorkovací frekvence byla jak u měření pohybového chování konstrukce srdcovkové části výhybky, tak u měření vibrací nastavena na 10 kHz. Filtr dolní propusti byl nastaven na hodnotu 1 kHz a filtr horní propusti byl nastaven na pražci a kolejnici na 3 Hz a na 0,3 Hz ve šterkovém loži. Podrobněji je nastavení měření rozebráno v této práci [5]. U všech měření byla použita měřicí ústředna DEWE 2502. Záznamy byly ukládány na

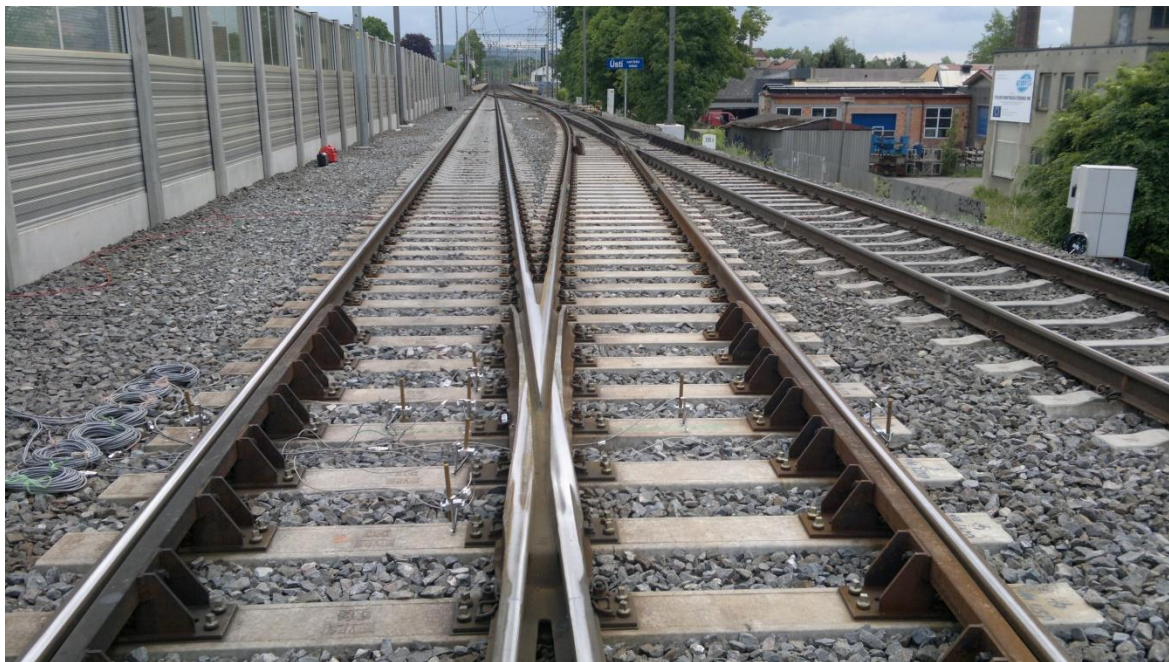
pevném disku přímo v ústředně. Rychlosti drážních vozidel v místě přejezdu přes měřené konstrukce byly měřeny radarovým zařízením Buschnell 10-1900.

8. Popis lokality měření a měřených výhybek

Vybrané výhybky se nachází na třebovském zhlaví železniční stanice Ústí nad Orlicí. Byly vyrobeny a vloženy do koleje v srpnu roku 2014 [45]. Výhybky jsou součástí jednoduché kolejové spojky. Jsou vloženy v přímé koleji, traťovou rychlost však omezuje oblouk za výhybkami směrem do stanice. Maximální traťová rychlost v úseku, kde jsou vloženy výhybky je 130 km.h^{-1} a pro jednotky s naklápěcími skříněmi je to 160 km.h^{-1} . Měřenými výhybkami jsou výhybky č. 3 a 4, které tvoří jednoduchou kolejovou spojku. Výhybka č. 3 má nový typ pružnějšího upevnění. Obě výhybky jsou kromě uzlu upevnění prakticky totožné. Upevnění ve výhybce č. 3 je popsáno v kapitole 3.1.4. Výhybky jsou soustavy železničního svršku UIC 60, na betonových pražcích s upevněním Vossloh Skl24. Výhybky mají štiřlost 1:12, poloměr odbočení 500 m a typ srdcovky je ZTP – monoblok. Srdcovky byly odlity v Itálii v závodě Bari Fonderie Meridionali. Výrobce výhybek je DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. Obě jsou pojížděny po hrotu. Výhybka č. 3 (*Obr. 8.1*) je umístěna v koleji č. 1 a výhybka č. 4 (*Obr. 8.2*) je v koleji č. 2.



Obr. 8.1 Pohled na srdcovku výhybky č. 3 směrem do žst. Ústí nad Orlicí



Obr. 8.2 Pohled na srdcovku výhybky č. 4 směrem do zastávky Ústí nad Orlicí město

9. Vyhodnocení provedených měření

V rámci této diplomové práce se zabývám 3 měřicími kampaněmi. V rámci každé kampaně bylo provedeno na každé konstrukci jedno měření. První měřicí kampaň již byla vyhodnocena v rámci této práce [5]. V rámci mé práce jsem vyhodnotila další dvě měřicí kampaně a poté jsem výsledky všech kampaní srovnala. Přehled měřících kampaní, které jsou součástí této práce:

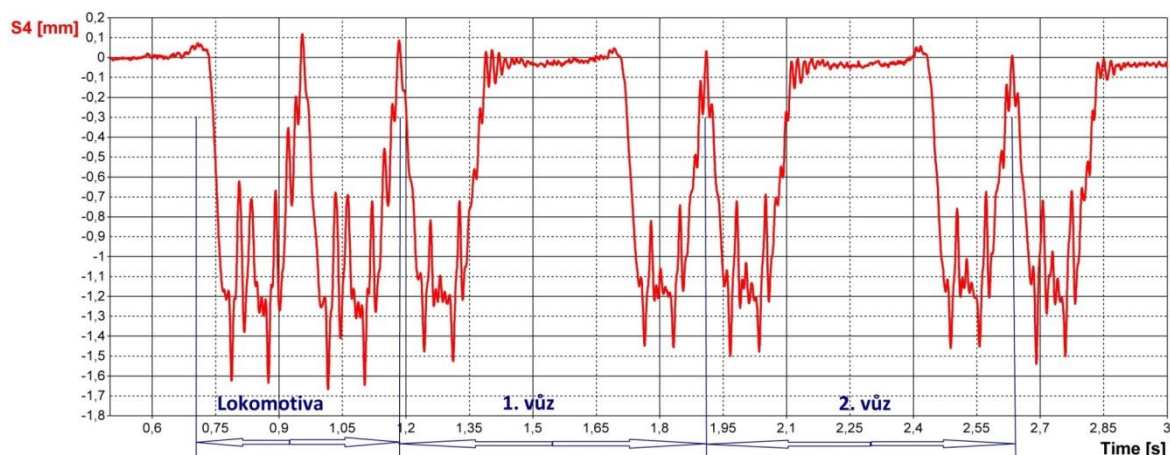
- První měřicí kampaň
 - 22. 5. 2015 – výhybka č. 3
 - 27. 5. 2015 – výhybka č. 4
- Druhá měřicí kampaň
 - 6. 11. 2015 – výhybka č. 3
 - 13. 11. 2015 – výhybka č. 4
- Třetí měřicí kampaň
 - 26. 7. 2016 – výhybka č. 3
 - 27. 7. 2016 – výhybka č. 4

Vzhledem k tomu, že měření je součástí dlouhodobého sledování obou konstrukcí, tak systém vyhodnocení jsem ponechala tak, jak byl nastaven týmem pod vedením prof. Smutného. Vyhodnocení je rozděleno do dvou částí. V první části se zabývám vyhodnocením pohybového chování konstrukcí pod zatížením kolejovými vozidly a ve

druhé části se zabývám hodnocením šíření dynamického rázu konstrukcí od kolejových vozidel, prostřednictvím hodnocení zrychlení vibrací. Všechny grafy, které jsou součástí textové části diplomové práce, jsem ještě jednou zařadila i do části přílohové, kde jsou přehledně zobrazeny na celou stranu.

9.1. Vyhodnocení pohybového chování konstrukce

Při vyhodnocování pohybového chování konstrukcí pod zatížení kolejovými vozidly jsem si nejprve zobrazila přehledové grafy pohybů pražců v místech jednotlivých snímačů. Tyto přehledové grafy jsou součástí příloh. Z každého měření jsem vybrala několik reprezentativních vlakových souprav, aby přílohová část práce nebyla zbytečně rozsáhlá. Přehledové grafy jsou seřazeny vždy tak, že na levé straně obrázků v přílohách jsou pohyby pražců podél srdcovky výhybky a na pravé straně jsou seřazeny pod sebou pohyby pražce v přechodové zóně. Z přehledových grafů je patrné, že mechanismus pohybů pražců je u obou konstrukcí stejný. Pohybové chování obou konstrukcí pod zatížením lze popsat jako očekávané. Typický záznam pohybu pražce pod zatížením je na *Obr. 9.1.1*. Je to výřez, kde je vidět průjezd lokomotivy a dvou vozů. Před nájezdem lokomotivy nad měřený pražec dochází k mírnému zdvihu pražce, nebo spíše lépe řečeno k odlehčení. Poté dochází ke stlačení pražce koly první nápravy lokomotivy, což je ze záznamu velmi dobře vidět. Následuje odlehčení mezi nápravami a pražec se vrací do své původní pozice. Kola druhé nápravy lokomotivy pražec znovu stlačí a celý proces se opakuje. Mezi nápravami jednotlivých vozů se pražec vrací do své původní pozice. U obou výhybek je tento pohyb pražce téměř totožný. Největší zatlačení pražce je obvykle pod lokomotivami. Ucelené jednotky (Pendolino a LEO Express) mají zatlačení pražců od všech náprav prakticky stejné. Také je vidět, že k odlehčení pražce dochází i před průjezdem posledního podvozku každého vozu. Tedy vždy poté, co se pražec vrátí do původní polohy, pak následuje mezera mezi podvozky jednotlivých vozů a poté zdvih pražce před posledním podvozkem a poté opětovné zatlačení pražce. Na snímači S6 (za hlavou pražce v odbočné větvi) dochází při průjezdu vlaku ke zdvihům. Hlava pražce v odbočné větvi není zatížena, proto je to logické. Z přehledových grafů je patrné, že zatímco u výhybky č. 3 se zdvihy od prvního po třetí měření spíše zvyšují, tak na výhybce č. 4 mají zdvihy pražce v místě snímače S6 opačný trend, takže se spíše snižují. U posledního měření jsou zdvihy pražce v místě snímače S6 větší na výhybce č. 3 až o půl milimetru.



Obr. 9.1.1 Pohybové chování pražce pod zatížením

Ze signálů pohybového chování pražců jsem odečetla maximální zatlačení a sestavila je do tabulky. Kompletní tabulky zatlačení jsou součástí příloh. První měřicí kampaň byla vyhodnocena v rámci této práce [5]. Proto se budu věnovat podrobněji dalším dvěma měřicím kampaním a srovnání všech tří kampaní. V Tab. 9.1.1 jsou výsledky z první měřicí kampaně, zde byly vybrány jen porovnatelné vlaky a lokomotivy na obou konstrukcích.

Souprava	Výhybka	Maximální zatlačení [mm]								Rychlost [km/h]
		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
Leo Express	3	-1	-1,928	-1,175	-1,645	-1,78	-1,428	-0,839	-1,275	130
Leo Express	4	-1,34	-2,013	-1,925	-1,597	-1,585	-1,136	-0,708	-0,935	130
loko 362	3	-0,871	-1,739	-1,156	-1,528	-1,888	-1,478	-0,806	-1,186	91
loko 362	4	-1,285	-2,01	-2,026	-1,729	-1,6	-1,221	-0,756	-1,044	92
loko 380	3	-1,082	-1,926	-1,167	-1,678	-2,219	-1,559	-1,415	-1,267	131
loko 380	4	-1,696	-2,249	-1,91	-1,695	-1,796	-1,258	-0,694	-1,033	129
Pendolino	3	-1,164	-1,94	-1,263	-1,733	-2,068	-1,469	-1,37	-1,251	148
Pendolino	4	-1,379	-2,005	-2,019	-1,618	-1,729	-1,222	-0,776	-0,991	144
loko 150	3	-0,858	-1,783	-1,296	-1,593	-1,89	-1,519	-0,891	-1,172	80
loko 150	4	-1,434	-2,109	-1,909	-1,753	-1,695	-1,323	-0,745	-1,088	80
Maximum	3	-0,858	-1,739	-1,156	-1,528	-1,78	-1,428	-0,806	-1,172	
Maximum	4	-1,285	-2,005	-1,909	-1,597	-1,585	-1,136	-0,694	-0,935	
Minimum	3	-1,164	-1,94	-1,296	-1,733	-2,219	-1,559	-1,415	-1,275	
Minimum	4	-1,696	-2,249	-2,026	-1,753	-1,796	-1,323	-0,776	-1,088	

Tab. 9.1.1 Maximální zatlačení pražců u vybraných souprav – první měřicí kampaň [5]

Z Tab. 9.1.1 je vidět, že obě konstrukce mají rozdílné chování. V místech snímačů S0, S1 a S2 jsou větší zatlačení na výhybce č. 4, na snímači S3 mají obě konstrukce stejné hodnoty a na snímačích S4, S5, S6 a S7 se větší zatlačení projevuje na výhybce č. 3. Největší zatlačení na obou konstrukcích dosahuje hodnoty 2,2 mm.

Vzhledem k tomu, že se mezi první a druhou kampaní změnila skladba vlaků, které přejíždějí přes obě konstrukce, rozhodla jsem se, že tabulky maximálních zatlačení na obou konstrukcích zpracuji statisticky. Hodnoty z druhé měřicí kampaně jsou pro výhybku č. 3

v *Tab. 9.1.2* a pro výhybku č. 4 v *Tab. 9.1.3*. Kompletní tabulky s přehledem všech vlaků z druhé měřicí kampaně pro obě výhybky jsou součástí příloh.

Výhybka č. 3	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Maximum	-0,8	-1,5	-2,2	-1,5	-1,3	-0,8	-0,3	-0,5
Kvantil 75	-0,9	-1,6	-2,3	-1,6	-1,6	-1,0	-0,4	-0,6
Medián	-0,9	-1,6	-2,4	-1,6	-1,6	-1,0	-0,5	-0,7
Kvantil 25	-1,0	-1,7	-2,4	-1,7	-1,7	-1,1	-0,5	-0,8
Minimum	-1,1	-1,8	-2,7	-1,8	-1,8	-1,2	-0,5	-1,0

Tab. 9.1.2 Maximální zatlačení pražců – druhá měřicí kampaň, výhybka č. 3

Výhybka č. 4	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Maximum	-0,9	-1,4	-2,3	-1,4	-1,4	-1,2	-0,8	-1,0
Kvantil 75	-1,1	-1,8	-2,4	-1,6	-1,7	-1,4	-1,0	-1,1
Medián	-1,2	-1,9	-2,5	-1,8	-1,8	-1,5	-1,0	-1,2
Kvantil 25	-1,3	-2,0	-2,6	-1,9	-1,9	-1,5	-1,1	-1,3
Minimum	-1,4	-2,1	-2,7	-2,0	-1,9	-1,7	-1,2	-1,3

Tab. 9.1.3 Maximální zatlačení pražců – druhá měřicí kampaň, výhybka č. 4

Při pohledu na *Tab. 9.1.2* a *Tab. 9.1.3* lze říci, že zatlačení pražců jsou u obou výhybek podobná. Největší rozdíl je na čidlech S6 a poté na čidlech S5 a S7, kde má výhybka č. 4 výraznější zatlačení. Na ostatních čidlech vykazuje výhybka č. 4 také větší zatlačení, ale rozdíly jsou minimální. Pokud porovnáme výsledky s předchozí měřicí kampaní, tak vidíme, že u výhybky č. 3 došlo paradoxně u většiny hodnot ke zlepšení, zatímco u výhybky č. 4 došlo u většiny hodnot ke zhoršení stavu. U obou konstrukcí poněkud překvapivě došlo k výraznému zhoršení (až o 1,4 mm na výhybce č. 3 a až o 0,7 mm na výhybce č. 4) za hlavou pražce v přímé větvi výhybky, tedy v místě snímače S2. Toto zhoršení si neumím vysvětlit, protože v tomto místě nepůsobí dynamický ráz a i s ohledem na ostatní měření v jiných lokalitách je to nezvyklé. Jediné, ale poněkud znepokojivé vysvětlení by mohlo být, že se mírně pohnuly okraje násypu. Obě konstrukce leží na vysokém násypu, na straně výhybky č. 3 je násyp vyšší, ale na straně výhybky č. 4 je zase přitížen protihlukovou stěnou. Snímač S2 je právě u obou konstrukcí na hlavě pražce směrem k okraji násypu. Tento trend bude třeba sledovat i do budoucna.

V *Tab. 9.1.4* a *Tab. 9.1.5* jsou výsledky maximálních zatlačení pražců z třetí kampaně měření. V *Tab. 9.1.4* jsou výsledky pro výhybku č. 3 a v *Tab. 9.1.5* jsou výsledky pro výhybku č. 4. Ve třetí kampani měření jsem zvolila stejný systém vyhodnocení, jak v předchozí kampani, výsledky tak budou mnohem lépe porovnatelné. Do textové části diplomové práce jsem opět uvedla pouze tabulku se statistickým vyhodnocením.

Kompletní tabulky s maximálním zatlačením v místech jednotlivých čidel jsou pro obě výhybky opět součástí příloh.

