

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 218*

*ISSN 1213-418X*

**Otto Plášek**

**TEORETICKÁ  
A EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA  
CHOVÁNÍ BETONOVÝCH PRAŽCŮ  
V KOLEJOVÉM LOŽÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav železničních konstrukcí a staveb

**Ing. Otto Plášek, Ph.D.**

**TEORETICKÁ A EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA  
CHOVÁNÍ BETONOVÝCH PRAŽCŮ  
V KOLEJOVÉM LOŽI**

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS  
OF CONCRETE SLEEPER BEHAVIOR  
IN BALLAST BED**

Zkrácená verze habilitační práce



BRNO 2006

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

železniční stavby, železniční konstrukce, železniční svršek, železniční spodek, statická analýza, dynamická analýza, měření vibrací, betonové pražce, kolejové lože, podpražcové podložky

## **KEY WORDS**

railway structures, railway constructions, railway superstructure, permanent way, railway substructure, static analysis, dynamic analysis, concrete sleepers, ballast bed, under sleeper pads

Originál práce je uložen v archivu PVO FAST

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>3</b>
<b>PŘEDSTAVENÍ AUTORA</b> .....	<b>4</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>1 NOVÉ PROBLÉMY – VADY POLOHY DLOUHÝCH VÝHYBKOVÝCH PRAŽCŮ</b> .....	<b>7</b>
<b>2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA</b> .....	<b>9</b>
2.1 ROZNÁŠENÍ NÁPRAVOVÝCH SIL A PRŮHYBOVÁ KŘIVKA KOLEJE.....	9
2.2 NAPĚTÍ V PRAŽCOVÉM PODLOŽÍ .....	12
2.3 DYNAMICKÁ ANALÝZA KOLEJE .....	14
2.3.1 <i>Dynamická soustava vozidlo – kolej</i> .....	14
2.3.2 <i>Rozdělení zdrojů vibrací podle vlnových délek</i> .....	14
2.3.3 <i>Vyjádření dynamických účinků dynamickým součinitelem</i> .....	15
<b>3 ANALÝZY A MĚŘENÍ</b> .....	<b>16</b>
3.1 STATICKÁ ANALÝZA PRO PŘÍČNÉ PRAŽCE .....	16
3.1.1 <i>Vyhodnocení výsledků</i> .....	17
3.1.2 <i>Shrnutí statické analýzy příčného pražce</i> .....	18
3.2 STATICKÁ ANALÝZA PRO VÝHYBKOVÉ PRAŽCE .....	19
3.2.1 <i>Vyhodnocení výsledků</i> .....	19
3.2.2 <i>Shrnutí statické analýzy výhybkového pražce</i> .....	19
3.3 MĚŘENÍ PŘÍČNÝCH PRAŽCŮ V KOLEJI .....	21
3.3.1 <i>Popis měřicího zařízení a metod měření</i> .....	21
3.4 MĚŘENÍ VÝHYBKOVÝCH PRAŽCŮ V KOLEJI.....	23
3.4.1 <i>Vyhodnocení svislých pohybů výhybkových pražců</i> .....	23
3.4.2 <i>Shrnutí poznatků</i> .....	23
3.5 MĚŘENÍ NAPĚTÍ V PRAŽCOVÉM PODLOŽÍ VE VÝHYBCE .....	25
3.5.1 <i>Metodika měření</i> .....	25
3.5.2 <i>Vyhodnocení signálů</i> .....	26
3.5.3 <i>Závěry měření napětí v pražcovém podloží</i> .....	26
<b>4 DOPORUČENÍ A OPATŘENÍ</b> .....	<b>27</b>
4.1 SNIŽOVÁNÍ DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ POMOCÍ PRUŽNÝCH PRVKŮ V KONSTRUKCI KOLEJE.....	27
4.2 STATICKÁ ANALÝZA PRAŽCŮ S PRUŽNOU LOŽNOU PLOCHOU .....	28
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>29</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>30</b>
<i>Knihy, skripta a příručky</i> .....	30
<i>Normy, předpisy a vzorové listy</i> .....	31
<i>Články v odborných periodících</i> .....	31
<i>Příspěvky ve sbornících odborných konferencí</i> .....	33
<i>Výzkumné zprávy</i> .....	35
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>36</b>

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Ing. Otto Plášek, Ph.D.



Narozen: 15. září 1962, Zábřeh na Moravě  
Pracovní zařazení: odborný asistent Ústavu železničních konstrukcí a staveb Fakulty stavební VUT v Brně

### Vzdělání

1986 Ing. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor „Konstrukce a dopravní stavby“  
1991 Žilinská univerzita, postgraduální kurz „Traťové hospodářství“  
1999 Ph.D. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor „Teorie konstrukcí“, téma „Ověření mechanického namáhání závěrových háků výhybek Českých drah“

### Zaměření

Železniční konstrukce a stavby, železniční svršek, statické a dynamické analýzy, modelování kolejové jízdní dráhy, měření a vyhodnocení dynamických účinků, geometrické parametry koleje

### Praxe

#### *Pedagogická praxe*

1991–dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb, odborný asistent

#### *Odborná praxe*

1986–991 České dráhy, Traťová distance Hradec Králové, samostatný provozně technický pracovník  
1986–1987 základní vojenská služba, stavební technik na výstavbě JE Temelín  
1995–2003 BD Šumavská-Klatovská Brno, člen představenstva odpovědný za technické záležitosti

### Pedagogická činnost

#### *Přednášky*

Železniční stavby, Železniční stavby II, Železniční konstrukce, Železniční stanice a uzly, Speciální železniční konstrukce, Vybrané statě ze železničních staveb I, Vybrané statě ze železničních staveb II, Speciální železniční problémy I, Rekonstrukce tratí, stanic a vleček, Kolejová doprava ve městech, Vysokorychlostní tratě

#### *Cvičení a semináře*

Železniční stavby, Železniční stavby II, Železniční konstrukce, Železniční stanice a uzly, Speciální železniční konstrukce, Vybrané statě ze železničních staveb I, Vybrané statě ze železničních staveb II, Speciální železniční problémy I, Rekonstrukce tratí, stanic a vleček, Kolejová doprava ve městech, Vysokorychlostní tratě, Diplomový seminář I a II, Výuka v terénu

#### *Vedení diplomových a doktorských prací*

Vedení více jak 40 diplomových prací, z nichž mnohé byly oceněny jak fakultou, tak ČKAIT či významnými stavebními společnostmi. V roce 2006 školitel tří studentů doktorského studia.

### Řešené výzkumné projekty

#### *Odpovědný řešitel, spoluřešitel*

Diagnostika bezстыkové koleje pro vyšší a vysoké rychlosti v podmínkách ČSD. Oponovaný grantový výzkumný úkol č. 35 ÚŘ ČSD. VUT v Brně, Fakulta stavební, spoluřešitel. Brno 1991. Závěrečná zpráva 63 str.

Závady kolejové jízdní dráhy. Oponovaný grantový výzkumný úkol č. 36 ÚŘ ČSD. VUT v Brně, Fakulta stavební, spoluřešitel. Brno 1991. Závěrečná zpráva 32 str.

Navržení a ověření technologie podbíjení, zhutňování a stabilizace koleje s cílem minimalizovat celkové náklady na opravné práce. Výzkumný úkol č. E 6313006 VÚŽ. VUT v Brně, Fakulta stavební, spoluřešitel. Brno 1994. Dílčí zpráva etapy E01 a E02, 65 str.

Navržení a ověření technologie podbíjení, zhutňování a stabilizace koleje s cílem minimalizovat celkové náklady na opravné práce. Výzkumný úkol č. D 2371001 VÚŽ. VUT v Brně, Fakulta stavební, spoluřešitel. Brno 1996. Závěrečná zpráva, 70 str.

Sledování účinnosti obnovy GPK – ASP při různé frekvenci podbíjecích pěchů. Výzkumný úkol č. 04-7/96 MTH. VUT v Brně, Fakulta stavební, spoluřešitel. Brno 1997. Závěrečná zpráva, 55 str.

### **Spolupráce s praxí**

#### *Významná realizovaná díla*

Výhybková konstrukce pro rychlost 300 km.h-1. Studie, konstrukční požadavky. Projekt železničního spodku pro výhybku č. 5 v žst. Vranovice. Realizace 2003. VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Řešitel a spoluřešitel.

Software RailCAD, nadstavba AutoCADu, použity unikátní algoritmy a projektové postupy, celkem 32 společností z ČR a SR, z toho 5 vysokých škol, 1 střední škola a jedna vyšší odborná škola, poskytnuto celkem více jak 150 licencí.

Zaměření a projekt části horské dráhy Dampfbahn Furka Bergstrecke – kanton Uri, Švýcarsko. VUT v Brně, FAST, spoluřešitel.

### **Odborná činnost**

#### *Členství v komisích a skupinách*

Člen pracovní skupiny WG 16 pro revizi evropských norem pro betonové pražce SC 1, TC 256 při CEN. Dále jsem členem.

Členem pracovní skupiny UIC pro zavádění podpražcových podložek.

Člen technické normalizační komise č. 141 „Železniční aplikace“ při ČSNI, SC 1 Trať.

#### *Publikační, posudková, projekční a výzkumná činnost*

Monografie 2×, vědecký časopis 7×, významné inženýrské a architektonické dílo 3×, zahraniční vědecké konference 6×, tuzemské vědecké a odborné konference 14×, odborný časopis 2×, posudky a expertízy 41×, skripta 3×.

## ÚVOD

Na začátku devadesátých let po vzniku České republiky 1. 1. 1993 bylo rozhodnuto o modernizaci železničních koridorů pro rychlosti vlaků do  $160 \text{ km.h}^{-1}$ . Toto rozhodnutí se stalo impulzem pro rozvoj všech odvětví železniční dopravy, a to jak v oblasti vozidel, tak v oblasti infrastruktury. Modernizace železničních koridorů se stala příležitostí vypořádat se s kritickým nedostatkem údržby železniční infrastruktury. Železniční svršek a zejména spodek neodpovídal zamýšlenému zvyšování rychlostí.

Za této situace byla modernizace, případně optimalizace železničních tratí jedinou možností. Od modernizace či optimalizace si správce infrastruktury (dříve České dráhy, s. o., nyní České dráhy a. s. a Správa železniční dopravní cesty, s. o.) oprávněně slibuje zvyšování rychlostí, výrazné zlepšení technického stavu a snížení nákladů na údržbu. Tento cíl je ve velké míře dosahován. Při modernizacích a optimalizacích tratí se bohatě využívá zkušeností vyspělých železničních správ. Tyto zkušenosti byly získány v průběhu desetiletí kontinuálního rozvoje stávajících tratí, dnes zpravidla označovaných jako konvenčních. Nové zkušenosti získaly železniční správy s budováním a provozováním tratí pro vysoké rychlosti, čímž se zpravidla myslí trati pro rychlost vyšší jak  $200 \text{ km.h}^{-1}$ .