Výhybka č. 3	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Maximum	-1,4	-1,7	-1,5	-1,5	-1,5	-1,4	-0,5	-0,9
Kvantil 75	-1,6	-2,4	-2,4	-2,1	-2,1	-1,6	-0,6	-1,1
Medián	-1,6	-2,5	-2,5	-2,2	-2,2	-1,8	-0,8	-1,2
Kvantil 25	-1,7	-2,6	-2,6	-2,3	-2,3	-1,9	-0,8	-1,3
Minimum	-1,8	-2,8	-2,9	-2,5	-2,5	-2,0	-1,0	-1,4

Tab. 9.1.4 Maximální zatlačení pražců – třetí měřicí kampaň, výhybka č. 3

Výhybka č. 4	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Maximum	-1,4	-1,7	-1,4	-1,7	-1,6	-1,8	-1,0	-1,3
Kvantil 75	-1,7	-2,5	-2,7	-2,6	-2,6	-2,1	-1,1	-1,6
Medián	-1,8	-2,7	-2,8	-2,7	-2,7	-2,2	-1,2	-1,8
Kvantil 25	-2,0	-2,8	-3,0	-2,9	-2,9	-2,3	-1,3	-2,0
Minimum	-2,1	-3,0	-3,3	-3,0	-3,1	-2,6	-1,5	-2,2

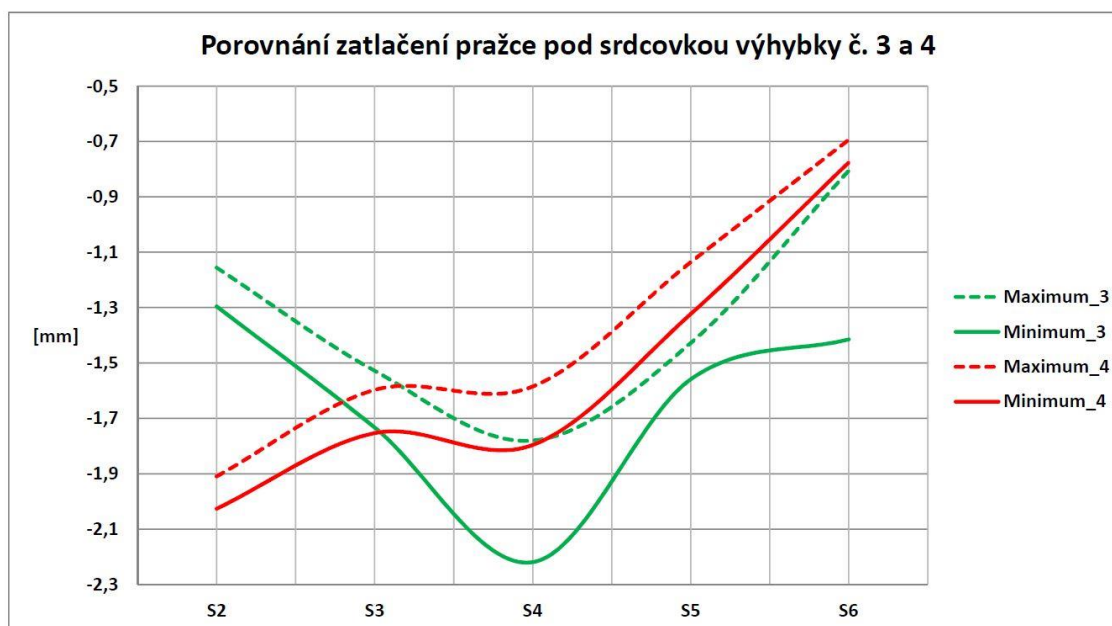
Tab. 9.1.5 Maximální zatlačení pražců – třetí měřicí kampaň, výhybka č. 4

Z Tab. 9.1.4 a Tab. 9.1.5 je zřejmé, že na všech snímačích již dosahuje větších hodnot zatlačení výhybka č. 4, a to až o 0,6 mm, což je již podstatný rozdíl. Pokud porovnáme výsledky třetí měřicí kampaně s předchozí druhou měřicí kampaní, tak je vidět podstatné zhoršení u obou konstrukcí, nicméně u výhybky č. 4 je zhoršení větší. Větší zhoršení u obou výhybek dosahují místa, která jsou v blízkosti přechodové zóny srdcovky, zatímco snímače na krajích (na hlavách pražců) S2 a S6 mají zhoršení stavu výrazně menší. V místě snímače S2, kde byly u předchozího měření velké změny, se nezhoršil tak výrazně, což je pozitivní, nicméně i tak jsou v tomto místě zatlačení pražce poměrně velké. Největší zatlačení jsou u výhybky č. 4 na pražci v přechodové zóně přímo u srdcovky (snímač S4), a to v extrému až 3,1 mm, což je již hodně. Na výhybce č. 3 došlo u většiny snímačů ke zhoršení o více jak 0,5 mm. U výhybky č. 4 došlo ke zhoršení na většině snímačů až o 0,8 mm. Je tedy vidět, že u výhybky č. 4 se situace zhoršuje rychleji.

V další části bych se ráda věnovala pohybovému chování pražců po délce srdcovky a pražce v přechodové zóně. Z maximálních zatlačení pražců v jednotlivých místech jsem sestavila tzv. průhybové křivky. Toto vyhodnocení se již dříve ukázalo jako výhodné, protože lze velmi názorně srovnat zatlačení na obou sledovaných konstrukcích. Pro každou měřicí kampaň byly sestaveny průhybové křivky pražců po délce srdcovky a průhybové křivky pražce pod srdcovkou. Nakonec jsem provedla srovnání všech tří měřicích kampaní pro průhybové křivky podél srdcovky výhybky pro vybrané vlaky.

9.1.1. Pohybové chování pražce v přechodové zóně

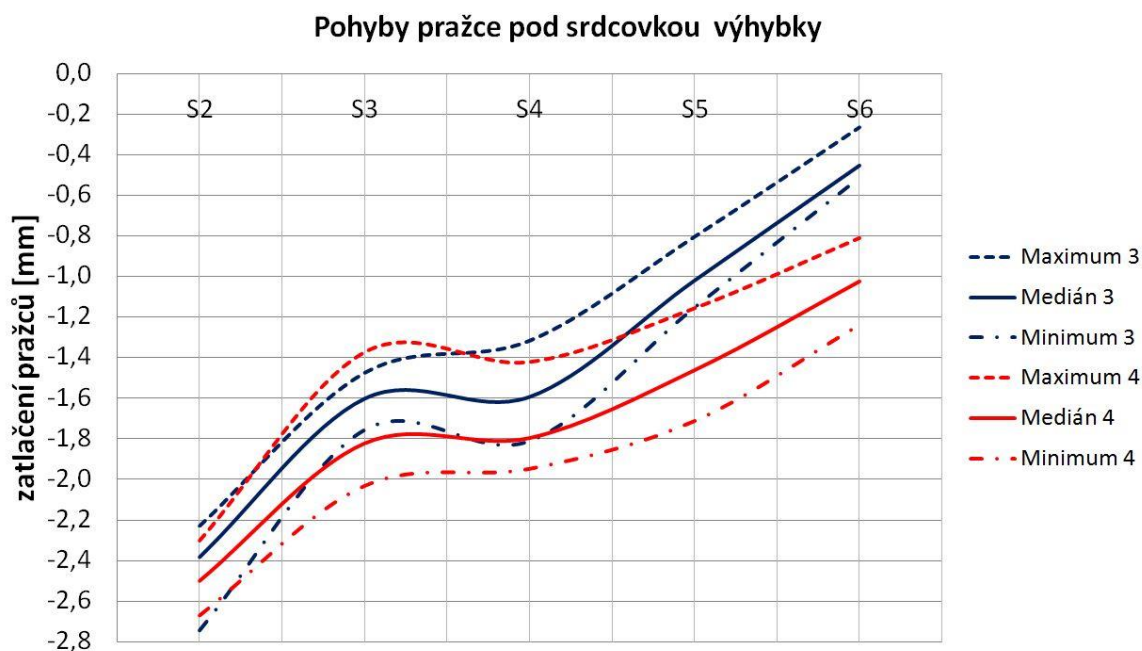
V první kampani měření jsem využila již zpracovaných křivek z této práce [5]. Na Obr. 9.1.1.1 jsou průhybové křivky pro pražec v přechodové zóně. Zelenou barvou jsou křivky na výhybce č. 3 a červenou barvou jsou křivky na výhybce č. 4. Čárkovaně je křivka minimálních zatlačení a plnou čarou je křivka maximálních zatlačení. Jedná se tedy o obalové křivky maximálních zatlačení. Na průhybových křivkách pražce v přechodové zóně je vidět rozdílné chování obou konstrukcí. Zatímco na výhybce č. 3 je průhybová křivka zcela plynulá s maximem na snímači S4, což je dle očekávání, neboť v místě snímače S4 je díky dynamickému rázu pražec nejvíce namáhán. U výhybky č. 4 je tomu zcela jinak. Největší zatlačení jsou za hlavou pražce v přímé větvi výhybky, poté křivka stoupá k ose přímé koleje (snímač S2) a od něj opět klesá do snímače S4 u srdcovky, což připisují dynamickému zatížení na srdcovce výhybky. Od srdcovky pak křivka plynule stoupá. Dochází tak částečně k naklonění pražce, to je patrné i z větších zdvihů pražce na snímači S6, které je možné vidět na grafech v přílohách k měření. Toto chování pražce je možné pravděpodobně připsat tomu, že zatímco výhybka č. 4 byla dva měsíce před měřením podbita, tak výhybka č. 3 podbita nebyla. Podbití výhybky č. 4 s jistou mírou pravděpodobnosti změnilo zatlačení pražců, a tedy nelze říci, zda by bylo chování pražců stejné i bez podbití.



Obr. 9.1.1.1 Srovnání průhybových křivek pražce v přechodové zóně – první měřicí kampaň [5]

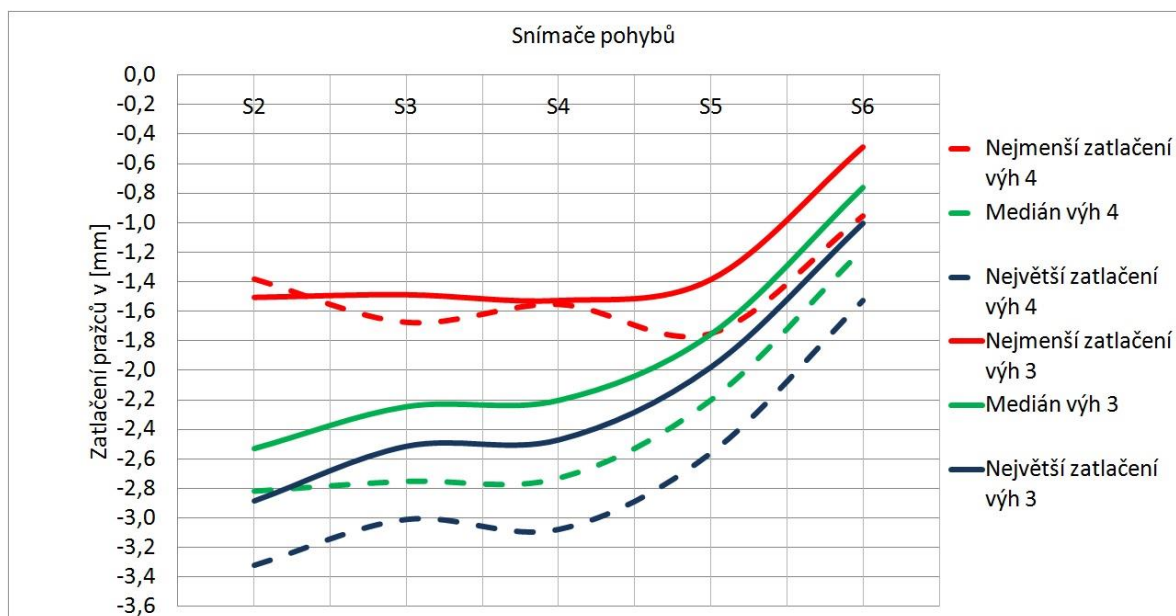
Pro druhou měřicí kampaň jsem sestrojila průhybové křivky pro pražec v přechodové zóně (Obr. 9.1.1.2). Předpokládá se, a v předchozích měřeních v několika

lokalitách se potvrdilo, že stejně jako u pohybů pražců podél srdcovky výhybky, tak i zde vznikne průhybová křivka podobná prostě uloženému nosníku. Přičemž největší zatlačení pražce jsou předpokládány přímo pod srdcovkou výhybky, kde dochází k největšímu namáhání pražce. Naopak v méně pojížděném odbočném směru dochází k malým zatlačením a někdy až ke zdvihům pražce. Ovšem už v první měřicí kampani se ukázalo, že tomu tak být nemusí. Na *Obr. 9.1.1.2* jsou průhybové křivky pražce pod srdcovkou na výhybce č. 3 a 4 pro druhou měřicí kampaň. Modré křivky jsou pro výhybku č. 3 a červené jsou pro výhybku č. 4. Čárkovanou čarou jsou minimální zatlačení, plnou čarou je medián a čerchovanou čarou jsou křivky maximálních zatlačení. Pokud se podíváme na jejich průběh od snímače S6 směrem k snímači S2, tak až do snímače S3 se obě výhybky chovají předvídatelně a jak bylo očekáváno. To, co je naopak nečekané je chování pražce v místě snímače S2. Dochází zde k neočekávaně velkým zatlačením, a to co je ještě překvapivější, tak že je tomu u obou výhybek. Pražec není v tomto místě (za hlavou v přímém směru) tolik dynamicky namáhán a byly očekávány menší zatlačení. Pokud si představíme, že obě výhybky jsou součástí jednoduché kolejové spojky a vedle nich již nejsou žádné další koleje, pak zjistíme, že toto je místo na vnější straně obou kolejí. Je tedy možné, že dochází k mírnému pohybu náspu, který je na obou stranách vysoký a navíc zatížený protihlukovou stěnou a to může ovlivňovat i zatlačení pražce. Stejně tak může jít i o náhodu, i když ta pravděpodobnost je velmi malá.



Obr. 9.1.1.2 Srovnání průhybových křivek pražce v přechodové zóně – druhá měřicí kampaň

Rovněž pro třetí kampaň měření jsem zpracovala průhybové křivky pro pražce v přechodové zóně (Obr. 9.1.1.3). Čárkovanou čarou jsou křivky na výhybce č. 4 a plnou čarou jsou křivky na výhybce č. 3. Červenou čarou jsou minimální zatlačení, zelenou čarou je medián a modrou čarou jsou maximální zatlačení. Obě výhybky se chovají podobně a u obou konstrukcí lze říci, že se jedná o chování, které je poměrně překvapivé a které navazuje na předchozí kampaň měření. Největší zatlačení jsou u obou konstrukcí na snímači S2, který je umístěn na hlavě pražce pod srdcovkou v přímém směru. Výraznější rozdíl mezi snímačem S2 a S4 je u výhybky č. 3, což se projevuje v konstrukci celkovým naklopením pražce v přechodové zóně srdcovky při průjezdu soupravy. Tento jev jsem popisovala výše, kde jsem psala o větších zdvizích za hlavou pražce v odbočném směru výhybky (v místě snímače S6). Zdvihy u výhybky č. 3 jsou v tomto místě i více jak 1 mm. Je otázkou, zda je v pořádku pražcové podloží, či neklesají okraje násypu v místě výhybek, neboť k tomuto jevu dochází u obou konstrukcí, tedy na obou stranách násypu. Tento jev rozhodně není standartní a těžko ho lze připisovat dynamickému chování konstrukce pod zatížením. Oproti předchozí kampani měření se alespoň zpomalila dynamika tohoto jevu a již není natolik dominantní jako u druhé měřicí kampaně. Větší zatlačení vykazuje opět výhybka č. 4, a to až o 0,5 mm, což je již nezanedbatelný rozdíl. Celkově lze říci, že zatlačení na výhybce č. 3 jsou menší a lze zde tedy s velkou pravděpodobností sledovat pozitivní vliv nového uzlu upevnění.



Obr. 9.1.1.3 Srovnání průhybových křivek pražce v přechodové zóně – třetí měřicí kampaň

9.1.2. Pohybové chování pražců podél srdcovky výhybky

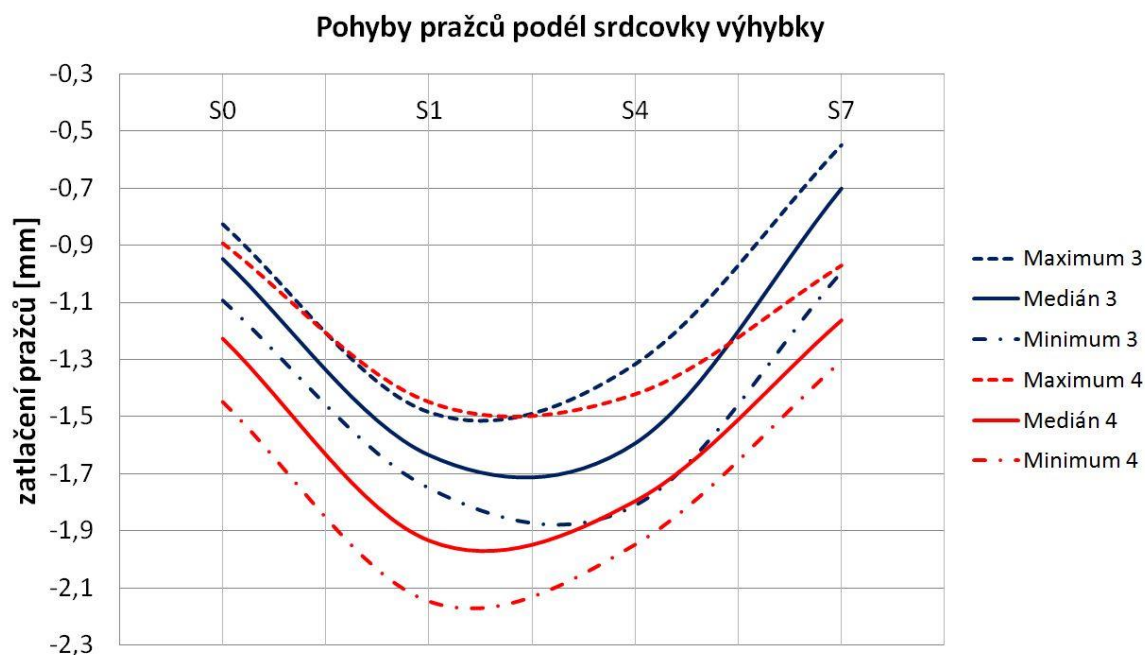
V první kampani měření jsem využila již zpracovaných křivek z této práce [5]. Na *Obr. 9.1.2.1* jsou průhybové křivky, které odpovídají maximálním zatlačením pražců po délce srdcovky výhybky. Zelenou barvou jsou křivky na výhybce č. 3 a červenou barvou jsou křivky na výhybce č. 4. Čárkovaně je křivka minimálních zatlačením a plnou čarou je křivka maximálních zatlačením. Jedná se tedy o obalové křivky maximálních zatlačením. Jak je z křivek vidět, tak obě výhybky vykreslují téměř dokonalou průhybovou křivku, podobnou průhybu prostě uloženého nosníku. Maxima a minima jsou velmi podobná. Rozdíl je však v tom, že zatímco na výhybce č. 3 je maximum na snímači S4, tak na výhybce č. 4 je maximum na snímači S1. Maximální zatlačením se u obou výhybek pohybuje do 2,3 mm. Z *Obr. 9.1.2.1* je také vidět, že u výhybky č. 4 je menší rozdíl mezi křivkou minim a maxim.



Obr. 9.1.2.1 Srovnání průhybových křivek pražců podél srdcovky výhybky – první měřicí kampaň [5]

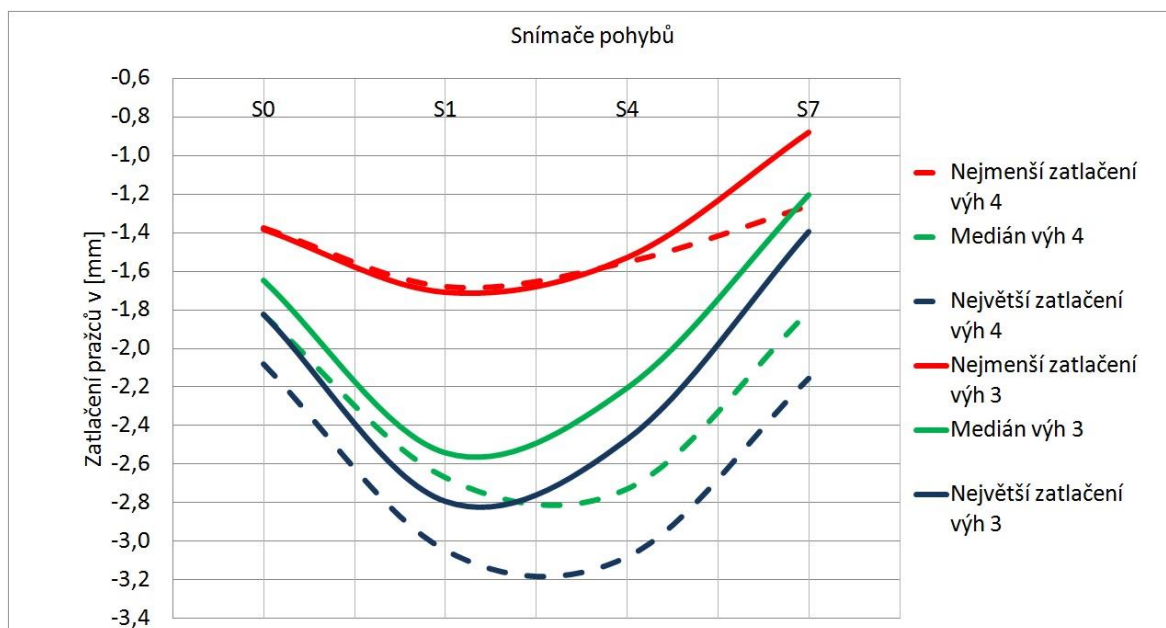
Křivky maximálních zatlačením pro druhou kampaň měření jsou na *Obr. 9.1.2.2*. Modré křivky jsou pro výhybku č. 3 a červené jsou pro výhybku č. 4. Čárkovanou čarou jsou minimální zatlačením, plnou čarou je medián a čerchovanou čarou jsou křivky maximálních zatlačením. Chování pražců podél srdcovky výhybky je u obou konstrukcí velmi podobné. Větší zatlačením vykazuje výhybka č. 4. Maximální zatlačením je u obou konstrukcí na snímačích S1 a S4. U výhybky č. 4 je to spíše na snímači č. S1 a u výhybky č. 3 spíše u snímače S4. Vzhledem k tomu, že k přechodu kola ze srdcovky výhybky na křídlovou kolejnici dochází právě někde mezi snímači S1 a S4 a jsou zde tedy největší

dynamické účinky, šlo tento mechanismus předvídat. Oproti předchozímu měření jsou křivky trochu plošší a zatlačení pražců je o něco menší, lze konstatovat, že se situace zlepšila. Možná je to tím, že se již šterkové lože konsolidovalo.



Obr. 9.1.2.2 Srovnání průhybových křivek pražců podél srdcovky výhybky – druhá měřicí kampaň

I pro třetí kampaň měření jsem zpracovala průhybové křivky pro pražce podél srdcovky výhybky, *Obr. 9.1.2.3*. Čárkovanou čarou jsou křivky na výhybce č. 4 a plnou čarou jsou křivky na výhybce č. 3. Z *Obr. 9.1.2.3* je vidět, že zatlačení podél srdcovky výhybky jsou větší na výhybce č. 4, rozdíl se blíží hodnotě 0,4 mm. Průběh křivek je na výhybce č. 3 a 4 opět podobný. Nejmenší zatlačení jsou na snímačích S2 a S7, které jsou od místa přechodu kola z hrotu srdcovky na křídlovou kolejnici nejdále. Maxima jsou u výhybky č. 3 blíže snímači číslo S1 a u výhybky č. 4 blíže snímači S4. Na obou konstrukcích křivky připomínají ohybovou křivku prostě uloženého nosníku. Oproti předchozímu měření došlo k výraznému navýšení maximálních zatlačení.

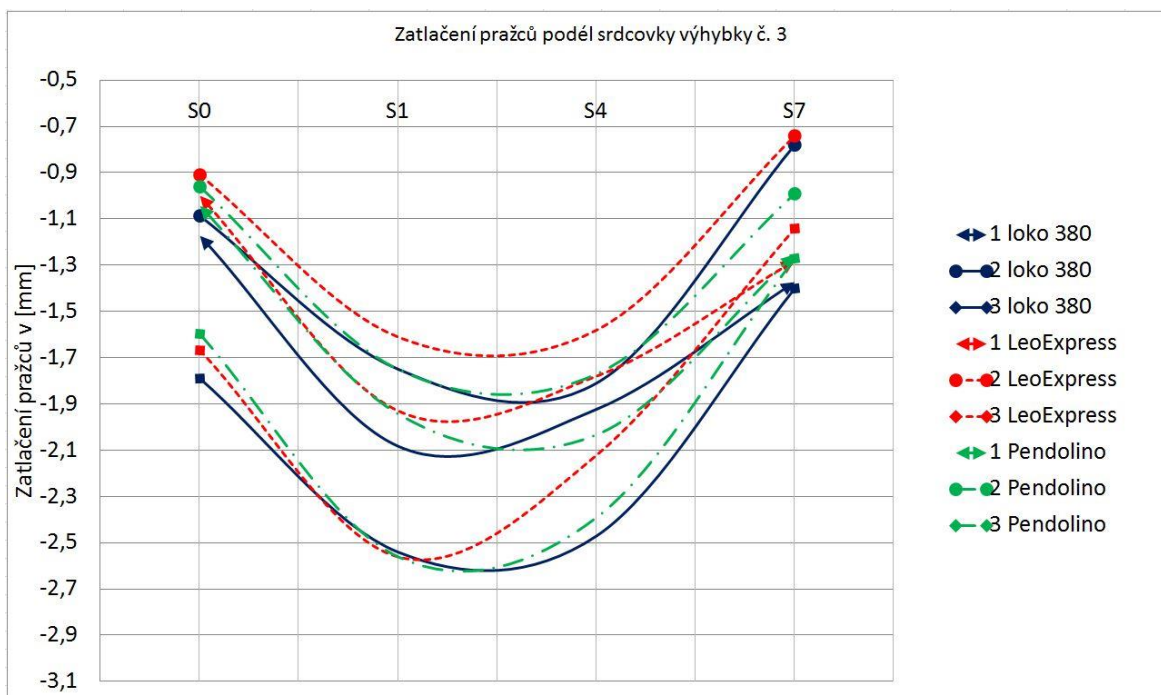


Obr. 9.1.2.3 Srovnání průhybových křivek pražců podél srdcovky výhybky – třetí měřicí kampaň

Protože pohybové chování pražců podél srdcovky výhybky má zásadní vliv na velikost impaktního zatížení na srdcovce výhybky, rozhodla jsem se ještě pro podrobnější porovnání všech tří kampaní měření. Na níže uvedeném Obr. 9.1.2.4 a Obr. 9.1.2.5 je srovnání jednotlivých kampaní na porovnatelných soupravách. Do porovnání jsem zařadila lokomotivy řady 380 a ucelené soupravy Pendolino a LEO Express. Na Obr. 9.1.2.4 a Obr. 9.1.2.5 jsou průhybové křivky odpovídající lokomotivě řady 380 zobrazeny plnou modrou čarou, křivky odpovídající jednotce LEO Express jsou zobrazeny červenou čárkovanou čarou a křivky odpovídající jednotce Pendolino jsou zelenou čerchovanou čarou. Křivky od prvního měření jsou na koncích označeny šipkou, křivky od druhého měření jsou na koncích označeny tečkou a křivky od třetího měření jsou označeny kosočtvercem. Nejprve se budu věnovat porovnání všech tří kampaní měření na výhybce č. 3 (Obr. 9.1.2.4).

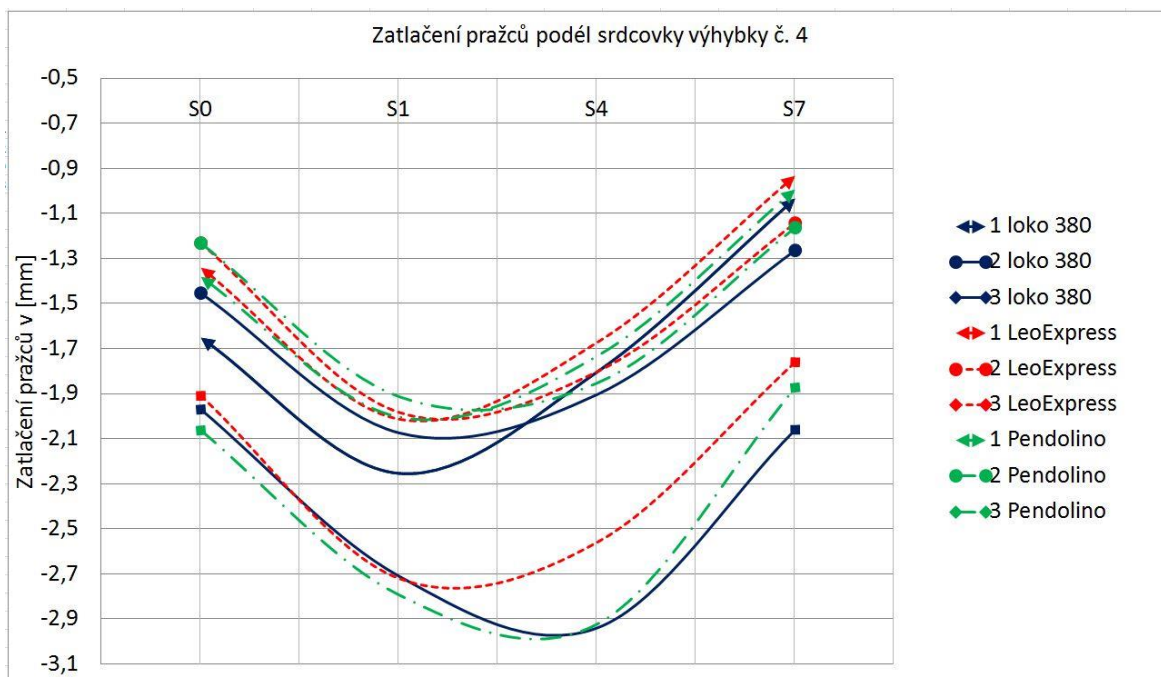
Z Obr. 9.1.2.4 je patrné, že zatímco mezi první a druhou měřicí kampaní došlo k mírnému zlepšení stavu, tak u třetí kampaně je vidět výrazné zhoršení z hlediska zatlačení pražců. U klíčových snímačů S1 a S4 se jedná o zhoršení řádově o 0,7 mm. Zlepšení mezi první a druhou kampaní měření mohlo být způsobeno konsolidací stěrku, a také větší tuhostí železničního spodku u podzimního měření. Maximální zatlačení jsou u třetí kampaně měření na snímači S1, kde mají všechny tři porovnávané soupravy téměř shodné hodnoty. Zde je vidět, že zatlačení nejsou v tomto místě zřejmě závislá na zatížení na nápravu. U snímače S4 je vidět rozdíl mezi lehkou soupravou LEO Express

a Pendolinem a lokomotivou řady 380. V tomto místě zřejmě lehčí soupravy nezatlačí konstrukci až na šterkovou lavičku. Všeobecně se ukazuje, že nezáleží jen na hmotnosti na nápravu, ale taky na rychlosti přejezdu přes konstrukci. Jednotka Pendolino jezdí přes výhybky v tomto místě o $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ rychleji než další dvě srovnávané soupravy. Maximální hodnoty zatlačení jsou u třetí kampaně měření okolo 2,5 mm a křivky mají očekávaný průběh.



Obr. 9.1.2.4 Srovnání průhybových křivek pražců podél srdcovky výhybky č. 3, všechny tři měřící kampaně

Na Obr. 9.1.2.5 je vidět srovnání průhybových křivek podél srdcovky výhybky na výhybce č. 4. Na první pohled je patrné, že zatímco u výhybky č. 3 byla maxima u snímače S1, tak u výhybky č. 4 došlo k přesunu maximálních hodnot na snímač S4. Také rozdíly mezi křivkami jsou u výhybky č. 4 menší, kromě třetího měření a snímače S4. Oproti prvním dvěma měřením došlo na výhybce č. 4 nejen ke změně místa maximálních zatlačení, ale také k výraznému celkovému zhoršení situace. Maximální zatlačení na snímači S4 jsou u třetí kampaně měření okolo 2,9 mm, což je oproti předchozí měřící kampani zhoršení o více než 1 mm. Opět jako u výhybky č. 3 jsou nejmenší rozdíly u třetí kampaně měření na snímači S1 a největší rozdíly na snímači S4.



Obr. 9.1.2.5 Srovnání průhybových křivek pražců podél srdcovky výhybky č. 4, všechny tři měřící kampaně

Celkově lze říci, že obě výhybky se stále chovají velmi podobně z hlediska pohybového chování konstrukce. Je však třeba také říci, že na výhybce č. 4 jsou zatlačení větší a také se rychleji zvětšují, než je tomu na výhybce č. 3. Tento trend je třeba i nadále sledovat. Zdá se, že nový uzel upevnění má pozitivní vliv na zpomalení degradace šterkového lože.

9.2. Vyhodnocení zrychlení vibrací na konstrukci výhybek

Vyhodnocení zrychlení vibrací jsem rozdělila do tří částí. Vyhodnocení v časové oblasti, vyhodnocení ve frekvenční oblasti a vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti. Ve všech oblastech jsem provedla srovnání výhybek č. 3 a 4. Pro srovnání v časové oblasti jsem vybrala z měřených vlaků porovnatelné soupravy. Pro podrobnější frekvenční analýzu jsem vybrala z měřených vlaků dvě srovnatelné soupravy (LEO Express a Pendolino) a lokomotivu řady 380, protože ty projížděly přes obě výhybky stejnou rychlostí a zároveň využily maximální traťové rychlosti. Ostatní vlaky projížděly pomaleji a pro porovnání dynamických účinků jsou zajímavější především maximální dynamické účinky, které vyvolávají nejrychlejší vlaky. Soustředila jsme se na vyhodnocení všech tří měřících kampaní, ale také na srovnání výsledků mezi jednotlivými kampaněmi.

9.2.1. Vyhodnocení v časové oblasti

V časové oblasti jsem si nejprve ke všem snímačům zobrazila jejich časový průběh, což je vidět na vybraných vlcích v přílohové části této práce. Jde o přílohu, kde je zobrazen časový průběh zrychlení kmitání a jemu odpovídající frekvenční spektrum vypočtené pomocí rychlé Fourierovy transformace (Fast Fourier Transform – FFT) vedle sebe. Obrázky jsou uspořádány tak, že vlevo je vždy graf zrychlení vibrací a vpravo je odpovídající FFT. Grafy jsou uspořádány do dvou skupin. První je roznos vibrací pražcem v přechodové zóně srdcovky a druhou je přechod vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. Tento postup jsem opakovala pro všechny tři měřicí kampaně. Z časového průběhu zrychlení kmitání jsem odečetla maximální hodnoty, minimální hodnoty a hodnoty RMS a zobrazila je do tabulek. Hodnotu RMS jsem spočítala jako plochu pod křivkou klouzavé RMS. Pro porovnání bylo důležité vybrat stejné soupravy a lokomotivy na obou výhybkách, které navíc projížděly přes výhybky stejnou, nebo velmi blízkou rychlostí.

V první kampani měření jsem využila již vyhodnocených dat z této práce [5]. Druhou a třetí měřicí kampaň jsem poté vyhodnocovala tak, abych byla schopná alespoň částečně mezi sebou jednotlivé kampaně porovnat. Mezi první a druhou měřicí kampaní došlo ke změně skladby vlaků, což porovnání poněkud zkomplikovalo. Byly nasazeny například vlaky RailJet a nové lokomotivy Siemens. V *Tab. 9.2.1.1* jsou hodnoty maximálních zrychlení kmitání na porovnatelných vlcích a lokomotivách, v *Tab. 9.2.1.2* jsou hodnoty minimálních zrychlení kmitání na stejných soupravách. Zrychlení vibrací budu popisovat tak, že začnu co nejbližší k jejich vzniku, tedy na křídlové kolejnici (signály A4Z, A5X a A6Y), poté budu pokračovat na pražec a budu sledovat roznos pražcem (signály A3Z, A2Z, A7Z, A1Z a A8Z) a nakonec budu sledovat přenos do šterkového lože (signál A0Z).

Souprava	Výhybka	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m/s ²]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	47	30	63	92	341	72	158	102	181	130
Leo Express	4	43	49	55	319	382	71	149	82	207	130
loko 362	3	29	78	72	80	476	142	163	133	257	91
loko 362	4	87	80	107	263	323	82	206	241	320	92
loko 380	3	42	120	132	170	441	122	183	196	321	131
loko 380	4	76	91	93	186	511	131	207	131	407	129
Pendolino	3	46	81	85	147	508	104	218	202	317	148
Pendolino	4	125	77	72	534	367	82	178	187	286	144
loko 150	3	25	46	66	74	315	80	152	101	245	80
loko 150	4	44	52	94	109	353	63	155	134	307	80

Tab. 9.2.1.1 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací – první kampaň měření [5]

Souprava	Výhybka	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m/s ²]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	-60	-60	-68	-64	-363	-83	-177	-68	-69	130
Leo Express	4	-46	-81	-72	-82	-332	-89	-143	-72	-85	130
loko 362	3	-39	-108	-90	-115	-571	-122	-167	-98	-83	91
loko 362	4	-94	-88	-94	-133	-379	-68	-158	-135	-175	92
loko 380	3	-86	-271	-286	-276	-497	-120	-209	-186	-139	131
loko 380	4	-86	-91	-136	-134	-443	-118	-193	-108	-128	129
Pendolino	3	-117	-68	-121	-150	-342	-92	-208	-134	-125	148
Pendolino	4	-134	-94	-118	-176	-430	-147	-198	-135	-167	144
loko 150	3	-34	-43	-70	-71	-317	-90	-153	-84	-64	80
loko 150	4	-58	-60	-92	-84	-452	-63	-138	-84	-96	80

Tab. 9.2.1.2 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací – první kampaň měření [5]

Pokud se podíváme na Tab. 9.2.1.1 a Tab. 9.2.1.2, tak z hlediska špičkových hodnot na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) je situace u obou konstrukcí téměř stejná. V podélném směru (A5X) je to podobné, ale přece jen mírně vyšších hodnot dosahuje výhybka č. 3. V příčném směru (A6Y) jsou opět obě konstrukce porovnatelné. U obou konstrukcí jsou největší hodnoty zrychlení kmitání ve svislém směru (A4Z), v příčném (A6Y) a podélném směru (A5X) je dosahováno nižších špičkových hodnot. Lze tedy prohlásit, že z hlediska špičkových hodnot zrychlení vibrací jsou na křídlové kolejnici obě výhybky porovnatelné. Z hlediska roznosu pražcem se zaměřím nejprve na místo, kde působí impaktní zatížení a poté na ostatní místa. Na pražci u srdcovky (A3Z) především při pohledu na Tab. 9.2.1.1 jsou výrazně vyšší špičkové hodnoty na výhybce č. 4. Minima na pražci u srdcovky (A3Z) v Tab. 9.2.1.2 jsou již srovnatelná. Na dalších místech na pražci (A1Z, A2Z, A7Z) jsou hodnoty u obou konstrukcí porovnatelné. Za hlavou pražce v odbočném směru výhybky (A8Z) jsou hodnoty vyšší na výhybce č. 4. Tento fakt může být i způsoben i tím, že na výhybce č. 4 jsou v první měřicí kampani větší zdvihy pražce, právě za hlavou odbočné větve. Ve šterkovém loži (A0Z) dosahuje u většiny vlaků také vyšších hodnot výhybka č. 4. Celkově lze především na pražci u srdcovky (A3Z) je vidět pozitivní vliv pružnějšího uzlu upevnění výhybky č. 3, kdy lépe tlumí špičkové hodnoty zrychlení kmitání při přechodu z křídlové kolejnice do pražce a šterkového lože.