Se zaváděním vysokých rychlostí se však objevují nové problémy. Protože jsou české tratě pojížďeny rychlostmi do  $160 \text{ km.h}^{-1}$ , objevují se tyto problémy jen omezeně. Jejich výskyt může být překvapivý, protože se objevují přes všechna kvalitativní opatření, která byla v posledních deseti letech zavedena. Většina nových problémů se projevuje již v průběhu pětileté záruční lhůty, která je na stavby modernizace a optimalizace aplikována.

Tato práce je věnována jednomu z těchto nových problémů – chování betonových pražců a s tím souvisejícím nežádoucím poklesům dlouhých betonových výhybkových pražců. V minulosti byly pozorovány vady dřevěných výhybkových pražců související se zamačkáváním podkladnic do úložných ploch pražců a s nepřímostí pražců způsobenou sesycháním dřeva. Oba tyto problémy se nedotýkají betonových pražců a navíc mají pro oba materiály vady zcela jiný charakter. Jak u dřevěných pražců, tak u betonových pražců jsou průvodním jevem nežádoucí změny v konstrukčním uspořádání koleje – jsou to změny v převýšení a zborcení koleje.

V práci je věnován prostor především analýze chování betonových příčných a výhybkových pražců v kolejovém loži a souvisejícím problémům. Práce obsahuje:

- uvedení výchozího stavu, tj. popis vady dlouhých betonových výhybkových pražců a jeho průběhu,
- hledání příčin vady počínaje teoretickými východisky, dále statické analýzy a měření v koleji,
- návrh nápravného opatření ve formě použití podpražcových podložek, uvedení zkušeností zahraničních správ a výsledky statické analýzy.

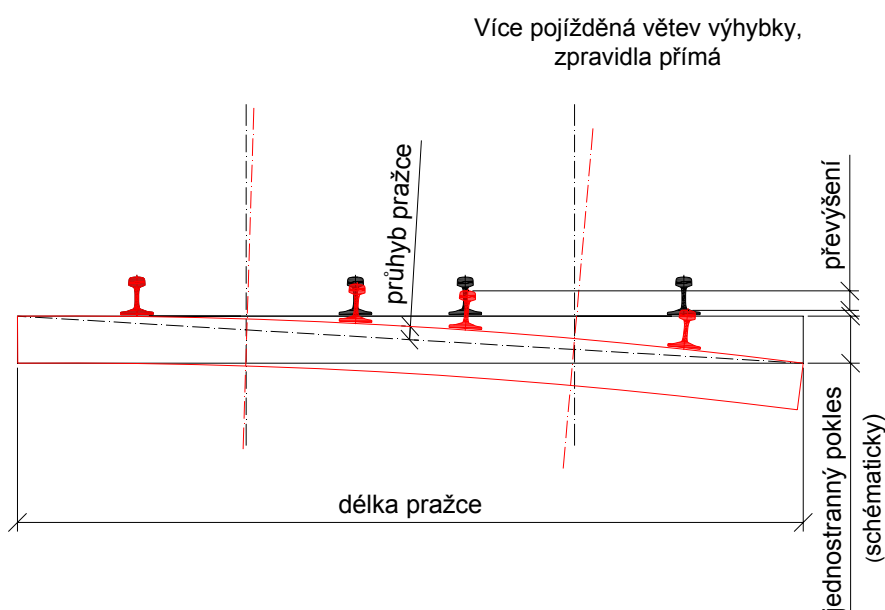
Nepřavidelné a jednostranné poklesy dlouhých betonových výhybkových pražců se velmi obtížně odstraňují. Oprava podbíjením pražců nemá žádoucí trvanlivost. Podkládání upevnění kolejnic může nepříznivě působit na průhyb pražce a neřeší problém polohy pražce. Údržba částí koleje s takovými pražci je neúměrně drahá. Vada polohy dlouhých výhybkových pražců se vyskytuje i v případech, že byly dodrženy všechny předepsané kvalitativní ukazatele v průběhu stavebních prací.

Odpovědi na aktuální otázku, jak řešit problém polohy dlouhých výhybkových pražců, hledají jak správci dopravní cesty, tak dodavatelé stavebních částí a zhotovitelé staveb. Odstraňování vad je velmi nákladné a trvanlivost oprav je malá. Nalezení příčin vady a způsobu, jak těmto vadám předcházet, může přinést nemalé úspory finančních prostředků a zvýšení bezpečnosti.

# 1 NOVÉ PROBLÉMY – VADY POLOHY DLOUHÝCH VÝHYBKOVÝCH PRAŽCŮ

Vada polohy dlouhých betonových pražců v srdcovkových částech je charakteristická změnou geometrických parametrů koleje v rozchodu a převýšení způsobené poklesem pražců a souvisejícím průhybem pražce. Právě měřením převýšení a rozchodu při pravidelné dohlédací činnosti je tato závada identifikována. Základním charakteristickým znakem je pokles pouze více poježděné, zpravidla přímé větve výhybky.

Na základě této skutečnosti byla uskutečněna dlouhodobá sledování průhybů a poklesů pražců od výroby a skladování, přes montáž, pokládku výhybek až po provoz. Ke sledování byla vždy zvolena přesná nivelace. Zjištěny tak byly parametry poklesů a průhybů v nezátíženém stavu. V současné době jsou pražce ve výrobě kontrolovány pomocí měření odchylek od referenční latě v souladu s příslušnými technickými podmínkami dodacími.

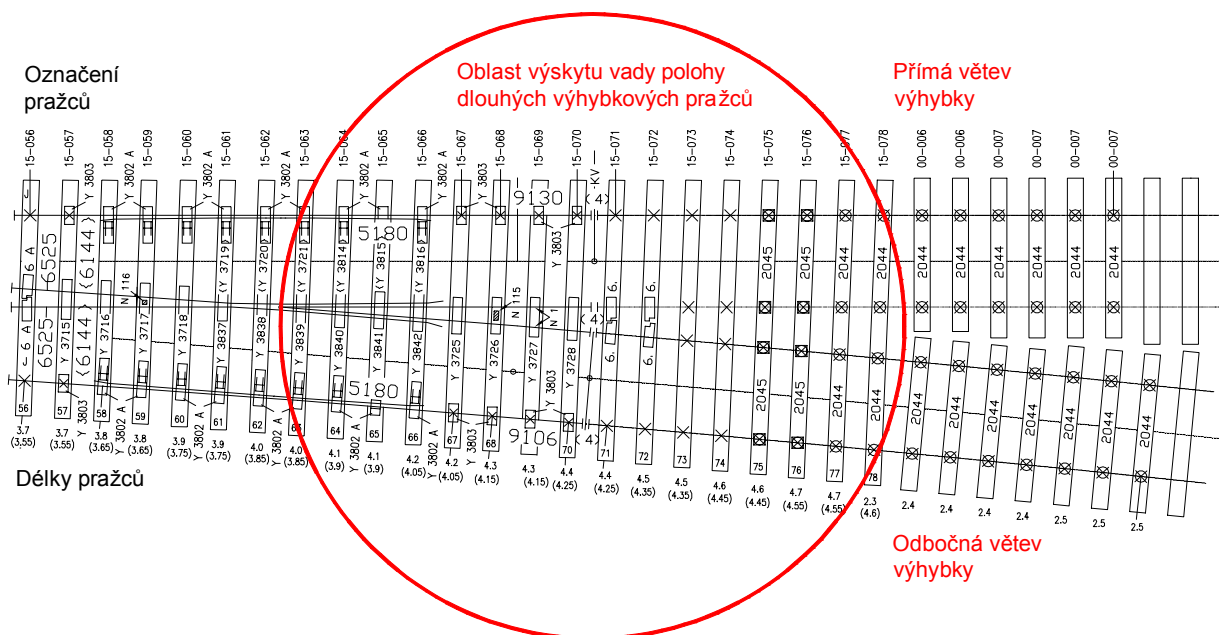


Obr. 1 – Schéma vady polohy dlouhých výhybkových pražců

Uskutečněná měření byla měření popisná, která sledovala vývoj deformace pražců v různých podmínkách na skládce a v provozu. Tato měření se nesoustředila na identifikaci příčin vzniku deformace pražců. Protože dosud nebyly jednoznačně stanoveny příčiny, nebyl také jednoznačně určen způsob odstranění vady. Současný způsob, kdy jsou podkladnice podkládány ocelovými podložkami, je nutno považovat za provizorní. Nesnižuje průhyb pražce, ale vede ke zvyšování ohybového momentu v pražci.

Průhyby dlouhých výhybkových pražců a jejich jednostranné poklesy ve více poježděné větvi výhybky nebyly pro dřevěné pražce pozorovány, a to alespoň do té míry, aby byly v minulosti řešeny v rámci výzkumných prací. U dlouhých výhybkových pražců pod srdcovkami byly pozorovány závady opačného charakteru, kdy docházelo k nežádoucímu poklesu srdcovky. Také s tímto jevem souvisel výskyt nepřijatelných hodnot převýšení a zborcení koleje.





Obr. 2 – Schéma srdcovkové části výhybky J60 1:12-500-I, pravá, s betonovými pražci

Výše popsaná závada pro betonové pražce je specifická právě pro pražce z předpjatého betonu. O tento fakt se opírá hledání příčin závady. Příčiny poklesu a průhybu betonového pražce jsou s největší pravděpodobností kombinací několika faktorů.

Ze známých faktů a měření lze jmenovat některé příčiny tohoto jevu. Z příčin, jejichž původ je v konstrukci, výrobě a montáži, je nutné zmínit především excentricitu předpětí, která způsobuje prohýbání pražce středem směrem vzhůru. Na druhou stranu byly pozorovány skutečnosti, které nasvědčují, že příčiny jevu je nutné hledat v provozním zatížení a dynamických účincích. Bylo shledáno, že nárůst poklesů pokračuje prakticky lineárně s časem; poklesy nevznikají pouze po dobu konsolidace kolejového lože a konstrukčních vrstev, ale pokračují dlouhodobě. Nedochází k výraznému nárůstu průhybu, který je nutný pro opírání pražce o kolejové lože na koncích pražce. Chování pražců s excentricitou předpětí je podobné jako u zkušebních pražců bez excentricity předpětí. V neposlední řadě je nutné také uvést, že u všech dosud provedených měření krátkých pražců pod provozním zatížením bylo shledáno, že pražec se pod zatížením opírá o kolejové lože především ve své střední části a pod konci pražců vznikají volné prostory. Podobné jevy byly pozorovány při měřeních popsaných níže u výhybkových betonových pražců.