Nyní se budu věnovat porovnání obou konstrukcí v první kampani měření z hlediska ploch pod křivkou klouzavé RMS. Hodnota RMS je určitým ekvivalentem energetického působení na konstrukci, proto se jedná o velmi důležitou hodnotu, neboť je ukazatelem „škodlivosti“ signálu na konstrukci. V Tab. 9.2.1.3 jsou hodnoty klouzavé RMS pro obě konstrukce výhybek a první kampaň měření. Postup hodnocení bude stejný, jako u špičkových hodnot zrychlení kmitání, tedy od křídlové kolejnice, přes pražec až po šterkové lože.

Souprava	Výhybka	Plocha pod křivkou klouzavé RMS [m/s]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	5	16	29	31	123	26	51	33	31	130
Leo Express	4	6	21	25	34	93	18	36	28	36	130
loko 362	3	2	6	8	9	43	10	19	9	10	91
loko 362	4	3	8	8	14	39	8	17	10	13	92
loko 380	3	4	6	12	12	49	11	20	15	13	131
loko 380	4	3	6	12	13	43	11	21	14	16	129
Pendolino	3	17	54	66	74	217	45	91	77	90	148
Pendolino	4	24	94	98	116	308	171	185	103	100	144
loko 150	3	2	7	9	10	50	10	21	10	11	80
loko 150	4	2	6	9	11	41	9	20	11	12	80

Tab. 9.2.1.3 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS – první kampaň měření [5]

Z Tab. 9.2.1.3 je vidět, že největších dynamických účinků dosáhlo Pendolino na výhybce č. 4. Na křídlové kolejnici (A4Z, A5X, A6Y) jsou však i z hlediska hodnot RMS obě konstrukce srovnatelné, přestože vyšší hodnoty jsou až na Pendolino u výhybky č. 3. Na pražci u srdcovky (A3Z) až na účinky od vlaku Pendolino jsou obě konstrukce také porovnatelné, ale vyšších hodnot dosahuje přece jen výhybka č. 4. U ostatních snímačů na pražci (A1Z, A2Z, A7Z) jsou hodnoty RMS od obou konstrukcí zcela porovnatelné, mírně vyšších hodnot dosahuje výhybka č. 4. Na hlavě pražce v odbočném směru (A8Z) dosahuje mírně vyšších hodnot výhybka č. 4. Což opět může být způsobeno většími zdvihy pražce v tomto místě u výhybky č. 4 a první kampaň měření. V šterkovém loži (A0Z) také dosahuje mírně vyšších hodnot RMS výhybka č. 4, ovšem rozdíly jako na ostatních místech jsou minimální. Z hlediska hodnot pod křivkou klouzavé RMS se ukazuje, že zatímco na kolejnici dosahuje výhybka č. 3 většinou mírně vyšší hodnoty, tak na pražci a ve šterkovém loži už je to spíše naopak. I zde se projevuje pozitivní vliv pružnějšího uzlu upevnění, i když rozdíly nejsou nijak velké.

V druhé kampani měření jsem stejně jako v první kampani vybrala do vyhodnocení opět porovnatelné soupravy. V Tab. 9.2.1.4 jsou maximální hodnoty zrychlení kmitání a v Tab. 9.2.1.5 jsou hodnoty minimálních zrychlení kmitání pro obě porovnávané konstrukce výhybek. Tak jako u předchozí měřicí kampaň, se budu věnovat nejprve hodnotám na křídlové kolejnici a poté se přesunu na pražec a nakonec do šterkového lože. Je třeba podotknout, že se mezi první a druhou kampaní měření trochu změnila skladba vlaků projíždějících přes obě výhybky, proto jsou do porovnání zahrnuty i jiné soupravy.

Souprava	Výhybka	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m/s ²]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Pendolino	3	56	123	125	154	487	104	246	218	182	156
Pendolino	4	81	94	100	145	516	95	234	202	203	157
380	3	44	69	96	107	437	83	221	158	188	130
380	4	79	75	92	103	442	59	170	124	302	132
Leo Express	3	57	57	58	92	384	62	360	111	128	128
Leo Express	4	59	45	53	71	398	45	149	78	164	129
RegioJet 162	3	64	50	92	114	366	85	258	161	194	125
RegioJet 162	4	57	80	61	76	772	180	187	108	155	125
362	3	31	52	70	62	293	89	146	92	166	95-101
362	4	39	73	95	82	357	60	158	102	258	93
1216 RailJet	3	35	71	84	86	425	112	239	89	176	130
1216 RailJet	4	49	86	64	73	370	49	157	117	180	130

Tab. 9.2.1.4 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací – druhá kampaň měření

Souprava	Výhybka	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m/s ²]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Pendolino	3	-153	-100	-81	-115	-376	-148	-230	-151	-172	156
Pendolino	4	-130	-127	-123	-130	-475	-82	-224	-124	-193	157
380	3	-96	-75	-74	-103	-389	-79	-236	-117	-141	130
380	4	-77	-86	-104	-115	-557	-59	-200	-98	-127	132
Leo Express	3	-57	-69	-59	-68	-518	-123	-262	-80	-95	128
Leo Express	4	-49	-74	-85	-104	-433	-54	-136	-91	-92	129
RegioJet 162	3	-93	-69	-91	-123	-430	-84	-169	-149	-134	125
RegioJet 162	4	-65	-74	-100	-116	-722	-188	-178	-89	-124	125
362	3	-37	-62	-82	-69	-346	-80	-162	-79	-101	95-101
362	4	-51	-73	-86	-84	-333	-71	-157	-83	-86	93
1216 RailJet	3	-52	-77	-68	-65	-462	-103	-230	-84	-144	130
1216 RailJet	4	-72	-92	-104	-119	-325	-53	-176	-109	-138	130

Tab. 9.2.1.5 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací – první kampaň měření

Z Tab. 9.2.1.4 a Tab. 9.2.1.5 je vidět, že na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) dosahuje u většiny vlaků vyšší špičkové hodnoty výhybka č. 4, zatímco v podélném směru na křídlové kolejnici (A5X) a příčném směru na křídlové kolejnici (A6Y) jsou u většiny vlaků vyšší špičkové hodnoty na výhybce č. 3. Vyšší hodnoty ve svislém směru (A4Z) mohou souviset s celkově větším zatlačením pražců u srdcovky výhybky č. 4. Vyšší hodnoty v podélném směru (A5X) mohou souviset s větším ojetím na srdcovce výhybky č. 3, což bylo zjištěno měřením před druhou kampaní měření. Hodnoty v příčném směru (A6Y) zase mohou být indikátorem kvality geometrie koleje před výhybkou, protože mohou znamenat, že vlak vjíždí do výhybky více příčně rozkmitaný. Na pražci u srdcovky (A3Z) jsou špičkové hodnoty jen o málo vyšší u výhybky č. 3, rozdíly jsou malé, ale i tak je to spíše překvapující, očekával se opačný trend. Na ostatních místech na pražci (A1Z, A2Z, A7) jsou hodnoty u obou konstrukcí porovnatelné, na hlavě pražce v odbočném směru jsou vyšší hodnoty na výhybce č. 4. To může souviset s celkově většími pohyby pražce v tomto místě (A8Z). Ve šterkovém loži (A0Z) jsou obě konstrukce porovnatelné, vyšších hodnot u maxim (Tab. 9.2.1.4) dosahuje výhybka č. 4 a u minim (Tab. 9.2.1.5) naopak dosahuje vyšších hodnot výhybka č. 3. Z hlediska špičkových hodnot, pružnější

uzel upevnění nevypadá lépe, což je překvapující, ale na špičkové hodnoty má vliv i kvalita jízdni plochy kol a proto se budeme dále věnovat i vyhodnocení plochy pod křivkou klouzavého RMS. V *Tab. 9.2.1.6* jsou hodnoty plochy pod křivkou klouzavé RMS pro druhou kampaň měření.

Souprava	Výhybka	Plocha pod křivkou klouzavé RMS [m/s]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Pendolino	3	22	62	67	74	264	54	120	76	90	156
Pendolino	4	21	71	69	76	229	43	91	85	97	157
380	3	8	5	8	8	45	8	19	10	10	130
380	4	4	6	9	10	34	8	15	12	16	132
Leo Express	3	7	19	24	27	121	22	51	26	28	128
Leo Express	4	7	23	26	30	89	17	31	29	36	129
RegioJet 162	3	4	8	10	11	50	10	22	13	13	125
RegioJet 162	4	3	7	8	9	36	9	14	10	13	125
362	3	2	5	6	6	31	7	15	7	7	95-101
362	4	2	7	7	8	29	7	12	9	12	93
1216 RailJet	3	3	5	6	6	36	7	16	6	9	130
1216 RailJet	4	3	5	6	7	22	4	9	7	10	130

Tab. 9.2.1.6 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS – druhá kampaň měření

Na křídlové kolejnici dosahuje vyšších hodnot výhybka č. 3, a to jak ve svislém (A4Z), tak v podélném (A5X) i příčném směru (A6Y). Na pražci u srdcovky (A3Z) však u většiny vlaků dosahuje vyšších hodnot již výhybka č. 4. Zde se ukazuje vlastnost pružnějšího uzlu upevnění, kdy sice dovolí více kmitat kolejnici, ale snižuje dynamickou energii, která přechází do pražce. I na všech ostatních místech na pražci (A1Z, A2Z, A7Z, A8Z) jsou mírně vyšší hodnoty u většiny vlaků na výhybce č. 4. Ve šterkovém loži (A0Z) jsou hodnoty u obou výhybek zcela porovnatelné. Především na přechodu dynamické energie z koleje do pražce se ukazuje pozitivní vliv pružnějšího uzlu upevnění u výhybky č. 3.

I pro třetí kampaň měření jsem vybrala porovnatelné soupravy a sestavila je do tabulek maximálních zrychlení kmitání (*Tab. 9.2.1.7*) a minimálních zrychlení kmitání (*Tab. 9.2.1.8*).

Souprava	Výhybka	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	38	80	80	78	427	109	155	107	122	130
Leo Express	4	53	85	85	115	463	119	165	127	133	128
Pendolino	3	71	142	142	133	504	122	226	260	204	151
Pendolino	4	119	157	157	237	542	221	314	301	346	160
380	3	63	116	116	99	487	168	263	163	229	130
380	4	102	112	112	122	438	183	199	289	243	131
1216 RailJet	3	57	116	116	124	604	189	339	191	168	130
1216 RailJet	4	63	85	85	133	408	131	163	192	190	132
386 N	3	40	90	90	109	539	116	451	126	167	97
386 N	4	92	134	134	197	524	201	251	206	300	100

Tab. 9.2.1.7 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací – třetí kampaň měření

Souprava	Výhybka	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	-39	-96	-73	-71	-370	-101	-197	-73	-87	130
Leo Express	4	-88	-93	-102	-124	-364	-108	-176	-106	-129	128
Pendolino	3	-79	-142	-127	-153	-555	-155	-268	-180	-200	151
Pendolino	4	-235	-148	-186	-197	-513	-198	-259	-201	-288	160
380	3	-70	-112	-106	-108	-649	-148	-236	-116	-136	130
380	4	-152	-124	-121	-155	-446	-155	-243	-187	-274	131
1216 RailJet	3	-86	-197	-150	-140	-675	-202	-315	-128	-160	130
1216 RailJet	4	-89	-125	-134	-139	-362	-112	-172	-120	-177	132
386 N	3	-69	-142	-87	-97	-693	-118	-397	-101	-127	97
386 N	4	-148	-122	-158	-188	-688	-143	-233	-174	-203	100

Tab. 9.2.1.8 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací – třetí kampaň měření

Vyšších špičkových hodnot zrychlení kmitání na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) dosahuje u třetí kampaně měření na většině vlaků výhybka č. 3. Na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) jsou obě konstrukce porovnatelné. Výhybka č. 3 sice vykazuje větší ojetí srdcovky, což by se v podélném směru mělo projevit, ale u výhybky č. 4 jsou zase větší zatlačení pražců, proto zřejmě tyto efekty vyrovnaly. V příčném směru na křídlové kolejnici jsou vyšší hodnoty u většiny vlaků na výhybce č. 3. To může být způsobeno i tím, že vlaky do výhybky č. 3 najíždějí z oblouku ve stanici a ještě přejíždí z mostu na vysoký násyp. Všechny tyto faktory mohou způsobovat, že vlaky vjíždí do výhybky č. 3 více příčně rozkmitané, což se může projevit i na špičkových hodnotách zrychlení kmitání v příčném směru na křídlové kolejnici (A6Y). Tato skutečnost byla pozorována už i u předchozí kampaně měření. Na pražci u srdcovky (A3Z) je již rozdíl mezi konstrukcemi podstatný, téměř u všech vlaků a výhybka č. 4 dosahuje vyšších špičkových hodnot zrychlení kmitání. Zde se pravděpodobně projevuje výrazně zhoršený stav zatlačení pražců v třetí kampani měření na výhybce č. 4. Pouze na hlavě pražce v přímé větvi výhybky (A1Z) jsou teď obě konstrukce porovnatelné, což zřejmě souvisí i s nezvykle velkými zatlačeními pražce v tomto místě. Na ostatních místech na pražci (A2Z, A7Z, A8Z) jsou vyšší špičkové hodnoty u většiny vlaků na výhybce č. 4. Zde se zřejmě projevuje celkově horší stav podepření pražců ve výhybce č. 4. Je i vidět pozitivní vliv pružnějšího uzlu upevnění u výhybky č. 3. Ve šterkovém loži (A0Z) jsou také vyšší hodnoty na výhybce č. 3. Výhybka č. 3 je na tom tedy lépe, co se týká špičkových hodnot zrychlení kmitání především na pražci a ve šterkovém loži.

V další Tab. 9.2.1.9 jsou hodnoty plochy pod křivkou klouzavé RMS pro třetí kampaň měření.

Souprava	Výhybka	Hodnoty plochy pod křivkou klouavé RMS [$m \cdot s^{-1}$]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	5	27	30	32	152	39	68	32	33	130
Leo Express	4	6	29	33	37	105	32	45	33	36	128
Pendolino	3	18	78	78	85	312	76	141	92	97	151
Pendolino	4	24	86	95	104	239	77	101	103	104	160
380	3	3	9	13	11	64	17	26	14	12	130
380	4	4	9	13	14	40	16	18	16	18	131
1216 RailJet	3	17	72	83	89	349	95	174	90	104	130
1216 RailJet	4	19	83	95	105	236	72	105	99	109	132
386 N	3	3	5	7	9	31	7	16	9	11	97
386 N	4	3	7	10	11	26	7	12	11	14	100

Tab. 9.2.1.9 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS – třetí kampaň měření

Z Tab. 9.2.1.9 je zcela zřejmé, že na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) jsou vyšší hodnoty RMS u výhybky č. 3. Tento fakt připisují jednak většímu ojetí srdcovky výhybky č. 3 a jednak je to zřejmě i vlivem pružnějšího uzlu upevnění. Na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) jsou obě konstrukce porovnatelné, mírně vyšší hodnoty dosahuje výhybka č. 3. V příčném směru na křídlové kolejnici (A6Y) lze opět pozorovat vyšší hodnoty RMS na výhybce č. 3. Pokračuje tedy trend pozorovaný i u předchozích kampaní měření. Na pražci u srdcovky (A3Z) jsou na všech vlacích vyšší hodnoty na výhybce č. 4, což připisují většímu zatlačení pražců u výhybky č. 4 a zároveň tužšímu uzlu upevnění u této výhybky. I u všech dalších míst na pražci (A1Z, A2Z, A7Z a A8Z) a ve šterkovém loži (A0Z) jsou hodnoty vyšší na výhybce č. 4. Zde je vidět, že u výhybky č. 3 se do pražce a šterkového lože přenese méně dynamické energie, a to lze přičíst i pozitivnímu vlivu uzlu upevnění.

V poslední části vyhodnocení v časové rovině se budu soustředit na porovnání tří dosud změřených kampaní. Porovnání provedu na dvou srovnatelných soupravách (LEO Express a Pendolino) a lokomotivě řady 380, protože ty projížděly přes obě výhybky stejnou rychlostí a zároveň využily maximální traťové rychlosti. Ostatní vlaky projížděly pomaleji a pro porovnání dynamických účinků jsou zajímavější především maximální dynamické účinky, které vyvolávají nejrychlejší vlaky. Využila jsem plochu pod křivkou klouzavé RMS, neboť se jedná o nejdůležitější hodnotu z časového vyhodnocení. Nejprve se budu věnovat přechodu zrychlení vibrací z křídlové kolejnice (A4Z) do pražce (A3Z) a do šterkového lože (A33Z), viz Tab. 9.2.1.10. Tentokrát jsem využila pro porovnání signál z měřicího kamene (A33Z). Červené hodnoty znázorňují procentuální útlum dynamické energie při přechodu ze srdcovky do pražce a šterkového lože. Hodnoty ploch pod křivkou klouzavého RMS na křídlové kolejnici (snímač A4Z) jsou brány jako 100 % a je počítáno, kolik procent z této hodnoty se přenese na pražec (A3Z) a do šterkového lože (A33Z). Když se podíváme na hodnoty v Tab. 9.2.1.10, tak je zřejmé, že hodnoty na

křídlové kolejnici (A4Z) se od předchozích dvou měření stále zvyšují. Tento fakt je zřejmě způsoben rozpadem geometrie přechodu vlivem větších zatlačení pražců pod srdcovkou. Na pražci (A3Z) došlo taktéž k navýšení hodnot u třetího měření, nicméně zvýšení není výrazné ani na jedné z výhybek. Co je však zajímavé, že na výhybce č. 4 došlo k mírnému navýšení procentuálního přenosu dynamické energie z kolejnice do pražce, zatímco na výhybce č. 3 nikoli. Ve šterkovém loži jsou obě konstrukce porovnatelné, ale přece jen více dynamické energie se do šterkového lože přeneslo u výhybky č. 4. Pokud vezmeme v úvahu všechna dosud provedená měření, tak zatímco u výhybky č. 3 se do pražce přeneslo 24 % dynamické energie, tak u výhybky č. 4 je to téměř 35 %. Do šterkového lože se přeneslo u výhybky č. 3 téměř 5 % energie a u výhybky č. 4 je to 6,6 %, tedy přece jen o něco více. Zde je vidět pozitivní přínos uzlu upevnění výhybky č. 3.