## 2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

### 2.1 ROZNÁŠENÍ NÁPRAVOVÝCH SIL A PRŮHYBOVÁ KŘIVKA KOLEJE

V této kapitole jsou uvedena teoretická východiska, na kterých jsou založeny statické analýzy a měření. Pozornost je věnována klasické konstrukci železničního svršku, kterou vytvářejí kolejnicové pásy upevněné na pražcích uložených v kolejovém loži. Statické analýzy i měření byly zaměřeny na celou konstrukci železničního svršku i pražcového podloží. Proto jsou následující kapitoly věnovány všem částem kolejového roštu a pražcového podloží, vysvětleny jsou základní statické a dynamické principy, fyzikální vlastnosti jednotlivých dílů a základní modely statických a dynamických výpočtů.

Pro namáhání součástí železničního svršku je zásadní roznos nápravových sil po délce koleje. Pro kontinuálně podepřený prut je možné vyjádřit diferenciální rovnicí, jejíž řešení přinesl Timošenko (1908):

$$EI_y \frac{d^4 w}{dx^4} + k_z w = 0 \quad (1)$$

kde

$k_z$  ..... tuhost kolejové jízdní dráhy [N.m<sup>-2</sup>]  
 $E$  ..... modul pružnosti [Pa]  
 $I_y$  ..... moment setrvačnosti kolejnice [m<sup>4</sup>]

Řešením této diferenciální rovnice je:

$$w = \eta \cdot \frac{Q}{2 \cdot k_z \cdot L} \quad (2)$$

přítom veličina  $L$  představuje délku ekvivalentního prostého nosníku, tzv. charakteristickou délku kolejového roštu:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI_y}{k_z}}; \quad k_z = b_L \cdot C; \quad b_L = \frac{A_{sb}}{a} \quad (3)$$

kde

$L$  ..... charakteristická délka kolejového roštu, vyjadřuje délku prostého nosníku, který je ohybově stejně namáhán, činí 0,7–1,5 m [m]  
 $b_L$  ..... šířka odpovídající souvislému podepření kolejnice [m]  
 $C$  ..... součinitel ložnosti [Pa.m<sup>-1</sup>]  
 $A_{sb}$  ..... kontaktní plocha mezi pražcem a štěrkovým ložem pro jednu polovinu pražce  $A_{sb} = 0,42 \text{ m}^2$ , pro dřevěný pražec  $A_{sb} = 0,36 \text{ m}^2$   
 $a$  ..... osová vzdálenost pražců [m]

Podobně je možné vyjádřit ohybový moment pro kolejnici:

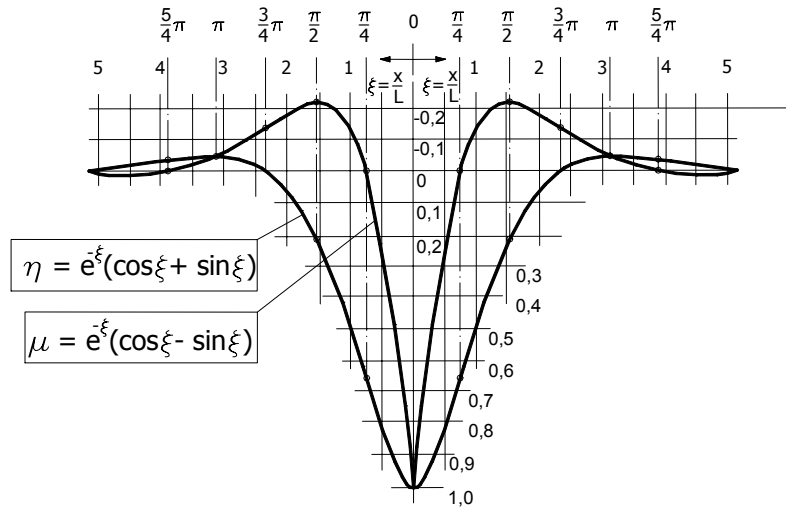
$$M = \mu \cdot \frac{Q \cdot L}{4} \quad (4)$$

Pořadnice příčinkových čar nám umožňují posuzovat namáhání v průřezích vzdálených o hodnotu  $x$  od průřezu, nad kterým je postavena kolová síla  $Q$ . Hodnoty příčinkových čar, jejichž grafické vyjádření je na Obr. 3, se spočítají podle:

$$\mu = e^{-\xi} (\cos \xi - \sin \xi); \quad \eta = e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi); \quad \xi = \frac{x}{L} \quad (5)$$

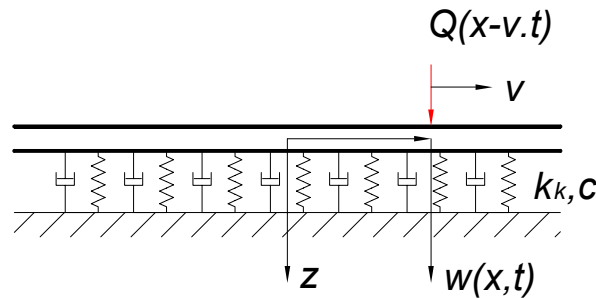
kde

- $\eta, \mu$  .....pořadnice příčinkové čáry
- $\xi$  .....relativní souřadnice [bez rozměru]
- $x$  .....vzdálenost sledovaného průřezu od působíště svislé síly [m]
- $L$  .....charakteristická délka kolejového roštu [m]



Obr. 3 – Příčinkové čáry pro stanovení ohybového momentu a poklesu kolejnice

Teoretickými pracemi (Timošenko, Frýba) bylo prokázáno, že pohyb zatížení má na dynamickou odezvu vliv. Nejjednodušší model koleje a zatížení je na Obr. 4.



Obr. 4 – Prutový model s pohyblivým zatížením

Diferenciální rovnice popisující tento problém je analogická jako pro statický případ je sestavena pro veličinu  $w(x,t)$ :

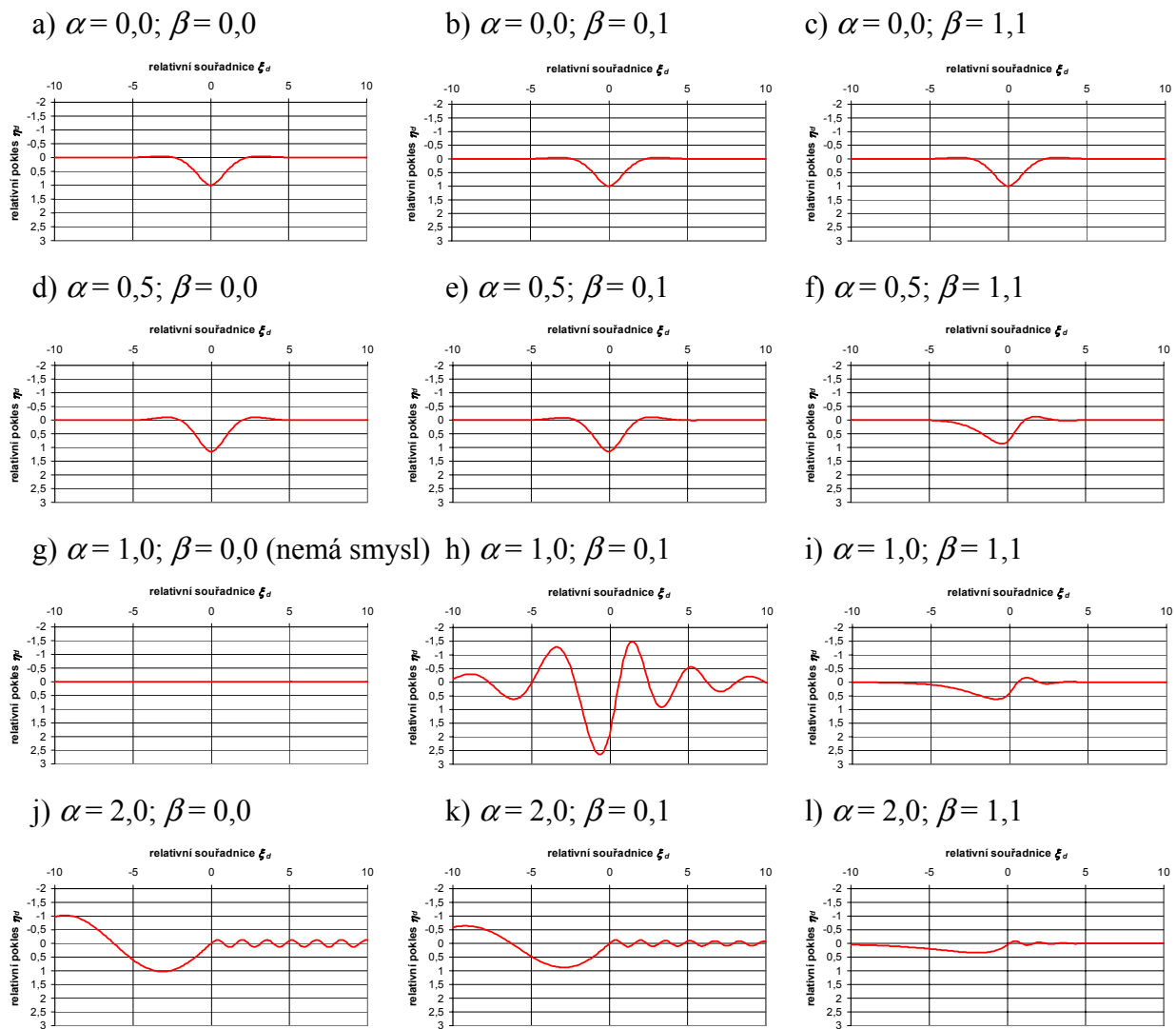
$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + kw(x,t) = 0 \quad (6)$$

Zavedením bezrozměrné veličiny  $\xi_d = \frac{x - v \cdot t}{L}$  (7)

Uvažujeme-li  $w = e^{jx}$ ,  $\alpha = \frac{v}{2\lambda} \sqrt{\frac{m}{EI}}$  poměr ke kritické rychlosti,  $\beta = \frac{c}{2m} \sqrt{\frac{m}{k}}$  poměr tlumení ke kritickému tlumení, řešíme rovnici:

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

Čtyři kořeny rovnice  $\gamma$  jsou komplexní čísla. Řešením konstant  $A_1$  až  $A_4$  pomocí okrajových podmínek je možné získat charakteristické tvary vln pro relativní souřadnici  $\xi_d$ . Okrajové podmínky vycházejí ze spojitosti průhybové křivky včetně prvních dvou derivací a ze spojitosti průběhu posouvající síly. Pokud vydělíme pravé strany soustavy rovnic pro konstanty  $A_i$  statickou hodnotou průhybu podle vztahu (2), získáme relativní průhyby  $\eta_d(\xi_d)$ . Na Obr. 5 jsou znázorněny bezrozměrné veličiny  $\xi_d$  a  $\eta_d$  pro různé hodnoty součinitelů  $\alpha$  a  $\beta$ .