Plocha pod křivkou klouzavé RMS [m/s]							
měření	souprava	A4Z na výhybce č.		A3Z na výhybce č.		A33Z na výhybce č.	
		3	4	3	4	3	4
1	loko 380	49	43	12	13	3	3
				24	31	6	6
2	loko 380	45	34	8	10	3	3
				18	29	7	10
3	loko 380	64	40	11	14	4	3
				17	35	6	8
1	LEO Express	123	93	31	34	4	4
				26	36	3	5
2	LEO Express	121	89	27	30	5	6
				22	33	4	6
3	LEO Express	152	105	32	37	4	4
				21	35	3	4
1	Pendolino	217	308	74	116	11	13
				34	38	5	4
2	Pendolino	264	229	74	76	15	14
				28	33	6	6
3	Pendolino	312	239	85	104	16	23
				27	44	5	10
Průměr		149,7	131,1	39,4	48,1	7,1	8,1
				24,1	34,8	4,9	6,6

Tab. 9.2.1.10 Plocha pod křivkou RMS a procentuální přenos dynamické energie ze srdcovky do pražce a šterkového lože – srovnání tří kampaní měření

V Tab. 9.2.1.11 jsou hodnoty klouzavé RMS pro pražec v přechodové zóně srdcovky. Jak je z Tab. 9.2.1.11 patrné, ve třetím měření došlo opět k mírnému navýšení hodnot RMS téměř na všech místech, především u výhybky č. 4. To je i ukazatel zhoršení podepření pražce. Vyšší hodnoty za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky (A8Z) a poté

na pražci v ose odbočné větve výhybky (A7Z), mohou být způsobeny tím, že tato část není při průjezdu přímou větví výhybky zatížena a může volně kmitat. Největší rozdíl je mezi konstrukcemi v místě největších dynamických účinků na pražci přímo u srdcovky (A3Z). I zde je vidět pozitivní vliv uzlu upevnění u výhybky č. 3. Všechny hodnoty na pražcích jsou vyšší na výhybce č. 4.

Plocha pod křivkou klouzavé RMS [m/s]											
měření	souprava	A1Z na výhybce č.		A2Z na výhybce č.		A3Z na výhybce č.		A7Z na výhybce č.		A8Z na výhybce č.	
		3	4	3	4	3	4	3	4	3	4
1	loko 380	6	6	12	12	12	13	15	14	13	16
2	loko 380	5	6	8	9	8	10	10	12	10	16
3	loko 380	9	9	13	13	11	14	14	16	12	18
1	LEO Express	16	21	29	25	31	34	33	28	31	36
2	LEO Express	19	23	24	26	27	30	26	29	28	36
3	LEO Express	27	29	30	33	32	37	32	33	33	36
1	Pendolino	54	94	66	98	74	116	77	103	90	100
2	Pendolino	62	71	67	69	74	76	76	85	90	97
3	Pendolino	78	86	78	95	85	104	92	103	97	104
Průměr		30,7	38,3	36,3	42,2	39,3	48,2	41,7	47,0	44,9	51,0

Tab. 9.2.1.11 Plocha pod křivkou RMS – roznos dynamické energie pražcem – srovnání tří kampaní měření

Z porovnání zrychlení vibrací v časové oblasti obou konstrukcí a všech tří kampaní měření je zřejmé, že vlivem pružnějšího uzlu upevnění sice více kmitá srdcovka, ale zase se mnohem méně dynamické energie přenesou do pražce a šterkového lože. Tento efekt může mít i vliv na lepší podepření pražců ve výhybce č. 3. Lze tedy pozorovat pozitivní vliv uzlu upevnění i z tohoto vyhodnocení.

9.2.2. Vyhodnocení ve frekvenční oblasti

Vzhledem k tomu, že všechny měření jsou součástí dlouhodobého sledování obou konstrukcí, rozhodla jsem se i v této části navázat na tuto práci [5]. Nejprve se tedy budu věnovat analýze přehledových grafů ze všech tří kampaní měření. První kampaň byla vyhodnocena v rámci této práce [5], zde jsem výsledky přebrala, další dvě měřicí kampaně jsem vyhodnocovala já a provedla jsem srovnání všech tří měřicích kampaní. Po vyhodnocení přehledových grafů a prvním náhledu na frekvenční chování obou konstrukcí se zaměřím na podrobnější analýzu pomocí Welchovy metody.

Pro první náhled jsem tedy zvolila přehledové grafy, které jsou ze všech tří kampaní měření součástí přílohové části této práce. Opět jsem vybrala jen reprezentativní vlakové soupravy, aby přílohová část nebyla příliš rozsáhlá. Obrázky v přílohové části jsou uspořádány tak, že vlevo je časový průběh zrychlení kmitání a vpravo je z časového průběhu vypočítané frekvenční spektrum pomocí FFT. Z těchto přehledných grafů lze pozorovat klíčové frekvenční shluky. Opět budu postupovat stejně jako u vyhodnocení v časové oblasti, tedy od křídlové kolejnice přes pražec až do šterkového lože. Nejprve popíši první měřicí kampaň a poté se budu věnovat druhé a třetí měřicí kampani a porovnáám je mezi sebou.

Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) jsou nejvýraznější frekvence u výhybky č. 3 okolo 40 Hz až 50 Hz, poté mezi 100 Hz – 150 Hz, 200 Hz – 300 Hz, 400 – 500 Hz a okolo 600 Hz, v druhé měřicí kampani se klíčové shluky okolo 40 Hz u některých vlaků posouvají k frekvenci 50 Hz, to může souviset s větší tuhostí železničního spodku během tohoto podzimního měření. Celkově byly i zatlačení pražců u tohoto měření menší. U třetí měřicí kampaně lze pozorovat opět návrat klíčových shluků od 50 Hz zpět na 40 Hz, u třetí měřicí kampaně jsou zatlačení pražců největší, takže i celkově se tuhost uložení snížila, což se zřejmě projevilo i zde. U výhybky č. 4 jsou na křídlové kolejnici ve svislém směru nejvýraznější frekvence okolo 50 Hz a poté mezi 150 Hz – 400 Hz, u druhé měřicí kampaně se opět posouvají klíčové frekvenční složky k vyšším frekvencím a jsou okolo 50 – 80 Hz, 150 - 200 Hz a 300 – 400 Hz, ve třetí měřicí kampani poté opět klesají zpět k 50 Hz, poté do 100 Hz a dále 150 Hz až 300 Hz.

Na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) u výhybky č. 3 jsou klíčové frekvenční shluky v oblastech frekvencí 50 Hz u rychlejších vlaků a poté v oblasti 150 Hz až 300 Hz a pak v oblasti vyšších frekvencí okolo 600 Hz a 700 Hz, frekvenční vrcholy jsou ale většinou nevýrazné, v druhé a třetí kampani měření nelze pozorovat výraznější změny. U výhybky č. 4 na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) jsou klíčové frekvenční shluky v oblastech frekvencí 60 Hz u rychlejších vlaků a poté v oblasti 250 Hz až 300 Hz a pak v oblasti vyšších frekvencí okolo 600 Hz. U druhé měřicí kampaně se u některých vlaků objevují frekvenční vrcholy okolo 90 Hz, u třetí se situace spíše podobá první měřicí kampani.

U výhybky č. 3 na křídlové kolejnici v příčném směru (A6Y) jsou klíčové frekvence okolo 80 Hz, u druhé měřicí kampaně jsou klíčové frekvenční složky okolo 75 Hz – 90 Hz a poté okolo 550 Hz a 700 Hz, při třetí měřicí kampani jsou klíčové frekvenční shluky mezi 80 Hz až 200 Hz, poté mezi 400 Hz až 600 Hz a mezi 1200 Hz až

1400 Hz. Zde dochází v rámci měřících kampaní spíše k přibývání frekvenčních vrcholů. U výhybky č. 4 jsou v příčném směru na křídlové kolejnici (A6Y) klíčové frekvence okolo 100 Hz, 200 Hz – 400 Hz a okolo 600 Hz, u druhé měřící kampaně jsou klíčové frekvenční složky okolo 150 – 200 Hz a poté okolo 200 - 550 Hz a v některých případech i okolo 40 Hz. Při třetí měřící kampani jsou klíčové frekvence okolo 100 Hz a 200 Hz a poté se objevují v intervalu mezi 400 Hz a 800 Hz. Oproti výhybce č. 3 jsou na výhybce č. 4 nižší frekvenční sluky posunuty výše.

Na pražci u srdcovky (A3Z) jsou u výhybky č. 3 klíčové frekvence okolo 40 Hz a poté okolo 80 Hz, v druhé kampani měření se dominantní frekvence posunuly až k 90 Hz, při třetí kampani se situace příliš nezměnila oproti první měřící kampani. U výhybky č. 4 jsou na pražci u srdcovky (A3Z) výrazné frekvence mezi 40 Hz až 50 Hz a poté okolo 90 Hz, u druhé měřící kampaně jsou opět dominantní frekvence mezi 30 Hz a 90 Hz. Třetí měřící kampaň má klíčové složky frekvencí mezi 40 Hz a 100 Hz. U ostatních čidel na pražci (A1Z, A2Z, A7Z a A8Z) je u obou konstrukcí situace podobná u všech kampaní měření, klíčové frekvence se objevují v rozsahu 30 Hz až 100 Hz. Klíčové frekvenční složky jsou přece jen v oblasti vyšších frekvencí u výhybky č. 4, stejně tak jsou o malinko nejvyšší u většiny vlaků při druhé měřící kampani, ale není tomu tak vždy.

Ve šterkovém loži (A0Z) u výhybky č. 3 jsou klíčové frekvenční složky okolo 30 Hz a také 100 Hz, u druhé kampaně měření se klíčové frekvenční složky objevují v rozmezí 20 Hz – 60 Hz a u některých vlaků i na vyšších frekvencích okolo 150 Hz. Třetí měřící kampaň posunula opět výskyt frekvenčních složek, tentokrát až ke 200 Hz. U výhybky č. 4 jsou ve šterkovém loži (A0Z) výrazné frekvenční složky okolo 40 Hz – 50 Hz a 80 Hz – 100 Hz, u druhé kampaně se rozmezí posunulo od 20 Hz do 100 Hz. Třetí měřící kampaň rozšířila výskyt frekvenčních složek do širokého pásma 20 Hz – 300 Hz. Zdá se tedy, že u obou konstrukcí postupně dochází k rozšiřování výskytu frekvenčních složek v širších frekvenčních intervalech. Vyšší frekvenční složky ve šterkovém loži jsou však spíše kmitáním ocelové tyče, která nemá nic společného s kmitáním šterku, jak dokázala práce [5].

Celkově je vidět, že klíčové frekvenční složky především do 400 Hz se s vyšší tuhostí posouvají k vyšším hodnotám, proto jsou častěji vyšší u výhybky č. 4. S vyšší rychlostí vlaků se také klíčové frekvenční složky posouvají směrem k vyšším frekvencím. Je vidět, že i v rámci druhé měřící kampaně došlo k posunutí frekvencí výše, a to u obou výhybek, což bude nejspíše vyšší tuhostí pražcového podloží u tohoto podzimního měření,

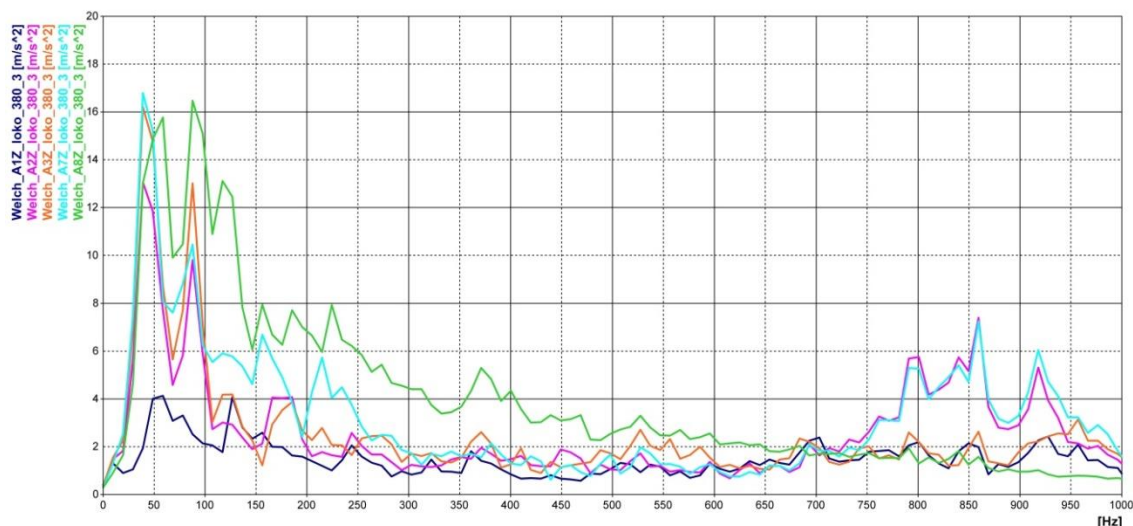
v druhé měřicí kampani byly naměřeny také nejmenší zatlačení pražců. Frekvence nad 150 Hz se do pražce a šterkového lože nepřenáší. Proto je i níže frekvenční pásmo rozděleno na oblast působení dynamické síly P1 (150 Hz až 600 Hz) a oblast působení dynamické síly P2 (0 Hz – 150 Hz). Je to založeno na teorii, že dynamická síla P1 se do pražce a šterkového lože nepřenáší.

9.2.3. Vyhodnocení ve frekvenční oblasti – Welchova metoda

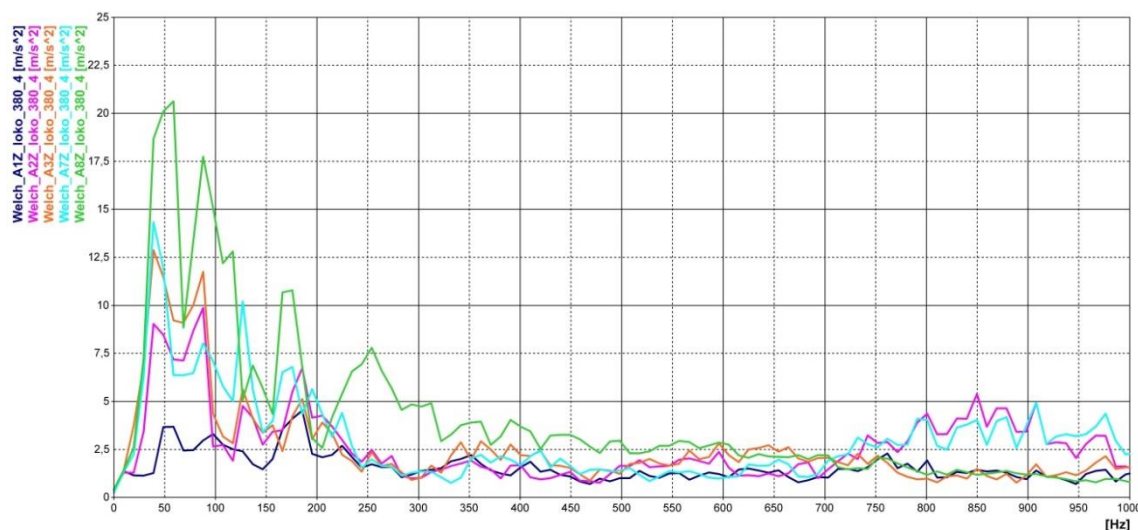
V této části se budu zabývat podrobnější analýzou všech tří měřicích kampaní. První byla opět vyhodnocena již v rámci této práce [5]. Zbylé dvě měřicí kampaně jsem vyhodnotila já a také jsem všechny tři kampaně srovnala. Pro podrobnější analýzu jsem vybrala ze skupiny změřených vlaků dvě srovnatelné soupravy (LEO Express a Pendolino) a lokomotivu řady 380, protože ty projížděly přes obě výhybky stejnou rychlostí a zároveň využily maximální traťové rychlosti. Ostatní vlaky projížděly pomaleji a mě zajímají především maximální dynamické účinky, které vyvolávají nejrychlejší vlaky. Pro prezentaci v této práci jsem se rozhodla použít časový výřez odpovídající průjezdu lokomotivy řady 380, protože vyvolal největší dynamické účinky. Nejprve se budu věnovat roznosu zrychlení kmitání pražcem a poté přechodu vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. Všechny grafy jsou ještě jednou obsaženy v přílohové části této práce, kde jsou zobrazeny na celou stranu.

Nejprve se budu zabývat první kampaní měření, na *Obr. 9.2.3.1* jsou spektra ze snímačů na pražci u výhybky č. 3 a na *Obr. 9.2.3.2* jsou spektra ze snímačů na pražci u výhybky č. 4. Na obou obrázcích jsou modrou barvou zobrazena spektra pro snímač A1Z (za hlavou pražce v přímé větvi výhybky), fialovou pro snímač A2Z (v ose přímé větve výhybky), oranžovou je snímač A3Z (u srdcovky), tyrkysovou je snímač A7Z (v ose odbočné větve) a zelenou je snímač A8Z (za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky). Na obou výhybkách mají průběhy spekter u snímačů ve středu pražce v přímé a odbočné větvi a u srdcovky (A2Z, A7Z a A3Z) prakticky stejné průběhy. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že dynamický ráz na srdcovce výhybky se pražcem přenáší až do osy kolejí. Ve spektrech z těchto snímačů (A2Z, A7Z a A3Z) jsou dvě významné frekvenční špičky, první je na 40 Hz a druhá na 90 Hz, přičemž o něco vyšší hodnoty se vyskytují na výhybce č. 3. Spektrum ze snímače za hlavou pražce v odbočné větvi (A8Z) je u obou výhybek rovněž podobné. Spektrum (A8Z) má první vrchol na 60 Hz a druhý na 90 Hz, vyšší hodnoty u tohoto snímače pravděpodobně souvisí s tím, že odbočná větev není při průjezdu lokomotivy přímou zatížena a pražec je nadzvedáván a může volně kmitat. Vyšších hodnot

dosahuje spektrum ze snímače A8Z na výhybce č. 4, což souvisí s většími pohyby pražce v tomto místě na výhybce č. 4 u první měřicí kampaně. Za hlavou pražce v přímé (A1Z) jsou spektra na obou výhybkách velmi podobná s vrcholem okolo 50 Hz. Celkově lze konstatovat, že šíření vibrací pražcem je u obou konstrukcí velmi podobné. Vyšší hodnoty zrychlení kmitání dosahuje výhybka č. 3 na klíčových frekvencích okolo 50 Hz a 90 Hz, které pravděpodobně odpovídají teoretické rázové síle P2 (jak je popsána v teoretické části práce) [5].