Obr. 5 – Tvary vln v závislosti na poměru ke kritické rychlosti  $\alpha$  a poměru tlumení  $\beta$

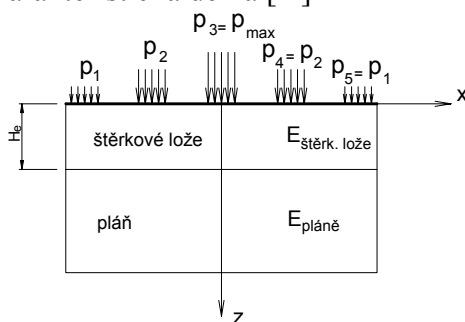
Případy a) až c) představují statické řešení a odpovídají Obr. 3, jsou zde uvedeny pro ilustraci a pro porovnání.

## 2.2 NAPĚTÍ V PRAŽCOVÉM PODLOŽÍ

Na pražec přímo pod kolovou silou zpravidla připadá 33–40 % síly [2, 80, 85, 86], zbytek je rozdělen na několik sousedních pražců, viz Obr. 6. Výpočet rozložení kolové síly na jednotlivé pražce a výpočet působícího zatížení na kolejové lože je možný např. podle vztahů:

$$\gamma_d = \frac{a}{2L} = \frac{1}{2} \sqrt[4]{\frac{k_d a^3}{4EI_y}} \quad (9)$$

$a$ .....osová vzdálenost pražců [m]  
 $k_d$ .....tuhost podepření [ $\text{N.m}^{-1}$ ]  
 $EI_y$ .....ohybová tuhost jedné kolejnice [ $\text{N.m}^2$ ]  
 $L$ .....charakteristická délka [m]



Obr. 6 – Pražcové podloží jako dvouvrstvý systém

$$p_i = p_{\max} \eta(x_i)$$

$$p_{\max} = \delta \frac{Qa}{2LA_{sb}} = \frac{Q}{2A_{sb}} \sqrt[4]{\frac{k_d a^3}{4EI_y}}$$

$$\eta(x_i) = e^{\frac{-x_i}{L}} \left( \cos \frac{x_i}{L} + \sin \frac{x_i}{L} \right) \quad x_i \geq 0$$

(10)

kde

$p_i$ .....tlak vyvozený kolovou silou  $Q$  pod  $i$ -tým pražcem [ $\text{N.m}^{-2}$ ]  
 $p_{\max}$ .....tlak vyvozený kolovou silou pod pražcem, nad kterým kolová síla působí [ $\text{N.m}^{-2}$ ]  
 $Q$ .....kolová síla [N]  
 $a$ .....osová vzdálenost pražců [m]  
 $L$ .....délka náhradního nosníku [m]  
 $k_d$ .....tuhost podepření [ $\text{N.m}^{-1}$ ]  
 $EI_y$ .....ohybová tuhost jedné kolejnice [ $\text{N.m}^2$ ]  
 $A_{sb}$ .....kontaktní plocha mezi pražcem a šterkovým ložem pro jednu polovinu pražce [ $\text{m}^2$ ]  
 $\delta$ .....dynamický součinitel  
 $\eta$ .....pořadnice příčinkové čáry  
 $x_i$ .....vzdálenost zkoumaného místa od působíště kolové síly [m].

Rozdělení napětí v pražcovém podloží není možné stanovit pomocí teorie pružného poloprostoru pro obdélníkový základ. Pražcové podloží tvoří vrstevnatý poloprostor, kde každá vrstva má jiné geotechnické vlastnosti. Největší napětí se vyskytuje pod bodem křížení podélné osy pražce a podélné osy kolejnice.

Odemarkova metoda je jednoduchá metoda, která umožňuje vypočítat napětí v pružném vrstevnatém poloprostoru pod pražcem. Vstupními údaji jsou tloušťky jednotlivých vrstev a moduly přetvárnosti materiálů. Výpočet spočívá ve stanovení ekvivalentních tloušťek vrstev  $h_e$  a výpočet napětí je řešen v tzv. ekvivalentním pružném poloprostoru. Pro výpočet ekvivalentní tloušťky se použije vztah:

$$h_{e,i} = 0,9 \cdot h \cdot \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_0}} \quad (11)$$

$h_{e,i}$ .....je ekvivalentní tloušťka i-té vrstvy [m]  
 $h$ .....tloušťka vrstvy [m]  
 $E_i$ .....modul pružnosti i-té vrstvy [MPa]  
 $E_0$ .....modul pružnosti podloží, případně redukovaný modul přetvárnosti  $E_{0r}$  [MPa]

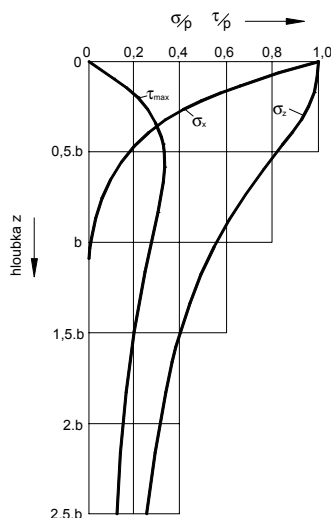
Normálové a smykové napětí v ekvivalentním pružném poloprostoru pod spojitým zatížením  $p$  je možné vypočítat podle (12), grafické vyjádření na Obr. 7:

$$\sigma_z = -\frac{2 \cdot p}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{b}{2 \cdot z}\right) + \frac{2 \cdot b \cdot z}{b^2 + 4 \cdot z^2} \right)$$

$$\sigma_x = -\frac{2 \cdot p}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{b}{2 \cdot z}\right) - \frac{2 \cdot b \cdot z}{b^2 + 4 \cdot z^2} \right)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \quad (12)$$

$\sigma_z$ .....normálové napětí ve svislém směru [Pa]  
 $\sigma_x$ .....normálové napětí ve vodorovném směru podél osy koleje [Pa]  
 $\tau_{\max}$ .....největší smykové napětí [Pa]  
 $b$ .....šířka působení zatížení [m]  
 $p$ .....spojité zatížení (působící tlak), vypočtené podle (10) [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ]  
 $z$ .....sledovaná hloubka [m]

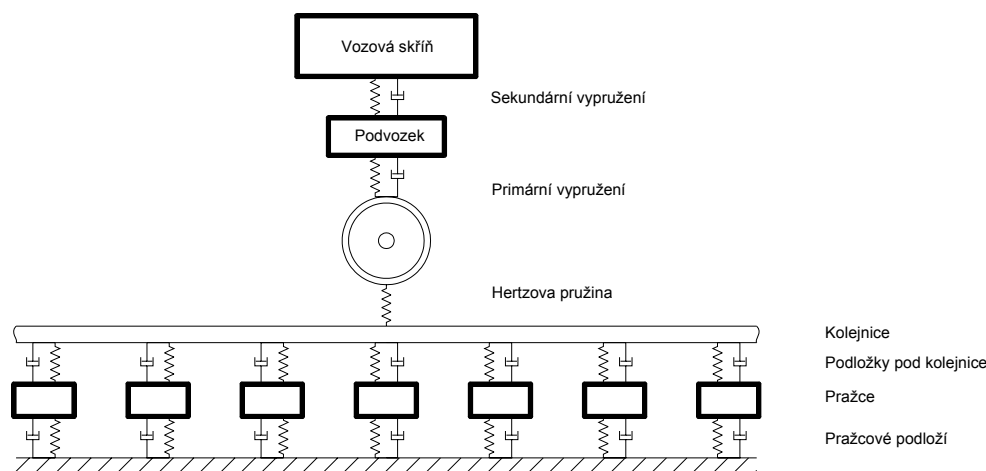


Obr. 7 – Průběh normálového a smykového napětí v ekvivalentním pružném poloprostoru

## 2.3 DYNAMICKÁ ANALÝZA KOLEJE

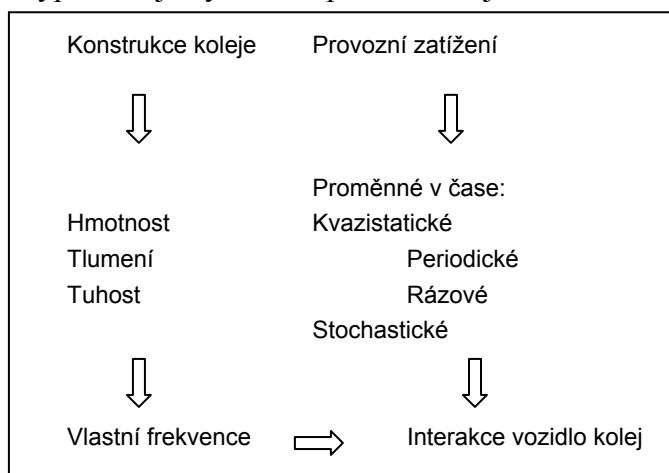
### 2.3.1 Dynamická soustava vozidlo – kolej

Řešení většiny konstrukčních problémů spočívá ve správném pochopení dynamických účinků působících v konstrukci železniční tratě. Nejjednodušší model koleje je na Obr. 8.



Obr. 8 – Model dynamické soustavy vozidlo – kolej

Dynamické jevy se u soustavy vozidlo – kolej projevují v širokém rozsahu frekvencí: od 0,5–1 Hz pro příčná a svislá zrychlení skříň vozidel po 2 000 Hz buzené nepravidelnostmi na jízdnicích a kol. Primární vypružení mezi dvojkolím a podvozkem zachycuje a tlumí vibrace vzniklé na kontaktu kolo – kolejnice. Sekundární vypružení zachycuje a tlumí nižší frekvence. V konstrukci tratě primární vypružení představuje konstrukce upevnění kolejnice – pružné podložky a svěrky, sekundární vypružení je vytvořeno pomocí kolejového lože.

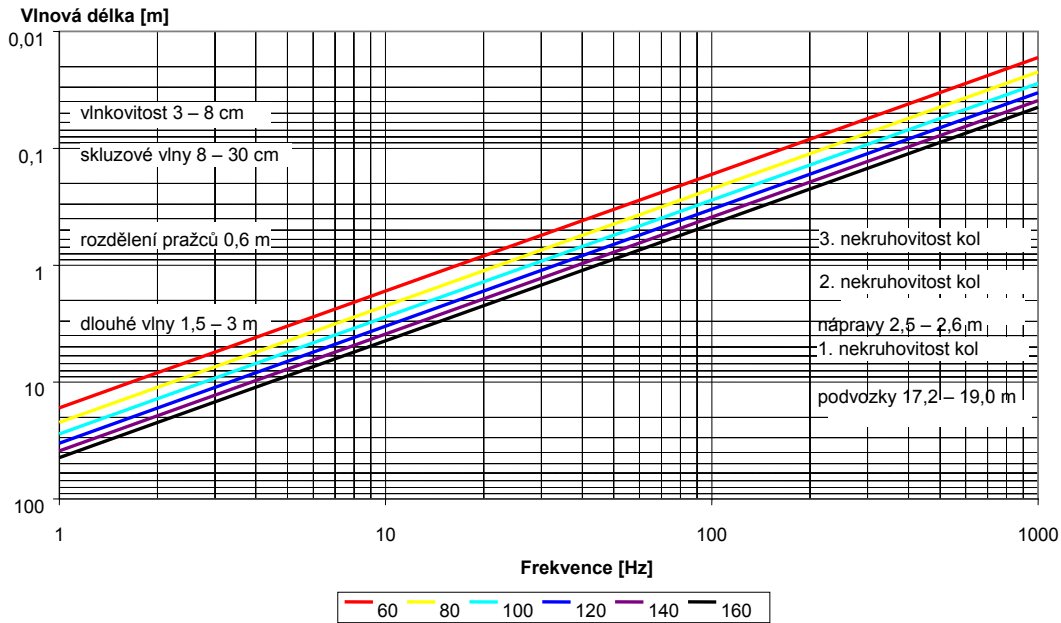


Obr. 9 – Vlastnosti dynamické soustavy

### 2.3.2 Rozdělení zdrojů vibrací podle vlnových délek

Buzení vibrací majících původ v koleji je přehledně uvedeno na Obr. 10. Pro vlnové délky v řádu centimetrů jsou zásadní vlnky na kolejnicích, nepravidelnosti jízdnicí plochy kola a nekvalitní sváry. Pro vysoké frekvence do 2 000 Hz jsou rozhodující vlastnosti na kontaktu kolo kolejnice – Hertzova pružina. Vady vzniklé při válcování a rovnání kolejnic mají vlnovou délku kolem 3 m. Vlastní frekvence podvozků jsou v oblasti 20–25 Hz, odpružené hmoty kolejových vozidel kmitají s vlastní frekvencí mezi 0,7–5 Hz a jsou ovlivňovány prostorovou polohou zemního tělesa a vlastnostmi kolejového lože.

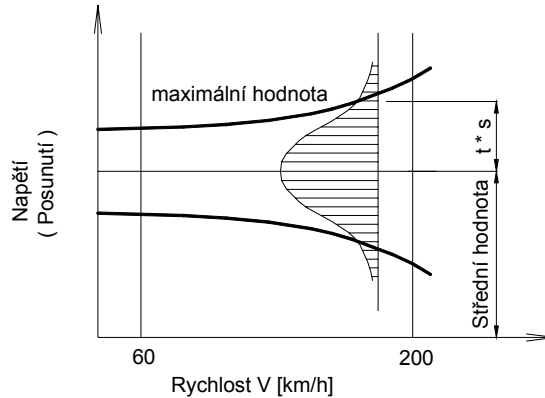
## Zdroje vibrací z hlediska vlnové délky a frekvencí



Obr. 10 – Přehled zdrojů vibrací z hlediska frekvencí a vlnových délek [56]

### 2.3.3 Vyjádření dynamických účinků dynamickým součinitelem

Z hlediska pozorování dynamických účinků měřeními v koleji bylo zjištěno, že náhodná veličina pro hodnoty napětí má normální rozložení, že střední hodnota napětí nezávisí na rychlosti vlaku a že směrodatná odchylka závisí na rychlosti vlaku.



Obr. 11 – Normální rozložení pro hodnoty napětí od ohybového namáhání v patě kolejnice

Podle Eisenmannovy teorie závisí dynamický součinitel  $\delta$  na rychlosti vlaku, kvalitě geometrických parametrů koleje a na velikosti uvažovaného intervalu vyjádřené součinitelem  $t$ :

$$\delta = 1 + t \cdot k \text{ pro rychlost } V < 60 \text{ km.h}^{-1}, \quad \delta = 1 + t \cdot k \left( 1 + \frac{V - 60}{140} \right) \text{ pro rychlost } 60 \leq V \leq 200 \text{ km.h}^{-1}$$

$$\delta = 1 + t \cdot k \cdot \varphi \text{ podle standardu Českých drah [23]}$$

$V$  ..... rychlost [km.h<sup>-1</sup>]

$t$  ..... vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou jsou dynamické účinky pokryty

$k$  ..... součinitel kvality pražcového podloží

$\varphi$  ..... součinitel ve standardu Českých drah vyjadřuje vliv rychlosti jízdy podle rychlostního pásma

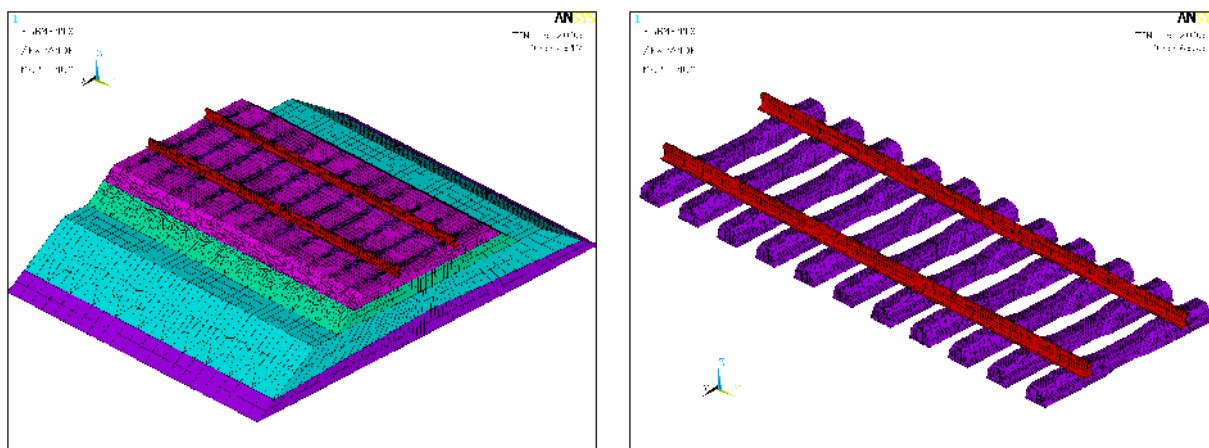


### 3 ANALÝZY A MĚŘENÍ

#### 3.1 STATICKÁ ANALÝZA PRO PŘÍČNÉ PRAŽCE

Předmětem statické analýzy byl kolejový rošt tvořený soustavou železničního svršku UIC 60 (60E1) na pražcích B 91 S. Sestaven byl prostorový model, který zahrnuje: kolejnice, upevnění kolejnic na pražci pomocí pružných svěrek typu Vossloh Skl 14, samotný pražec B 91 S včetně předpínací výztuže, kolejové lože, konstrukční vrstvu a vrstvu zeminy, vše uloženo na pružném poloprostoru. Modelován byl kolejový rošt o celkem 11 pražcích. Vzhledem k symetrii podél ose koleje a příčně na pražci, nad nímž působí kolové síly, byla do výpočtu zahrnuta pouze čtvrtina kolejového roštu. Na rovinách osy koleje a osy středního pražce byly předepsány okrajové podmínky odpovídající symetrii modelu.

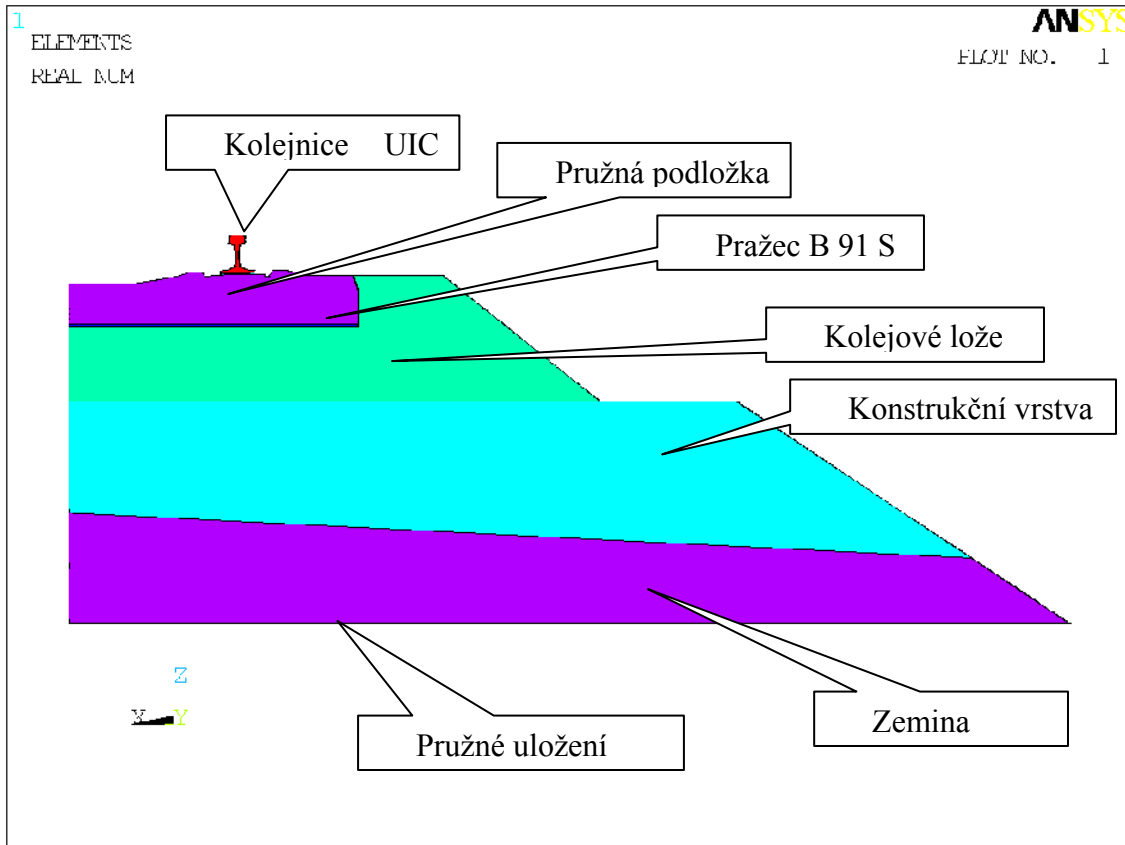
Rozložení napětí pod ložnou plochou je zásadní z hlediska namáhání kolejového lože a také z hlediska průběhu ohybových momentů v pražci. Trvalé přetváření lavičky kolejového lože pod pražcem nelze v současné době zcela věrně modelovat. Důvodem obtíží je náročnost a rozsah takového modelu, přestože základní nástroje analýzy metodou konečných prvků jsou již k dispozici. Základní obtíží je modelování nelineárních materiálových vlastností vrstev pražcového podloží. Pokud by se podařilo nelineární chování zahrnout do modelu, bylo by možné alespoň odhadnout trvalé přetváření vrstev pražcového podloží.