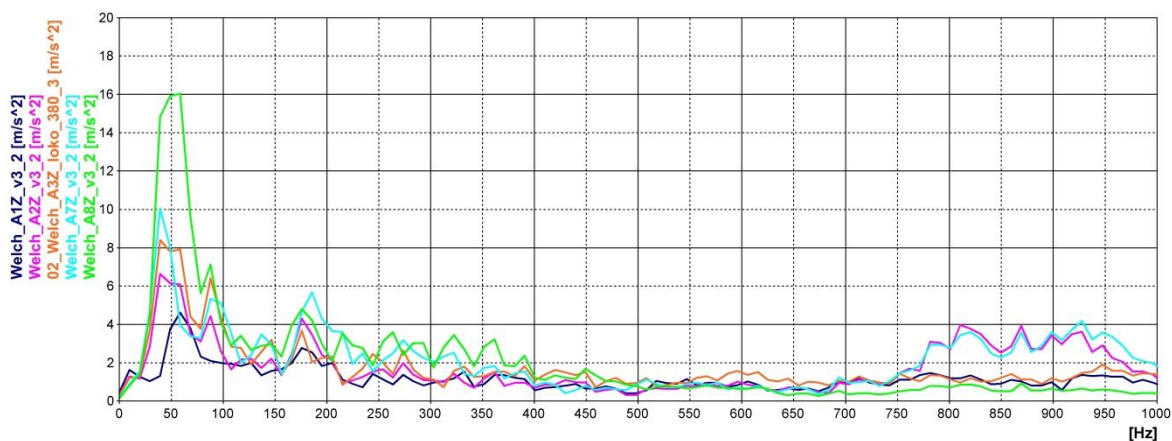
Obr. 9.2.3.1 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 – první kampaň měření [5]



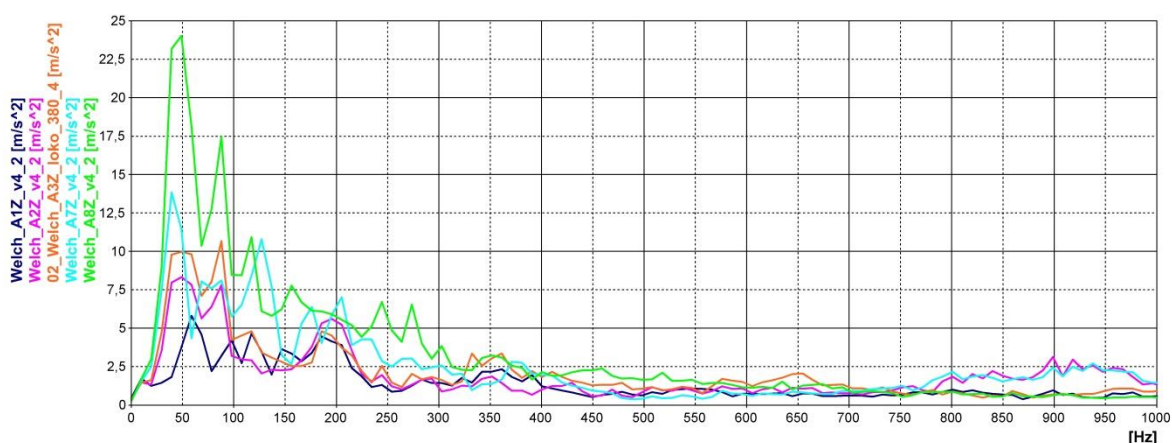
Obr. 9.2.3.2 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4 – první kampaň měření [5]

V druhé kampani měření jsem opět vybrala časový výřez odpovídající průjezdu lokomotivy řady 380. Na Obr. 9.2.3.3 jsou spektra ze snímačů na pražci u výhybky č. 3 a na Obr. 9.2.3.4 jsou spektra ze snímačů na pražci u výhybky č. 4. Barevné označení je

stejně, jako u první měřicí kampaně. Oproti první měřicí kampani došlo ke snížení zrychlení vibrací na obou klíčových frekvencích na pražci, a to na 40 Hz a 90 Hz. Toto snížení je patrné u obou výhybek. Větší snížení je vidět na frekvenci 90 Hz. Tato frekvence tedy pravděpodobně souvisí s pohyby pražce, které se u druhé kampaně měření rovněž snížily. Nejvyšších hodnot u obou konstrukcí dosahuje hlava pražce v odbočné větvi výhybky (A8Z), což je dáno tím, že může volně kmitat. Nejnižších hodnot dosahuje hlava pražce v přímé větvi výhybky (A1Z), a to u obou konstrukcí. Bude to dáno tím, že v tomto místě tolik nepůsobí dynamický ráz. Celkově nižší hodnoty na všech místech na pražci jsou u výhybky č. 3. Z hlediska dynamické síly P2 se zdá, že při druhé kampani měření došlo ke snížení namáhání u obou konstrukcí, což souvisí i s menšími zatlačeními u pražců.



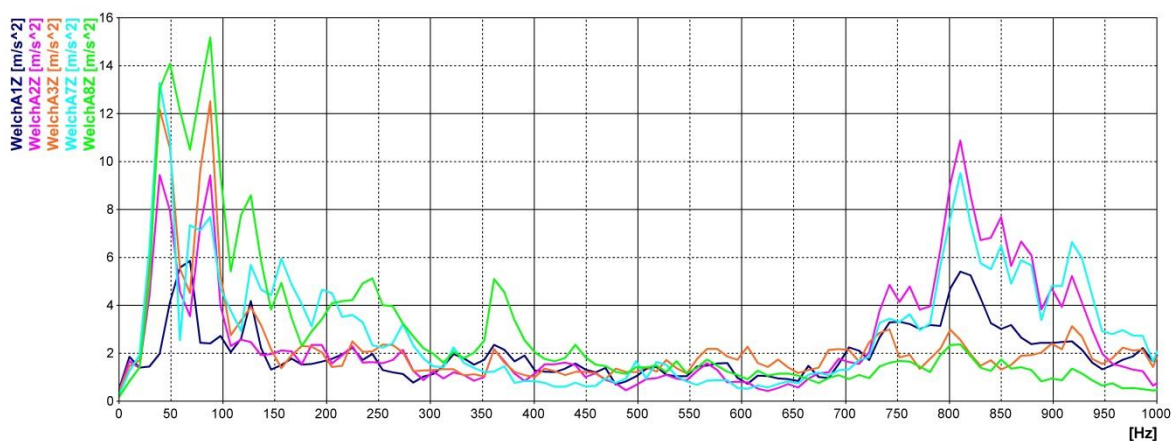
Obr. 9.2.3.3 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 – druhá kampaň měření



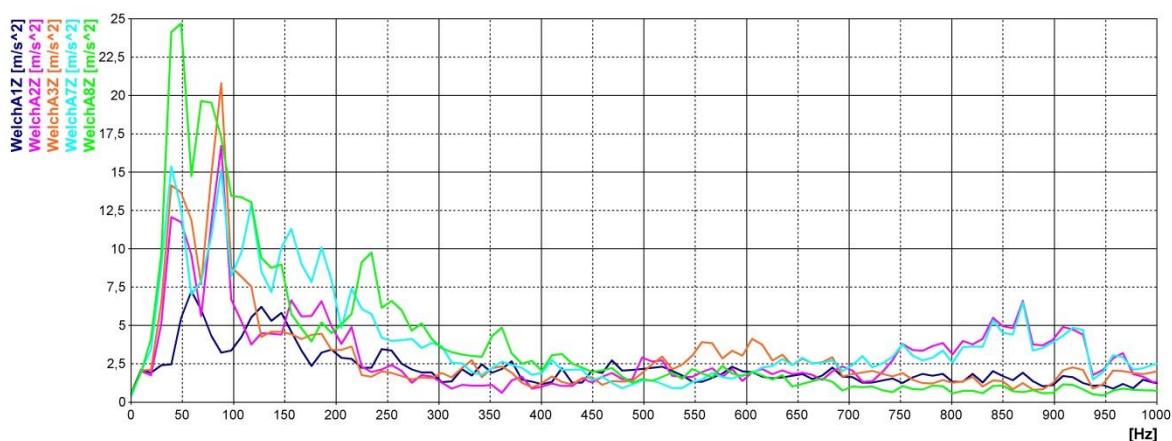
Obr. 9.2.3.4 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4 – druhá kampaň měření

Stejně tak pro třetí kampaň měření je na Obr. 9.2.3.5 a Obr. 9.2.3.6 frekvenční spektrum (vypočítané Welchovou metodou) odpovídající časovému výřezu lokomotivy

řady 380. Na *Obr. 9.2.3.5* jsou spektra ze snímačů na pražci u výhybky č. 3 a na *Obr. 9.2.3.6* jsou spektra ze snímačů na pražci u výhybky č. 4. Barevné označení je stejné jako u první a druhé měřicí kampaně. U třetí kampaně měření je patrné, že došlo k podstatnému zhoršení stavu oproti předcházející kampani, zejména u výhybky č. 4. Klíčové frekvence jsou u obou konstrukcí stejné, tedy 40 Hz a 90 Hz. I u výhybky č. 3 došlo ke zhoršení oproti předchozí měřicí kampani, především na frekvenci 90 Hz, ale zhoršení není tak markantní jako u výhybky č. 4. Velmi výrazně se u výhybky č. 4 zvětšily zatlačení pražce v místě snímače dráhy S4 (u srdcovky), a na to reaguje i snímač zrychlení na pražci (A3Z), kdy je vidět především na frekvenci 90 Hz téměř dvojnásobné zvětšení zrychlení kmitání oproti předcházející měřicí kampani. Je tedy zřejmé, že tato frekvence je spjata s pohyby pražce a bylo by možné toho do budoucna využít v diagnostice výhybek.



Obr. 9.2.3.5 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 – třetí kampaň měření



Obr. 9.2.3.6 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4 – třetí kampaň měření

Pro lepší srovnání všech tří kampaní měření z hlediska šíření dynamické energie (síly P2) pražcem jsem vybrala dvě srovnatelné soupravy (LEO Express a Pendolino)

a lokomotivu řady 380. Z první kampaně měření jsem vybrala všechny jednotky Pendolino, spočítala si k nim spektrum zrychlení kmitání pomocí Welchovy metody, poté jsem ke každému spočítala hodnotu plochy pod křivkou v rozmezí 0 – 150 Hz a z ní jsem udělala průměr. Takto mi vznikla jedna hodnota plochy pod křivkou pro daný signál. Takto jsem to udělala i pro všechny soupravy LEO Express a lokomotivy řady 380 i pro obě další kampaně měření. V *Tab. 9.2.3.1* jsou hodnoty vypočtené dle výše uvedeného postupu.

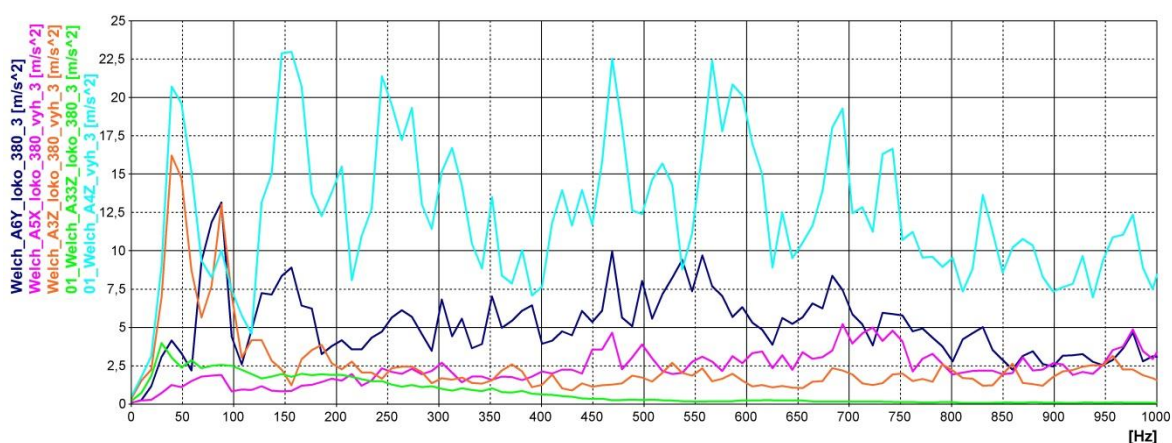
Plocha pod křivkou frekvenčních spekter Hz · m/s ²											
měření	souprava	A1Z na výhybce č.		A2Z na výhybce č.		A3Z na výhybce č.		A7Z na výhybce č.		A8Z na výhybce č.	
		3	4	3	4	3	4	3	4	3	4
		0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz
1	loko 380	380	346	799	753	988	986	1124	1001	1535	1666
2	loko 380	328	474	475	659	621	855	601	1063	938	1656
3	loko 380	441	669	662	1066	864	1311	915	1424	1375	2011
1	LEO Express	219	310	434	328	502	448	488	405	547	598
2	LEO Express	209	299	240	315	293	379	282	379	379	516
3	LEO Express	356	469	342	539	421	604	392	535	577	659
1	Pendolino	327	443	522	516	634	816	675	618	793	903
2	Pendolino	582	581	524	501	642	626	637	704	839	896
3	Pendolino	664	877	650	965	794	1175	778	1158	996	1250
Průměr		390	496	516	627	640	800	655	810	887	1128

Tab. 9.2.3.1 Plochy pod křivkou ve frekvenčních intervalech (na pražci), které ovlivňují dynamickou sílu P2 (0 – 150 Hz)

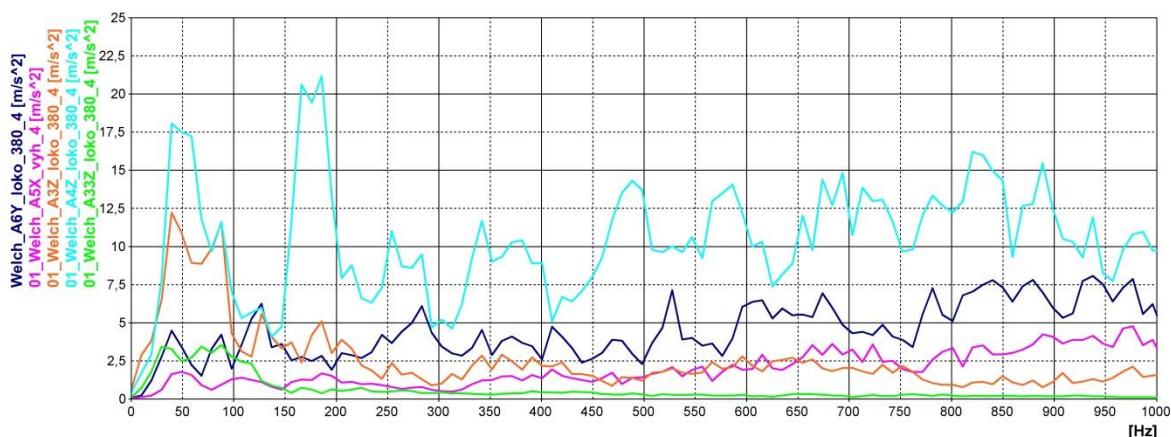
Z *Tab. 9.2.3.1* je zřejmé, že mezi druhou a třetí kampaní měření došlo ke zvýšení u všech hodnot. U výhybky č. 4 se hodnoty zvýšily výrazněji a hodnoty jsou nejvyšší za všechny tři kampaně měření. Celkově za všechny tři kampaně měření jsou hodnoty na výhybce č. 4 asi o 20 % větší. Největší hodnoty jsou za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky (A8Z), kde není během průjezdu přímou větví výhybky pražec zatížen a může volně kmitat, což je částečně možné i v ose odbočné větve výhybky (A7Z). U míst, která jsou při průjezdu přímým směrem výhybky zatížena (A1Z, A2Z a A3Z) jsou nejvyšší hodnoty jednoznačně na snímači u srdcovky výhybky (A3Z). Celkově na všech místech na pražci je na tom výhybka č. 4 hůře, což souvisí s většími zatlačeními pražců na této výhybce, a to může být vlivem tužšího uzlu upevnění, který hůře tlumí dynamickou sílu P2.

Nyní se budu věnovat přenosu zrychlení kmitání z křídlové kolejnice do šterkového lože. Začnu opět první měřicí kampaní. Na *Obr. 9.2.3.7* jsou spektra ze snímačů na výhybce č. 3 a na *Obr. 9.2.3.8* jsou spektra ze snímačů na výhybce č. 4. Modrou barvou jsou zobrazena spektra pro snímač A6Y (na křídlové kolejnici v příčném směru), fialovou pro snímač A5X (na křídlové kolejnici v podélném směru), oranžovou je snímač A3Z (u srdcovky na pražci), tyrkysovou je snímač A4Z (na křídlové kolejnici ve svislém směru) a zelenou je snímač A33Z (v měřicím kameni, který je zabudován přímo pod měřeným

pražcem v přechodové zóně). Tentokrát jsem se rozhodla využít signálu z měřicího kamene, který věrněji zachycuje působení dynamického namáhání na šterkové lože. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) je patrný první frekvenční vrchol na obou konstrukcích okolo 40 Hz a je vyšší na výhybce č. 3. Další frekvenční vrchol u spektra ze snímače A4Z je na frekvenci okolo 150 Hz na výhybce č. 3 a na frekvenci okolo 175 Hz na výhybce č. 4. Zrychlení na této frekvenci už se do pražce téměř nepřenáší, takže se pravděpodobně jedná již o frekvenční složku odpovídající síle P1 (jak je popsána v teoretické části práce). Posunutí k vyšší frekvenci na výhybce č. 4 je i v tomto případě pravděpodobně ovlivněno vyšší tuhostí u této výhybky (tužší uzel upevnění, menší zatlačení pražců v první měřicí kampani). Největší rozdíl mezi konstrukcemi je na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) v oblasti frekvencí mezi 200 Hz až 300 Hz a poté mezi 400 Hz až 600 Hz, což je v oblasti frekvencí, které dle teoretických předpokladů by mohly odpovídat dynamické síle P1. Zde má výhybka č. 3 přece jen vyšší zrychlení kmitání na těchto frekvencích. Tuto záležitost lze pravděpodobně připsat vyššímu ojetí srdcovky výhybky č. 3, což bylo zjištěno při měření společností DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. dne 21. 5. 2015 [5]. Podstatný rozdíl mezi výhybkami byl zjištěn také na snímáči v příčném směru na křídlové kolejnici (A6Y) [5]. Zde především na frekvenci okolo 90 Hz a 150 Hz jsou vyšší hodnoty na výhybce č. 3, což může značit nestabilitu chodu lokomotivy ve výhybce. V podélném směru na křídlové kolejnici (A5X) jsou obě konstrukce porovnatelné a bez výrazného frekvenčního vrcholu. Na pražci (A3Z) dosahuje u obou výrazných frekvenčních vrcholů 40 Hz a 90 Hz větší zrychlení kmitání výhybka č. 3. Ve šterkovém loži jsou obě konstrukce (A33Z) porovnatelné.

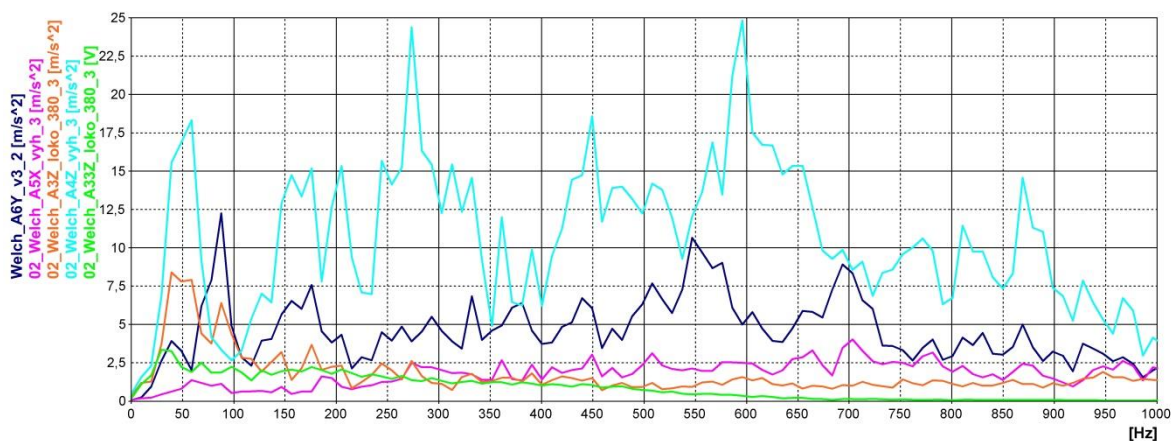


Obr. 9.2.3.7 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 – první kampaň měření

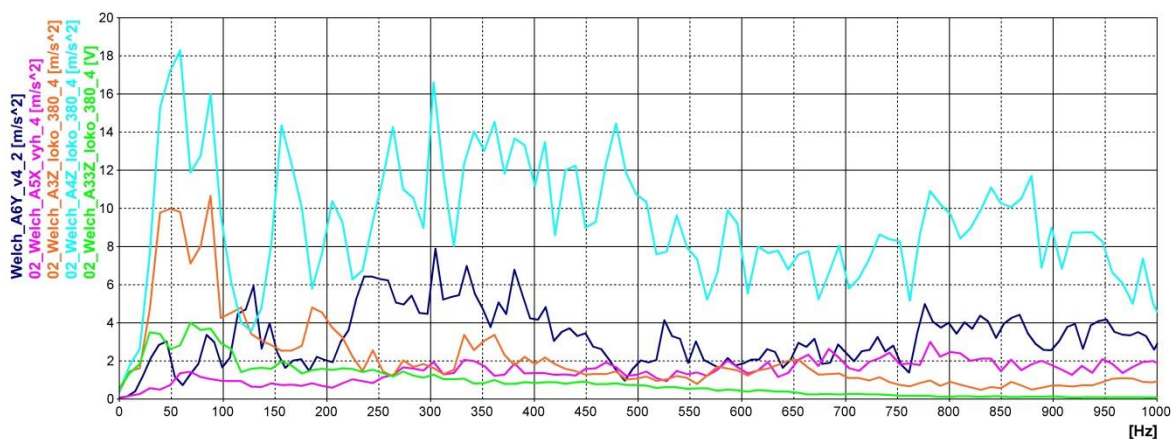


Obr. 9.2.3.8 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do štěrkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4 – první kampaň měření

V druhé kampani měření jsem opět vybrala časový výřez odpovídající průjezdu lokomotivy řady 380. Na *Obr. 9.2.3.9* jsou spektra ze snímačů na výhybce č. 3 a na *Obr. 9.2.3.10* jsou spektra ze snímačů na výhybce č. 4. Barevné označení je stejné jako u první měřicí kampaně. U druhé měřicí kampaně je vidět, že nižší frekvence na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) se posunuly u obou konstrukcí k mírně vyšším na 60 Hz, což může být dáno větší tuhostí pražcového podloží u druhého měření. Celkově se frekvenční spektrum proměnilo u obou výhybek. U výhybky č. 3 jsou největší frekvenční vrcholy okolo 275 Hz a poté okolo 600 Hz. Na výhybce č. 4 jsou to frekvence okolo 150 Hz a 300 Hz. Na křídlové kolejnici v příčném směru (A6Y) je oproti předchozímu měření u výhybky č. 3 velmi výrazná frekvence okolo 90 Hz, celkově to může být tím, že část dynamického rázu se přenáší do příčného směru. Na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) jsou obě konstrukce opět porovnatelné bez výraznějšího vrcholu. Na pražci (A3Z) došlo ke snížení zrychlení kmitání na klíčových frekvencích 40 Hz a 90 Hz u obou konstrukcí. Ve štěrkovém loži je nejvýraznější zejména frekvence okolo 30 Hz na obou konstrukcích. Tato frekvence je již poměrně blízko frekvencím, které používají podbíjecí agregáty, takže se jedná o nebezpečnou frekvenci.



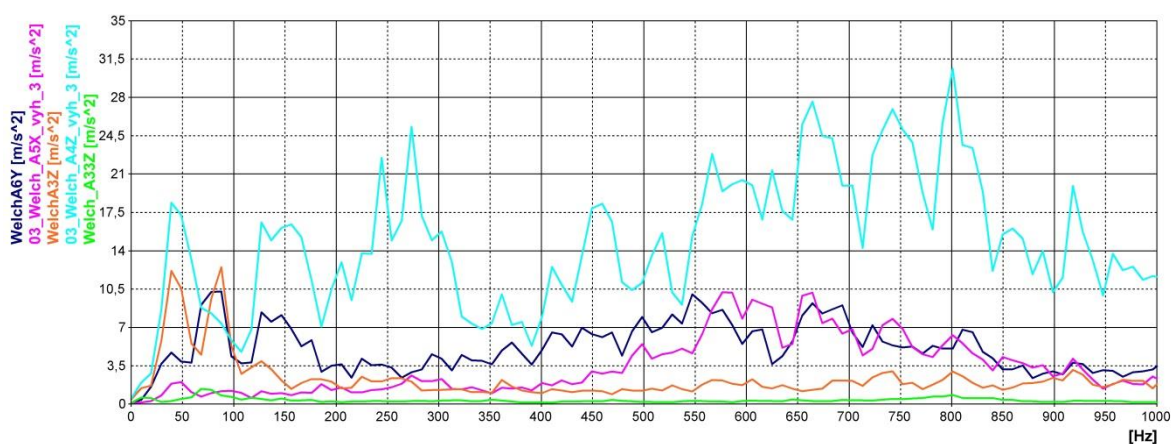
Obr. 9.2.3.9 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do štěrkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 – druhá kampaň měření



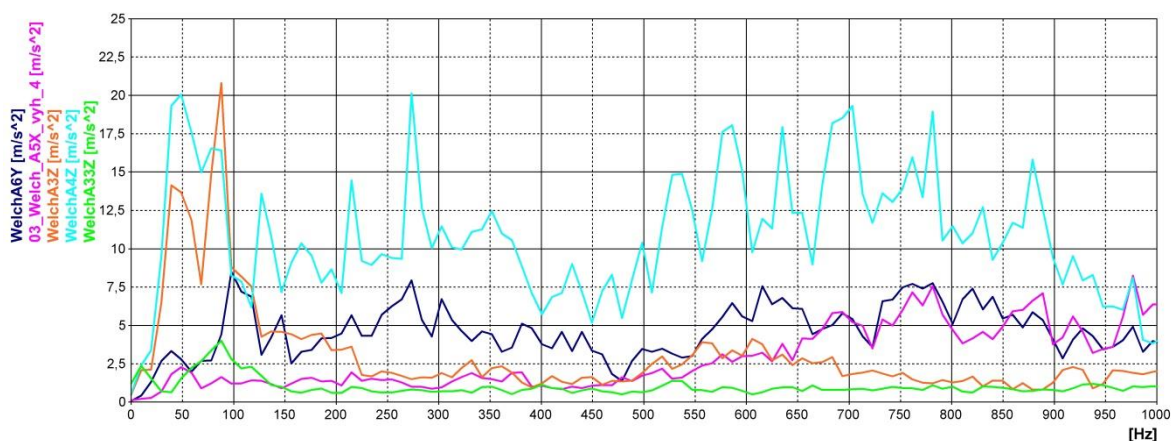
Obr. 9.2.3.10 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do štěrkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4 – druhá kampaň měření

Stejně tak pro třetí kampaň měření je na Obr. 9.2.3.11 a Obr. 9.2.3.12 frekvenční spektrum (vypočítané Welchovou metodou) odpovídající časovému výřezu lokomotivy řady 380. Na Obr. 9.2.3.11 jsou spektra ze snímačů na výhybce č. 3 a na Obr. 9.2.3.12 jsou spektra ze snímačů na výhybce č. 4. Barevné označení je stejné jako u první a druhé měřicí kampaně. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) se u výhybky č. 3 frekvenční vrcholy do 200 Hz posunuly zpět k nižším frekvencím, jako tomu bylo u prvního měření. Zde lze sledovat vliv tuhosti pražcového podloží, kdy u třetí měřicí kampaně jsou opět větší zatlačení pražců. V oblasti vyšších frekvencí je situace srovnatelná s předchozím měřením. U výhybky č. 4 na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) je tomu podobně s tím, že došlo k navýšení zrychlení kmitání na frekvenci okolo 50 Hz a snížení v oblasti okolo 150 Hz. Na křídlové kolejnici v příčném směru (A6Y) došlo ke snížení u výhybky č. 3 a u výhybky č. 4 naopak došlo k navýšení v oblasti frekvencí okolo 100 Hz. Zde se tedy situace na výhybce č. 4 zhoršila a větší část dynamického rázu se přenáší do příčného

směru. Na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) jsou obě konstrukce stále porovnatelné. Na pražci (A3Z) došlo k navýšení zejména na výhybce č. 4 na frekvenci 90 Hz, kde je dokonce vyšší hodnota zrychlení kmitání jako na křídlové kolejnici (A4Z). To může značit velmi špatný stav podepření pražce, což se projevuje u třetí kampaně měření rovněž na velkých zatlačeních pražců u výhybky č. 4. Ve šterkovém loži (A33Z) je na tom výhybka č. 4 také hůře, výrazný vrchol má v oblasti frekvencí 90 Hz. U třetí kampaně měření se tedy projevuje na pražci i ve šterkovém loži špatné podepření pražce u výhybky č. 4.



Obr. 9.2.3.11 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 – třetí kampaň měření



Obr. 9.2.3.12 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4 – třetí kampaň měření

Z frekvenčního spektra lze získat velmi důležité informace o dynamickém chování konstrukce. Abych byla schopná obě výhybky lépe porovnat a zároveň srovnat všechny tři měřící kampaně, převedla jsem si frekvenční spektra z křivek na čísla, jak jsem to již popsala výše. Frekvenční spektrum jsem rozdělila do dvou oblastí. První, kde se projevují účinky dynamické síly P2 (0 – 150 Hz) a druhé, kde se projevují účinky dynamické síly P1

(150 – 600 Hz). Jedná se sice o značné zjednodušení, ale z hlediska srovnání konstrukcí pomůže. Pro každé spektrum jsem v obou oblastech spočítala plochu pod křivkou a zanesla hodnoty do níže uvedené *Tab. 9.2.3.2*. Pro snímač A4Z na křídlové kolejnici jsem brala v úvahu obě oblasti, zatímco pro snímače na pražci (A1Z, A2Z, A3Z, A7Z, A8Z) a ve šterkovém loži A33Z jsem vzala v úvahu pouze oblast 0 – 150 Hz, neboť dynamická síla P1 se do pražce a šterkového lože téměř nepřenáší. Z *Tab. 9.2.3.2* je zřejmé, že hmotnost na nápravu má podstatný vliv na velikosti dynamických sil P1 a P2, nejvyšší hodnoty jsou u všech měření a na všech čidlech u lokomotivy řady 380, která má největší hmotnost na nápravu, zatímco LEO Express nejmenší, a proto i hodnoty v *Tab. 9.2.3.2* (i v předchozí *Tab. 9.2.3.1*) jsou u něj nejmenší.

Z *Tab. 9.2.3.2* je zřejmé, že mezi druhou a třetí kampaní měření došlo ke zvýšení u všech hodnot kromě šterkového lože. Fakt, že došlo ve šterkovém loži ke snížení hodnot je částečně vysvětlitelný tím, že pražec již zcela nedosedá na šterkovou lavičku, tento jev byl pozorován i u měření na jiných výhybkách [5]. Znamená to ovšem, že zatlačení pražců se blíží kritické hodnotě. U výhybky č. 4 se ve třetí kampani měření zvýšily výrazněji všechny hodnoty (kromě šterkového lože) a na pražci a křídlové kolejnici jsou hodnoty nejvyšší za všechny tři kampaně měření. U výhybky č. 3 došlo také k nárůstu hodnot, ale ne k tak výraznému. Na křídlové kolejnici (A4Z) se v oblasti frekvencí 0 – 150 Hz (dynamická síla P2) hodnoty postupně vyrovnaly na obou konstrukcích, což lze přičíst většímu zatlačení pražců u výhybky č. 4. Oblast frekvencí 150 – 600 Hz (dynamická síla P1) je stále vyšší na křídlové kolejnici výhybky č. 3, avšak rozdíl se zmenšuje. Vyšší hodnoty v oblasti frekvencí 150 – 600 Hz (dynamická síla P1) na výhybce č. 3 lze přičíst jednak většímu ojetí srdcovky a jednak pružnějšímu uzlu upevnění. Na pražci (A3Z) jsou již hodnoty vyšší na výhybce č. 4, příčinou může být větší zatlačení pražců u výhybky č. 4 a také pružnější uzel upevnění u výhybky č. 3. Ve šterkovém loži (A33Z) jsou obě konstrukce porovnatelné, mírně vyšších hodnot dosahuje výhybka č. 4.

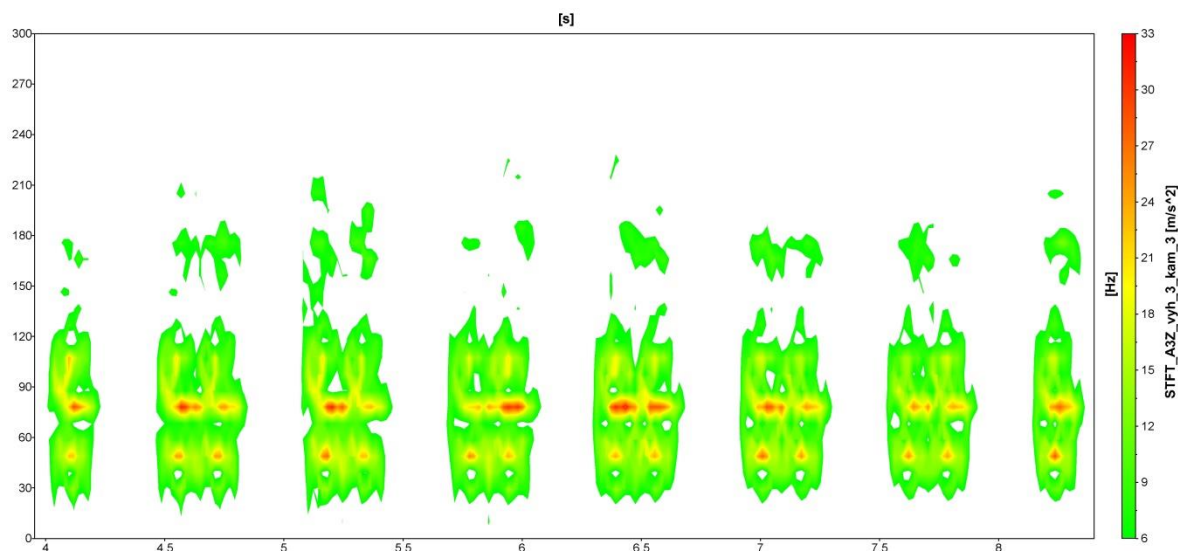
Plocha pod křivkou frekvenčních spekter $\text{Hz} \cdot \text{m/s}^2$									
měření	souprava	A4Z na výhybce č.				A3Z na výhybce č.		A33Z na výhybce č.	
		3		4		3	4	3	4
		0 - 150 Hz	150 - 600 Hz	0 - 150 Hz	150 - 600 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz	0 - 150 Hz
1	loko 380	1735	6413	1340	4555	988	986	328	344
2	loko 380	1206	5854	1438	4688	621	855	314	391
3	loko 380	1620	6428	1747	4635	864	1311	199	153
1	LEO Express	675	3461	500	2463	502	448	72	75
2	LEO Express	449	2402	489	1932	293	379	66	90
3	LEO Express	604	3463	616	2750	421	604	47	32
1	Pendolino	1018	3731	737	2718	634	816	96	135
2	Pendolino	1000	3615	853	3074	642	626	132	126
3	Pendolino	1085	3985	991	4008	794	1175	83	72
Průměr		1044	4372	968	3425	640	800	149	158

Tab. 9.2.3.2 Plochy pod křivkou ve frekvenčních intervalech, které ovlivňují dynamické síly $P1$ (0 – 150 Hz) a $P2$ (150 – 600 Hz)

Celkově lze i ve frekvenčních spektrech sledovat podobný jev, jako u pohybů pražců. U druhé měřicí kampaně došlo k částečnému zlepšení, ale u třetí kampaně se situace výrazně zhoršila, a to především u výhybky č. 4. Nový uzel upevnění lépe tlumí dynamické účinky zejména při přechodu do pražce. To se mohlo projevit i v lepším podepření pražců, a tím i v celkově menších dynamických účincích na výhybce č. 3.

9.2.4. Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti

Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti jsem do práce zařadila spíše jako ukázkou. Jedná se o jedinečný nástroj, pokud chceme zjistit, zda klíčové frekvenční složky skutečně odpovídají průjezdům jednotlivých kol. Také můžeme porovnat účinky jednotlivých kol vlaku v jednom grafu. Metoda je vhodná také na identifikaci například plochých kol, proto je velmi dobře využitelná pro budoucí diagnostiku výhybek. Pro ukázkou vyhodnocení jsem vybrala soupravu Pendolino, ta jela přes měřené výhybky nejvyšší rychlostí. Vybrala jsem signál z pražce v přechodové zóně u srdcovky (A3Z). V přílohové části této práce jsou zobrazeny hustotní spektrogramy metodou STFT, z každé kampaně měření jeden signál z pražce (A3Z) na soupravě Pendolino. Na Obr. 9.2.4.1 je ukáзка jednoho takového hustotního spektrogramu. Jedná se o soupravu Pendolino při třetí kampani měření. Svislá osa je frekvenční a vodorovná osa je časová. Vpravo je barevná stupnice, kdy měnící se barva zobrazuje velikost zrychlení. Jak je z Obr. 9.2.4.1 vidět, tak špičkové frekvence odpovídají časově průjezdu jednotlivých kol vlaku. Jsem schopna rozeznat jednotlivé nápravy. Také je vidět, že ne každá náprava má na výhybku stejný účinek.



Obr. 9.2.4.1 Hustotní spektrogram vypočítaný metodou STFT, výhybka č. 3, jednotka Pendolino, třetí kampaň měření

9.3. Celkové vyhodnocení srovnávaných konstrukcí

V celkovém hodnocení nejprve shrnu výsledky z měření pohybového chování obou konstrukcí a poté se budu věnovat shrnutí výsledků z měření zrychlení kmitání. Z hlediska pohybového chování lze obecně říci, že se obě konstrukce chovají velmi podobně. U obou výhybek se projevuje nezvyklé chování za hlavou pražce v přímé větvi výhybky. U výhybky č. 3 je tento jev provázen naklopením pražce a zdvihy za hlavou pražce v odbočném směru až 1 mm. Je otázkou, zda je v pořádku pražcové podloží, či neklesají okraje násypu v místě výhybek, neboť k tomuto jevu dochází u obou konstrukcí, tedy na obou stranách násypu. Tento jev rozhodně není standartní a těžko ho lze připisovat dynamickému chování konstrukce pod zatížením. Na výhybce č. 4 jsou zatlačení celkově větší a také se rychleji zvětšují, než je tomu na výhybce č. 3. Tento trend je třeba i nadále sledovat. Zdá se, že nový uzel upevnění má pozitivní vliv na zpomalení degradace šterkového lože.