Obr. 12 – Model kolejového roštu metodou konečných prvků

V pražcovém podloží byly modelovány tři vrstvy – kolejové lože ze šterku, konstrukční vrstva a vrstva zeminy. Tyto vrstvy byly uvažovány uložené na prvcích, modelujících pružný Winklerův model podloží. Množství vrstev a jejich uložení bylo zvoleno s cílem postihnout skutečné charakteristiky konstrukce koleje a jejího uložení. Příčný řez modelem je na Obr. 13.

Ve výpočtu byla uvažována jediná nápravová síla o velikosti 250 kN odvozená z normového zatěžovacího vlaku. Vzhledem k tomu, že nebylo možné modelovat nelineární vlastnosti kolejového lože kvůli numerické nestabilitě výpočtu, bylo upuštěno od násobení kolových sil dynamickým součinitelem. Pro železniční kolo s ploškou na jízdni ploše může rázové zatížení tvořit několiknásobek původní hodnoty. Ráz tohoto typu však působí ve velmi krátkém okamžiku a jeho dynamické působení, rozložení energie v železničním svršku a tlumení vibrací nebylo možné v modelu postihnout. Z analýz dynamického chování konstrukce koleje je zřejmé, že působení rázů při frekvencích vyšších jak první vlastní frekvence konstrukce koleje není možné chování konstrukce postihnout pomocí dynamického součinitele [55].



Obr. 13 – Příčný řez modelem

Výpočet byl proveden pro dva zatěžovací stavy:

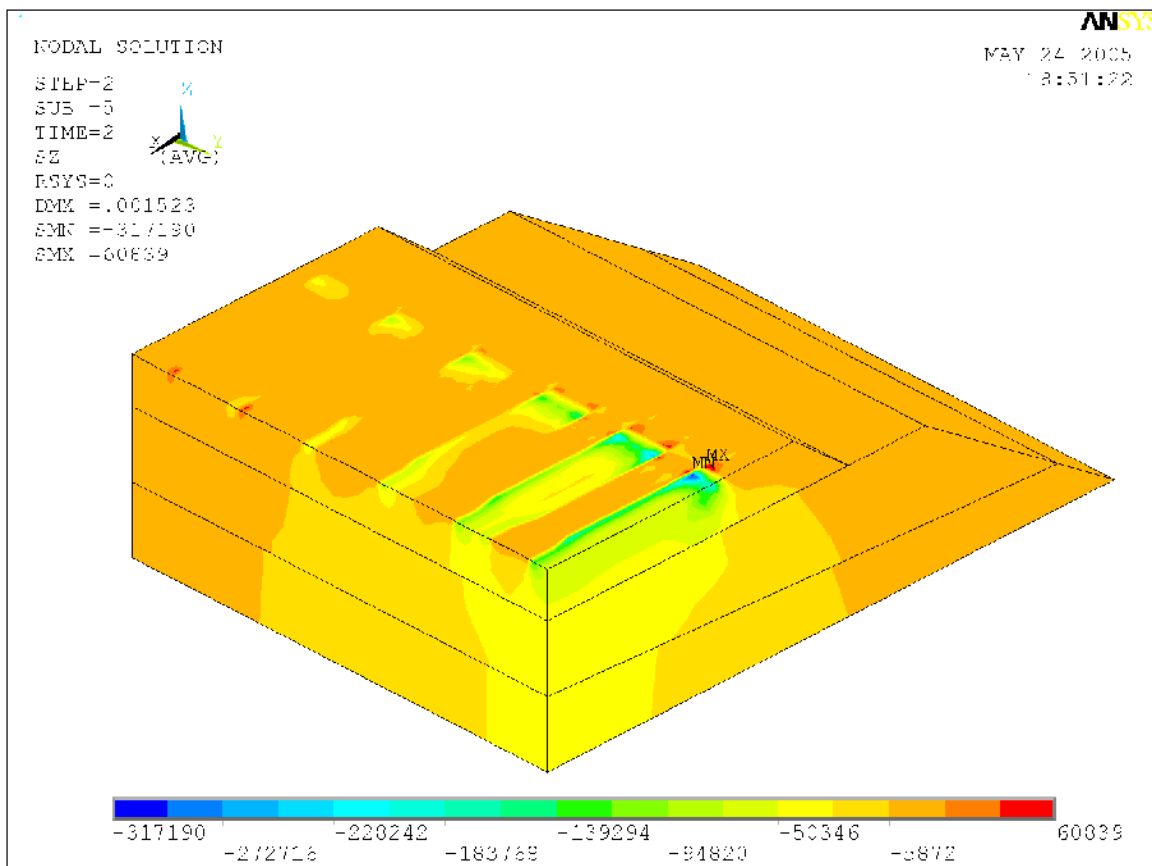
1. Vlastní tíha a předpětí betonu pražce, svěrná síla svěrek.
2. Vlastní tíha, předpětí betonu pražce, svěrná síla svěrek, nápravná síla.

### 3.1.1 Vyhodnocení výsledků

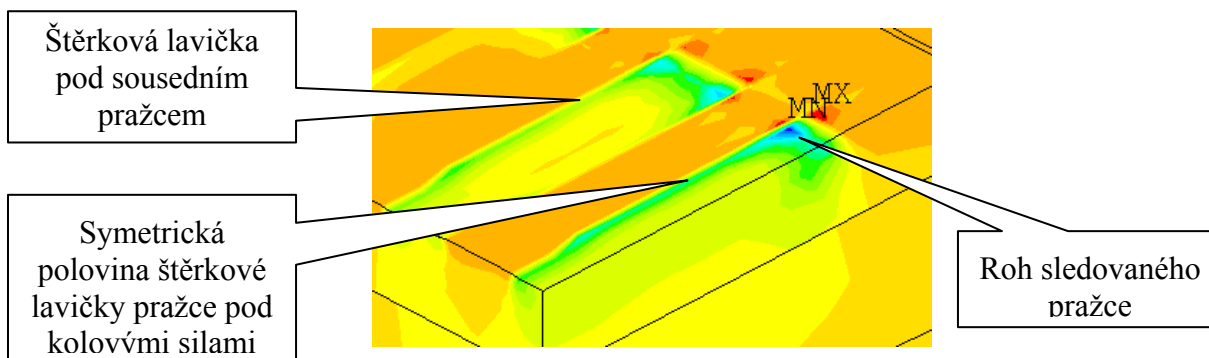
Všechna vyobrazení jsou ponechána pro symetrickou čtvrtinu modelu kolejového roštu. Zatěžovací stav 1 byl důležitý zejména s ohledem na stanovení výsledného poklesu od kolové síly, protože umožňuje odečtení poklesů zejména pro kolejnice. Svislé posuny pro kolejnice byly realizovány v souladu s teoretickými předpoklady na přibližně 5 pražcích směrem od působící nápravné síly.

Pro všechny varianty výpočtu bylo hodnoceno namáhání kolejového lože formou hodnocení napětí, které v něm vzniká pod pražcem, protože s tím souvisí také poklesy šterkové lavičky a poklesy celého kolejového roštu.

Z Obr. 14 a Obr. 15 je zřejmé, že rozložení napětí pod pražcem na šterkové lavičce podle statické analýzy je charakteristické posunem extrémních napětí pod rohy pražců. Maximální hodnoty jsou přitom relativně vysoké – pro uvažované zatížení bez dynamického součinitele více jak 300 kPa. Tyto dva výsledky jsou mimořádně důležité pro pochopení vývoje uložení pražce v kolejovém loži.



Obr. 14 Vyhodnocení pražcového podloží – normálové napětí ve svislém směru  $\sigma_z$  [Pa]



Obr. 15 – Detail rozložení napětí na štěrkové lavičce

Lze předpokládat, že při zvýšeném dynamickém namáhání dojde k přetvoření štěrkové lavičky. Výše uvedené výsledky budou platné pouze pro počáteční stav bezprostředně po zřízení koleje a po podbití pražců. Přetvořením lavičky bude změněno podepření tak, aby docházelo k rovnoměrnějšímu namáhání kolejového lože. Při průjezdu nápravy dochází k dotlačování pražce na kolejové lože. V extrémním případě dojde k takovému přetvoření štěrkové lavičky, že se pod pražcem rozvine volný prostor tak, jak bylo popsáno [12].

### 3.1.2 Shrnutí statické analýzy příčného pražce

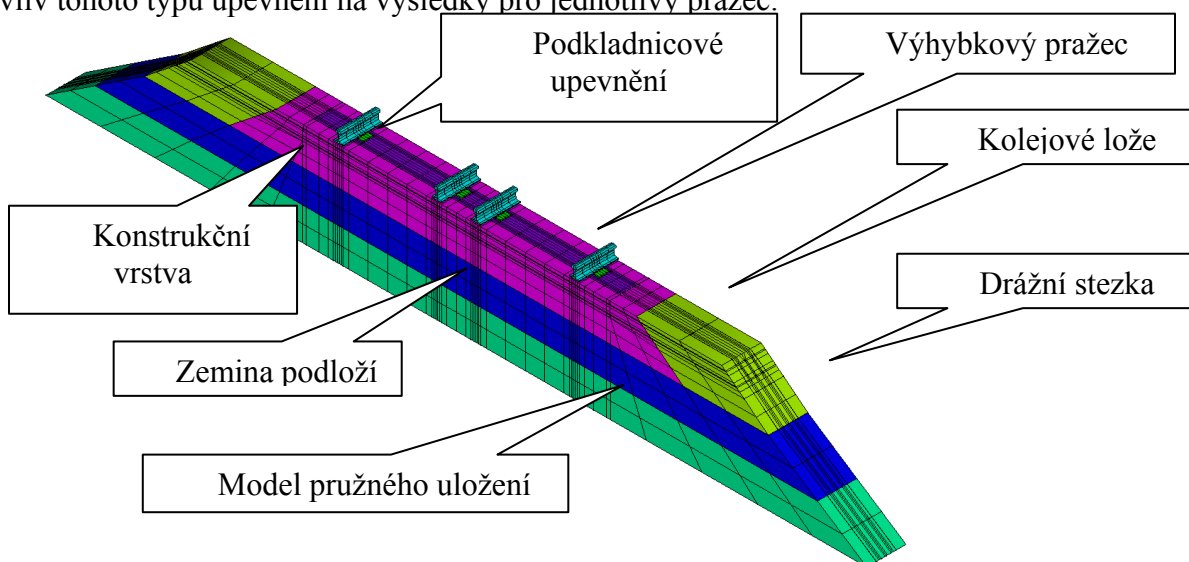
Ze statické analýzy namáhání betonových pražců a kolejového lože vyplývá, že rozložení napětí na lavičce kolejového lože není rovnoměrné, pod konci pražců je výrazně vyšší a maximální hodnoty se soustředí pod rohy pražců.