Z hlediska dynamického chování pod zatížením kolejovými vozidly je na tom výhybka č. 3 lépe a rozdíl se zvětšuje. Nový uzel upevnění lépe tlumí špičkové hodnoty zrychlení kmitání. Na výhybce č. 3 jsou sice celkově větší účinky na kolejnici, což je dáno i pružnějším uzlem upevněním, ale na pražec a do šterkového lože se přeneso mnohem méně dynamické energie. Z frekvenčního vyhodnocení se ukázalo, že především frekvence okolo 90 Hz může být indikátorem kvality podepření pražce. Z frekvenčního spektra byla vybrána frekvenční pásma odpovídající dynamickým silám P1 a P2. Zatímco pásmo

frekvencí odpovídající působení dynamické síly P1 je větší na výhybce č. 3 (rozdíl se neustále zmenšuje), což je dáno větší pružností uzlu upevnění i větším ojetím srdcovky, tak pásmo frekvencí odpovídající dynamické síle P2, která především ovlivňuje životnost výhybky, je větší u výhybky č. 4. Nový uzel upevnění lépe tlumí dynamické účinky zejména při přechodu do pražce. To se mohlo projevit i v lepším podepření pražců, a tím i v celkově menších dynamických účincích na výhybce č. 3.

10. Závěr a doporučení

V rámci tří měřicích kampaní jsem porovнала dvě konstrukce výhybek, které jsou součástí jednoduché kolejové spojky a liší se pouze tuhostí v uzlu upevnění. Porovnání bylo provedeno na základě měření dynamických účinků přímo in-situ. Použila jsem certifikovanou metodiku měření dynamických účinků. Měření se skládalo z měření pohybového chování pražců v srdcovkové části výhybky a z měření přenosu vibrací konstrukcí výhybky v oblasti srdcovky. Zvoleným matematickým aparátem jsem vyhodnotila získaná data. Na základě vyhodnocení lze prohlásit, že nový (pružnější) uzel upevnění ve výhybce č. 3 se jeví jako perspektivní. Má pozitivní vliv ve snížení dynamických účinků na pražec a šterkové lože.

Doporučuji i nadále sledovat obě měřené výhybky a provést v průběhu životnosti obou konstrukcí další měření certifikovanou metodikou a to nejméně jednou ročně. Pokud se pozitivní vliv nového uzlu upevnění bude i nadále potvrzovat a bude mít pozitivní vliv na prodloužení životnosti výhybky, doporučuji jeho instalaci na další výhybky. Dále bych do budoucna doporučila, aby se na výhybkách vyzkoušela kombinace opatření. Pružnější uzel upevnění, podpražcové podložky a vyztužení kolejového lože. Tato kombinace by mohla mít větší kumulativní účinek a mohla by prodloužit životnost výhybek. Dynamické účinky ve výhybkách doporučuji měřit certifikovanou metodikou měření, protože se při měřeních v rámci této práce osvědčila.

Seznam použité literatury a dalších informačních zdrojů

- [1] ZAREMBSKI, A. M. Factors Involved in Turnout Maintenance. *Railway Track & Structures*. 3/1995, str. 12 – 13, ISSN 0339016.
- [2] KASSA, E. a J.C. NIELSEN. Dynamic interaction between train and railway turnout: full-scale field tests and validation of simulation models. *Vehicle System Dynamics*. 46(1), 521-534, ISSN 042 – 3114, 2008.
- [3] ZWANENBURG, Willem-Jan. *Modelling degradation processes of switches & crossings for maintenance & renewal planning on the Swiss railway network*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009. Thèse No. 4176.
- [4] PLÁŠEK, O. *Teoretická a experimentální analýza chování betonových pražců v kolejovém loži*. Brno: 2006. Vědecké spisy Vysokého Učení Technického v Brně, Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 218. ISBN 80-214-3309-4.
- [5] VUKUŠIČ, I. *Analýza dynamických účinků ve výhybkách*. Brno: 2015. 157 s., 280 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
- [6] *Rail Switches and Crossings. Development of new technologies for replacement*. Projekt Mainline, 7th Framework Programme, Final report. 2014. Grant Agreement number 285121.
- [7] SADLEKOVÁ, D. *Analýza dynamických účinků působících na výhybkové konstrukce*. Brno: 2013. 63 s., 198 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
- [8] ZELENKA, J. *Geometrical interaction of railway wheelset by passing through turnouts of Czech Railways corridor tracks*. Česká Třebová: Proceedings of 5th Specialized Conference on Welding in Railway Transport, 2003, pp. 79-86.
- [9] NICKLISCH, D. *SIMPACT-simulations of passing switches and crossings*. December 2008. INNOTRACK Technical report.
- [10] NICKLISCH, D. *SIMPACT-simulations of contact stresses on switches and crossings*. July 2009. INNOTRACK Technical report.
- [11] JOHANSSON, A., B. PÅLSSON, M. EKH, J. C. O. NIELSEN, M. K. A. ANDER, J. BROUZOULIS a E. KASSA: *Simulation of wheel-rail contact and damage in switches and crossings*. Firenze: 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, September 2009. ISSN 0043-1648, 2011.
- [12] MÜLLER, R., B. NELAIN, J. NIELSEN, S. SAID, W. RÜCKER a E. BONGINI. *Description of the vibration generation mechanism of turnouts and the development of cost effective mitigation measures*. Zpráva z projektu RIVAS, code: RIVAS_UIC_WP3-3_D3_6_V02, version 2. 28. 2. 2013.
- [13] *Recommendation of, and scientific basis for, optimisation of switches & crossings – part 1*. Projekt Innotrack. Deliverable report D3. 2011. Project No. TIP5-CT-2006-031415.
- [14] FENCL, J. *Výhybky a výhybkové konstrukce z pohledu správce*. Brno: FAST VUT v Brně, 26. 2. 2015. Prezentace na workshopu v rámci projektu IRICoN s názvem „Výhybky a výhybkové konstrukce, kolejnicové vady v souvislosti s interoperabilitou evropské železniční infrastruktury“.

- [15] *Recommendation of, and scientific basis for, optimisation of switches & crossings – part 2*. Projekt Innotrack. Deliverable report D3. 1.6, 2011. Project No. TIP5-CT-2006-031415.
- [16] *Praktické výsledky projektu Innotrack v železničním stavitelství ČR*. ISBN 978-80-905456-1-8.
- [17] VUKUŠIČ, I., D. SADLEKOVÁ, J. SMUTNÝ, L. PAZDERA, V. TOMANDL a J. HAJNIŠ. *Measurement and analysis of the dynamic effects on the crossings*. Konference CETRA 2014, duben 2014, Department of transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb. ISSN 1848-9842.
- [18] VOESTALPINE BWG GmbH & Co KG. *Brochure ERL Elastic Ribbed Plate Support*. Dostupné z: <http://www.voestalpine.com/> [4 s].
- [19] WAN, Ch. *Optimisation of vehicle-track interaction at railway crossings*. Dissertation, Delft University of Technology: 2016. ISBN 978-94-6186-689-9.
- [20] STEENBERGEN, M. J. M. M. *Wheel-rail interaction at short-wave irregularities*. PROEFSCHRIFT, Delft University of Technology: 2008. ISBN 978-90-8570-302-0.
- [21] *Rail Switches and Crossings. Development of new technologies for replacement*. Projekt Mainline, 7th Framework Programme, Final report. 2014. Grant Agreement number 285121.
- [22] MARINE, V.L., M.J.M.M STEENBURGEN a I.Y. SHEETS. *Combating RCF on switch points by tuning elastic track properties*. 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheels systems (CM 2009). Firenze, Italy: September 2009.
- [23] LICHTBERGER, B. *Handbuch Gleis. Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. Tetzlaff Verlag Hamburg: 2003, 562 s. ISBN 3-87814-803-8.
- [24] LOY, H. *Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs*. In European Railway Review. 2008, s. 7.
- [25] HRUZÍKOVÁ, M. *Vliv podpražcových podložek na kvalitu jízdní dráhy*. Dizertační práce. Brno: 2012, 171 s., 13 p. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
- [26] BRUNIA, S., I. ANASTASOPOULOS, S. ALFIA, A. VAN LEUVENC a G. GAZETAS. *Effects of train impacts on urban turnouts: Modeling and validation through measurements*. Journal of Sound and Vibration 324 (2009) 666–689. ISSN: 0022-460X.
- [27] DOULGERAKIS, E. *Influence of Switches and Crossings on Wheel Wear of a Freight Vehicle*. KTH, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Division of Rail Vehicles, 2013. ISSN 1654-7660.
- [28] ZBOŘIL, J. *Degradiční proces železniční výhybky*. Dizertační práce. Pardubice: 2011, 105 s., Universita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.
- [29] KAVALEC, J. *Stabilisation of railway balast and subballast with geogrids*. Brno: FAST VUT v Brně: 2. 10. 2014. Presentace na workshopu v rámci projektu IRICoN s názvem „Geosyntetika v tělese železničního spodku v souvislosti s interoperabilitou evropské železniční infrastruktury“.
- [30] CHEN, C., J.-F. FERELLEC, G.R. MCDOWELL a N. THOM. *Ballast-geogrid interaction analysis using DEM*. Railway Track Science and Engineering

- International Workshop - Ballast: Issues and Challenges, 5 – 6 December 2013, UIC Paris. ISBN 978-0-9565951-9-5.
- [31] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB. *Měření svislých posunů pražců a vibrací v oblasti srdcovky výhybky č. 21 v žst. Moravany*. Závěrečná zpráva. Brno: říjen 2007, 16 s, 7 p.
- [32] FISCHER, OBERAIGNER, DAVES, WIEST, BLUMAUER a OSSBERGER: *The Impact of a Wheel on a crossing. Die Stosswirkung eines Rades auf das Herzstück einer Weiche*. ZEV Rail Glasers Annalen 129 (2005) 8 August. ISSN: 1618-8330.
- [33] JENKINS, H., J. STEPHENSON, G. CLAYTON, G. MORLAND a D. LYON. *The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces*. Railway Engineering International, January (1974).
- [34] PLÁŠEK, O. *Dynamické jevy v konstrukci koleje*. Habilitační přednáška. 30.10.2006, počet stran 30.
- [35] ANDERSSON, C. a T. DAHLBERG. *Wheel/Rail Impacts at a Railway Turnout Crossing*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 212 Part F (1998).
- [36] LIEBERENZ, K. a U. WEISEMANN. *Geokunststoffe in dynamisch belasteten Erdbauwerken an Eisenbahnstrecken*. Rail International – Schienen der Welt, Dezember 2002, s. 30–39.
- [37] KAEWUNRUEN, S. *Monitoring structural deterioration of railway turnout systems via dynamic wheel/rail interaction*. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, Volume 1, April 2014. ISSN 2214-6571.
- [38] BEZIN, Y., I. GROSSONI a S. BRUNI. *The assessment of support stiffness on railway crossing dynamics*. Railway Track Science and Engineering International Workshop - Ballast: Issues and Challenges, UIC Paris: 5 – 6 December 2013. ISBN 978-0-9565951-9-5.
- [39] SMUTNÝ, J., L. PAZDERA a I. VUKUŠIČ. *Hodnocení dynamických účinků na výhybky*. Certifikovaná metodika, Ministerstvo dopravy – Odbor kosmických aktivit a ITS, 124/2014-710-VV/1, 2014
- [40] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha: Vydavatelství ČVUT: 2000, 389 s. ISBN 80-01-02246-3.
- [41] SMUTNÝ, J. *Moderní metody analýzy hluku a vibrací aplikované na kolejovou dopravu*. Teze k doktorandské disertační práci. VUT Brno. ISBN 80-214-0988-6.
- [42] JANDOVÁ, Kateřina. *Prezentace – Vibrodiagnostika*. Laboratoř diagnostiky materiálů, detašované pracoviště Ústavu termomechaniky AV ČR, v.v.i.: 2006. Dostupné z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/>
- [43] SMUTNÝ, Jaroslav a Luboš PAZDERA. *Železniční stavby – Měřicí technika a dynamika železničních staveb*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o.: 1998. ISBN 80-214-0976-2.
- [44] MORAVČÍK, M. a M. MORAVČÍK. *Mechanika železničních tratí, 3. díl, Experimentálna analýza namáhania a pretvorenia komponentov trate*. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU: 2002, 220 s. ISBN 80-7100-985-7.
- [45] HAVLÍK, Jiří, Bohuslav PUDA, Lukáš RAIF a Marek SMOLKA. *Výroba a vložení funkčních vzorků výhybek se zpružením v uzlu upevnění. Nová železniční technika. 2015, číslo 5/2015, s. 12–16. ISSN 1210-3942.*

- [46] RAIF, L., B. PUDA, J. HAVLÍK a SMOLKA M. *Výhybky se zpruženými uzly upevnění v ŽST Ústí nad Orlicí*. SILNICE ŽELEZNICE: 02/2016. ISSN 1803-8441.

Seznam symbolů a zkratek

α	celkový úhel nájezdu kola do hrotu srdcovky
α_1	úhel poklesu kola při nájezdu na srdcovku
α_2	úhel stoupání kola po nárazu do klínu srdcovky
*	komplexní konjunkce
a	zrychlení
a_{ef}	efektivní hodnota zrychlení vibrací (častěji užívána jako RMS)
$a(t)$	okamžitá hodnota zrychlení vibrací
A	amplituda výchylky
$A0Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na měřicí tyči ve šterkovém loži
$A1Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného za hlavou pražce v přímé větvi výhybky
$A2Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného v ose přímé větve výhybky
$A3Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na pražci v blízkosti hrotu srdcovky
$A4Z$	označení svislé složky snímače zrychlení kmitání umístěného na patě křídlové kolejnice v přímé větvi výhybky
$A5X$	označení podélné složky snímače zrychlení kmitání umístěného na patě křídlové kolejnice v přímé větvi výhybky
$A6Y$	označení příčné složky snímače zrychlení kmitání umístěného na patě křídlové kolejnice v přímé větvi výhybky
$A7Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného v ose odbočné větve výhybky
$A8Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky
$A9Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na 2. pražci před hrotem srdcovky
c_T	ekvivalentní tlumení koleje
DFT.....	diskrétní Fourierova transformace
$f(x)$	křivka klouzavého RMS

FFT	Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace)
FT	Fourier Transform (Fourierova transformace)
g	okénková funkce při výpočtu STFT
j	imaginární jednotka
k_H	Hertzova kontaktní tuhost
k_{T2}	ekvivalentní tuhost koleje pro výpočet síly P_2
M	počet vzorků jednoho segmentu signálu při výpočtu Welchovou metodou
m_{T1}	spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje pro výpočet síly P_1
m_{T2}	spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje pro výpočet síly P_2
m_U	neodpružená hmotnost
N	celkový počet vzorků signálu při výpočtu Welchovou metodou
π	Ludolfovo číslo (3,14)
P	plocha pod křivkou klouzavého RMS
P_0	statická síla na kontaktu kolo-kolejnice
P_1	silový vrchol – „tvrdý ráz“
P_2	silový vrchol – „měkký ráz“
Q	kolová síla
RMS	RoorMean Square (efektivní hodnota zrychlení vibrací)
$S_j[k]$	Dílčí periodogramy spektrální hustoty při výpočtu Welchovou metodou
S	výsledný odhad spektrální hustoty při výpočtu Welchovou metodou
S_0	označení snímače posunu umístěného na 2. pražci před hrotem srdcovky
S_1	označení snímače posunu umístěného na 1. pražci před hrotem srdcovky
S_2	označení snímače posunu umístěného na hlavě pražce v přímé větvi
S_3	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky v ose přímé větve
S_4	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky
S_5	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky v ose odbočné větve
S_6	označení snímače posunu umístěného na hlavě pražce v odbočné větvi

S7	označení snímače posunu umístěného na 1. pražci za místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
STFT	ShortTime Fourier Transform (krátkodobá Fourierova transformace)
$STFT_x^{(\omega)}(t', f)$	časově-frekvenční reprezentace signálu
T	čas (doba, pro kterou se určuje efektivní hodnota)
t	čas
t'	časové posunutí okénka u STFT
U	norma vektoru okénkové funkce u Welchovi metody
USP	undersleeperpads (podpražcové podložky)
ω	úhlová rychlost (úhlová frekvence)
V	rychlost jízdy vlaků v $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
v	rychlost jízdy vlaku v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
w	okénková funkce u Welchovi metody
$X(f)$	reprezentace signálu ve frekvenční oblasti
$x(t)$	reprezentace signálu v časové oblasti
žst	železniční stanice

Seznam příloh

1. Metodika měření	str. 3
2. Příloha k měření v Ústí nad Orlicí - 1. kampaň měření	
➤ Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 3	str. 5
➤ Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 4	str. 6
➤ Přehledné grafy pohybového chování na vybraných vlcích	str. 7
➤ Tabulka zatlačení pražců na vybraných vlcích	str. 19
➤ Průhybové křivky	str. 21
➤ Přehledné grafy zrychlení vibrací a FFT na vybraných vlcích	str. 24
➤ Časové vyhodnocení vibrací – tabulky minim, maxim a RMS	str. 46
➤ Frekvenční vyhodnocení – Welchova metoda na výřezech lokomotiv	str. 50
➤ Časově frekvenční vyhodnocení – STFT na vybrané soupravě	str. 55
3. Příloha k měření v Ústí nad Orlicí - 2. kampaň měření	
➤ Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 3	str. 59
➤ Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 4	str. 60
➤ Přehledné grafy pohybového chování na vybraných vlcích	str. 61
➤ Tabulka zatlačení pražců na vybraných vlcích	str. 75
➤ Průhybové křivky	str. 78
➤ Přehledné grafy zrychlení vibrací a FFT na vybraných vlcích	str. 81
➤ Časové vyhodnocení vibrací – tabulky minim, maxim a RMS	str. 107
➤ Frekvenční vyhodnocení – Welchova metoda na výřezech lokomotiv	str. 111
➤ Časově frekvenční vyhodnocení – STFT na vybrané soupravě	str. 116
4. Příloha k měření v Ústí nad Orlicí - 2. kampaň měření	
➤ Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 3	str. 120
➤ Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 4	str. 121
➤ Přehledné grafy pohybového chování na vybraných vlcích	str. 122
➤ Tabulka zatlačení pražců na vybraných vlcích	str. 134
➤ Průhybové křivky	str. 137
➤ Průhybové křivky – srovnání všech tří měřících kampaní	str. 140
➤ Přehledné grafy zrychlení vibrací a FFT na vybraných vlcích	str. 143
➤ Časové vyhodnocení vibrací – tabulky minim, maxim a RMS	str. 165

- Frekvenční vyhodnocení – Welchova metoda na výřezech lokomotiv str. 169
 - Časově frekvenční vyhodnocení – STFT na vybrané soupravě str. 174
-
- 5. Fotodokumentace z měření** str. 177