### 3.2 STATICKÁ ANALÝZA PRO VÝHYBKOVÉ PRAŽCE

Statická analýza dlouhého výhybkového pražce byla uskutečněna s cílem objasnit příčiny vady polohy pražců, které byly popsány v kapitole Poklesy a průhyby výhybkových pražců. Výsledky rozšiřují znalosti o chování pražců v kolejovém loži a chování dlouhých nesymetricky zatížených pražců. Výsledky analýzy byly použity pro srovnání s měřením pohybů pražců v kolejovém loži.

Model pro analýzu chování výhybkového pražce byl sestaven analogicky jako model pro příčné pražce. Vzhledem ke komplikovanosti modelu roštu srdcovkové části výhybky byl modelován pouze jediný pražec. Rozsah modelu celé srdcovky v době uskutečnění analýzy byl nad možnosti výpočetní techniky a software. Pro tuto analýzu byly použity obecné závěry statických analýz kolejového roštu, zejména s ohledem na sílu připadající na jeden pražec.

Předmětem statické analýzy metodou konečných prvků byl betonový pražec VPS (ST.I.ARM) délky 4,6 m uložený v kolejovém loži. Pražce této délky se nacházejí za srdcovkou výhybky a vady polohy pražců jsou pro ně typické. Základní odlišností modelu vůči statické analýze příčného pražce bylo použití podkladnicového upevnění. Vzhledem k funkci upevnění nebyl očekáván vliv tohoto typu upevnění na výsledky pro jednotlivý pražec.



Obr. 16 – Celkový pohled na model pro dlouhý výhybkový pražec

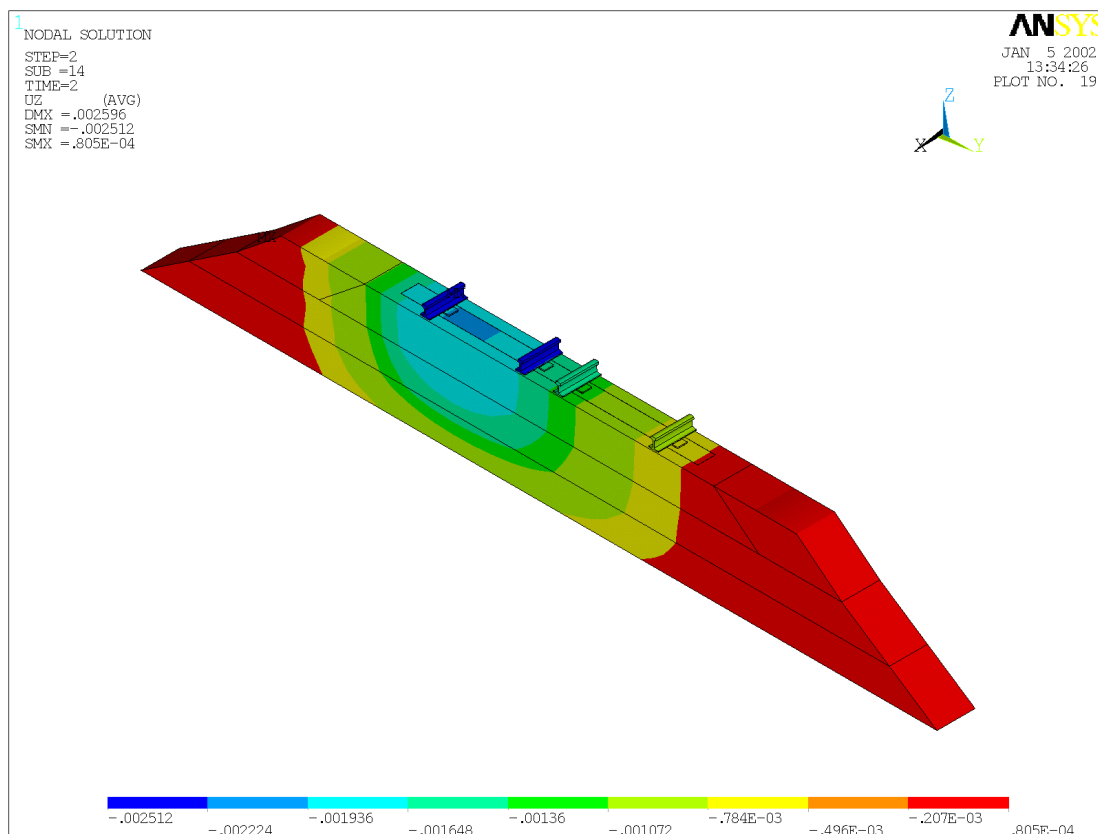
#### 3.2.1 Vyhodnocení výsledků

Přehled celkových svislých zatlačení pod nápravovým tlakem poskytl informace o svislých pohybech pražce pod jedoucí nápravou. U kolejového lože byly hodnoceny především tyto parametry: svislé posunutí  $u_z$  v milimetrech, napětí  $\sigma_z$  v kPa, tj. normálové napětí ve svislém směru, a napětí  $\sigma_3$  v kPa, tj. třetí hlavní napětí (tlakové). Přehled svislého zatlačení a normálového napětí ve svislém směru je na Obr. 18.

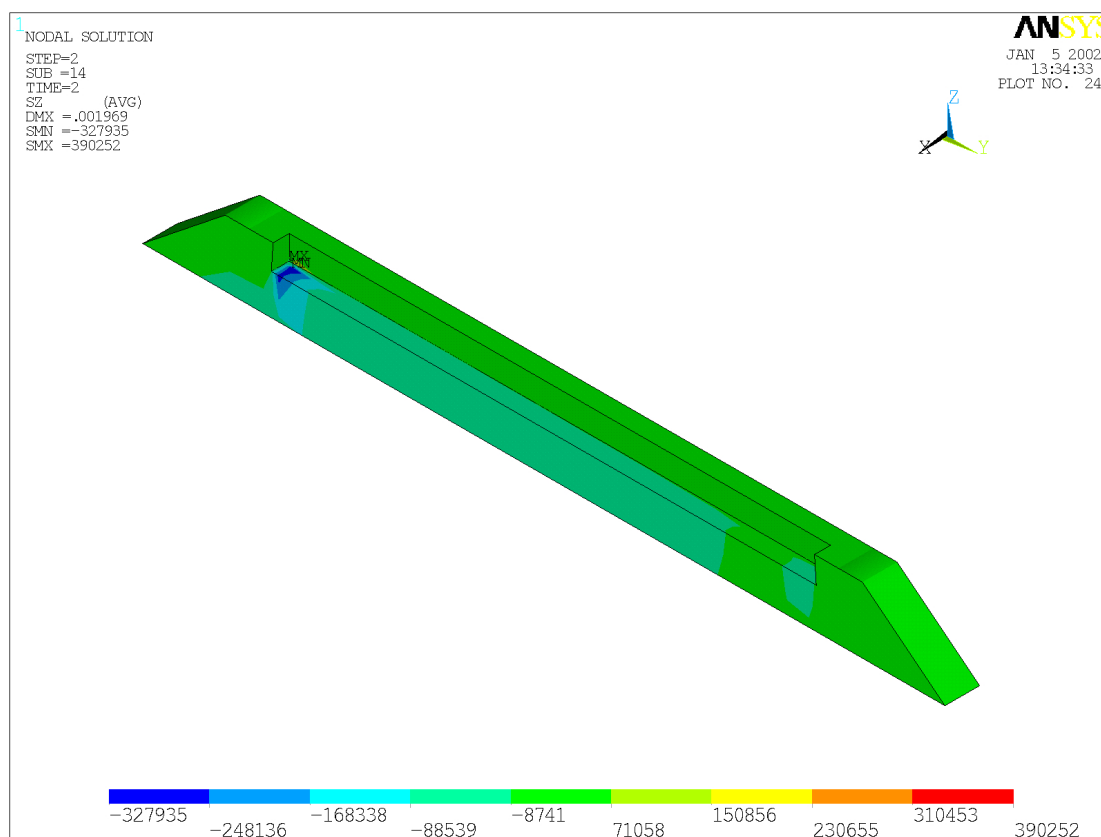
Z Obr. 18 je zřejmé, že maximální hodnoty tlakových napětí vznikají ve svislém směru bezprostředně pod koncem pražce. Oblasti maximálního namáhání jsou omezeny na velmi krátkou oblast za čelem pražce, řádově do 15 cm. Tento závěr odpovídá statické analýze pro příčný pražec.

#### 3.2.2 Shrnutí statické analýzy výhybkového pražce

Ze statické analýzy namáhání betonového výhybkového pražce a kolejového lože vyplývá, že rozložení napětí na lavičce kolejového lože není rovnoměrné a pod koncem pražce pod pojížděnou větví je výrazně vyšší a maximální hodnota se soustředí pod roh pražce. Dále bylo zjištěno, že napětí v kolejovém loži v oblasti nejvyššího namáhání je tak vysoké, že může při dynamickém namáhání dojít k trvalému přetvoření lavičky kolejového lože.



Obr. 17 – Svislé posuny  $u_z$  celého modelu



Obr. 18 – Vyhodnocení kolejového lože (symetrická polovina) – normálové napětí ve svislém směru  $\sigma_z$  [Pa]

### 3.3 MĚŘENÍ PŘÍČNÝCH PRAŽCŮ V KOLEJI

Měření se soustředila na celý kolejový rošt i pražcové podloží. Předmětem měření bylo: silové působení vozidla na kolej, tj. kolové síly  $Q$  a vodící síly  $Y$ , pohyby kolejnice v uzlu upevnění – svislé i příčné, svislé pohyby betonových pražců, zrychlení vibrací kolejnic, pražců a kolejového lože.

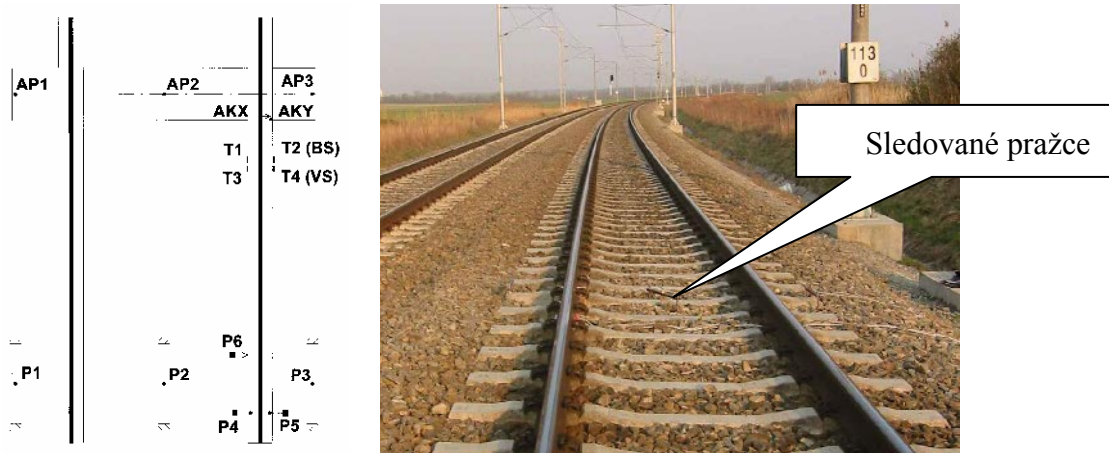
Měření příčných betonových pražců se uskutečnila v průběhu několika let počínajíc rokem 1996. Uvedené parametry nebyly měřeny v jednom místě všechny. Měření betonových příčných pražců bylo rozloženo do více lokalit: žst. Roudnice nad Labem, žst. Moravský Písek a mezistaniční úsek Šakvice – Vranovice. Za zásadní v tomto směru je možné považovat měření v poslední uvedené lokalitě v mezistaničním úseku Šakvice – Vranovice. Měřičský úsek byl založen v kružnicovém oblouku o poloměru 2250 m s přechodnicí a s lineární vzestupnicí v oblasti km 113,0 tratě Břeclav – Brno. V uvedené lokalitě byl použit železniční svršek soustavy UIC 60 na betonových pražcích, bezpodkladnicové upevnění typu Vossloh, kolejové lože bylo tvořeno drceným kamenivem frakce 32/63 v tloušťce 350 mm pod ložnou plochou pražce.

#### 3.3.1 Popis měřicího zařízení a metod měření

K měření svislých pohybů příčných pražců byly použity indukčnostní snímače posunutí. Použity byly vždy 3 snímače, které byly umístěny na hlavách pražce bezprostředně za čelem a ve středu pražce. Snímače posunutí byly uchyceny v přípravných upevněných na rámu tvořeném dvěma ocelovými tyčemi dl. 80 cm průměru 20 mm zatlučenými do kolejového lože a ocelovým nosníkem dl. 70 cm. Osová vzdálenost mezi tyčemi byla 60 cm, v kolejovém loži byly zatlučeny do hloubky 65 cm.

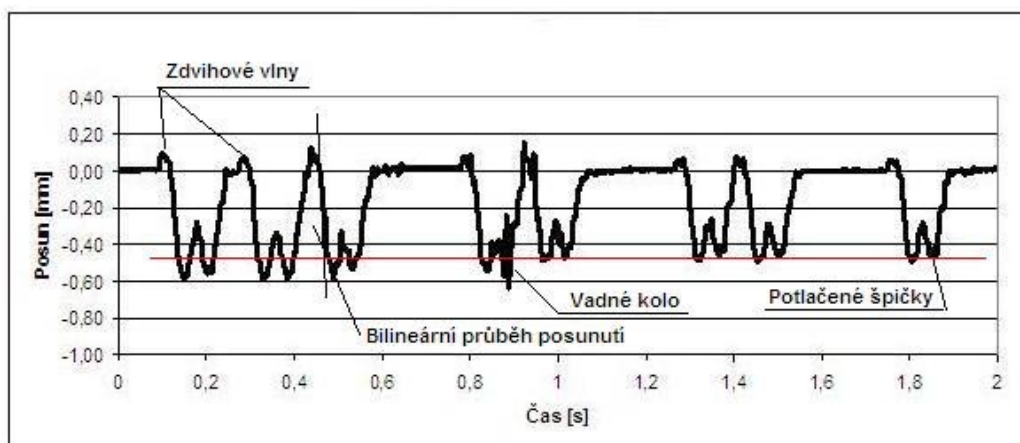
Podobně byly měřeny posuny kolejnice v uzlu upevnění. K měření byly použity indukčnostní snímače posunutí s rozsahem do 1 mm. Snímače byly umístěny na izolačních přípravných vyfrézovaných z textitu a přilepených na boční stěnu pražce lepidlem.

K měření svislých zrychlení vibrací byly použity piezoelektrické snímače, které byly upevňovány na úchytky lepené na měřená místa. V některých případech byly pro měření zrychlení na pražcích použity kapacitní snímače lepené včelím voskem. Snímače byly osazeny jak na kolejnici, tak na pražci. Na kolejnici byla sledována zrychlení vibrací ve svislém směru a ve směru kolmém na osu koleje, na pražcích byla měřena pouze svislá zrychlení. Na kolejnici byly umístěny snímače k identifikaci kolových a vodících sil. Cílem měření bylo stanovit namáhání železničního svršku a jeho dynamickou odezvu na průjezd vlaku při vysoké rychlosti. Měření se proto uskutečnila v rámci zkušebních jízd rychlostí 200 km.h<sup>-1</sup>.



Obr. 19 – Schéma rozmístění snímačů při měření železničního svršku

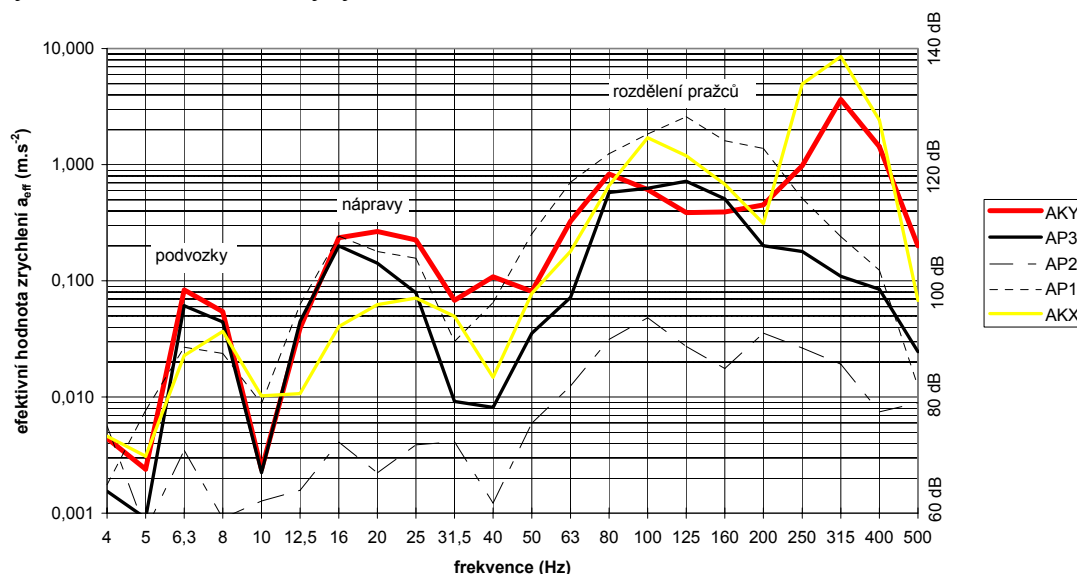
V záznamu snímače P1 byly patrné zajímavé detaily na průběhu svislého posunu pro jednotlivé nápravy. Pro vyšší kolové síly odpovídající nápravám hnacího vozidla a prvního vozu je zřetelný bilineární průběh svislého posunu. Pro nižší kolové síly odpovídající nápravám druhého a třetího vozu jsou patrné široké lokální extrémy. Průběh posunutí snímače P1 je možné vysvětlit postupným dotlačováním pražce po jeho délce na lavičku kolejového lože. Pod pražcem je v této části již trvale přetvořená lavička kolejového lože. Zajímavá je také skutečnost, že tento jev byl pozorován pro vnitřní stranu koleje ve smyslu směrového zakřivení v oblouku. Nákladní vlaky jedoucí rychlostí  $V = 80 \text{ km.h}^{-1}$  projíždějí oblouk s přebytkem převýšení  $E = 39 \text{ mm}$ . Působí tak vysokými kolovými silami na vnitřní kolejnicový pás.



Obr. 20 – Průběh svislých posunů pražce pro snímač P1

Vypočtené hodnoty svislých posunů na koncích pražce vůči pláni tělesa železničního spodku byly 0,2 až 0,25 mm. Skutečně zjištěné hodnoty byly dvoj až trojnásobné. Tato skutečnost zapadá do všech předchozích konstatování o přetvoření lavičky kolejového lože tak, že pražec je při průjezdu nápravy postupně dotlačován na své podepření.

Signály zrychlení vibrací byly vyhodnoceny v časové oblasti a ve frekvenční oblasti. Frekvenční spektra byla počítána pomocí algoritmu FFT – rychlé Fourierovy transformace. Dále byly sestaveny třetino-oktávové analýzy.



Obr. 21 – Třetino-oktávová analýza svislého zrychlení vibrací pro průjezd zkušební soupravy, rychlost  $V = 200 \text{ km.h}^{-1}$

### 3.4 MĚŘENÍ VÝHYBKOVÝCH PRAŽCŮ V KOLEJI

V roce 2004 a 2005 proběhla rozsáhlá měření svislých pohybů výhybkových pražců. Tato měření se uskutečnila jednak v žst. Choceň, jednak v žst. Staré Město u Uherského Hradiště. Z výsledků měření v roce 2004 a z interpretace těchto výsledků byla získána základní představa o chování výhybkových pražců v kolejovém loži. Aby bylo možné zachytit změny v uložení pražců, ke kterým dochází během provozu, měření pokračovala v roce 2005. Ze stejného důvodu byla měření z roku 2004 doplněna o měření zrychlení vibrací ve svislém směru.

Měření bylo zamýšleno tak, aby byly měřeny jednak pražce ve výhybce zcela nově vložené, a to bezprostředně po vložení, jednak pražce ve výhybce dříve zřízené. Obě výhybkové konstrukce bylo zamýšleno měřit ve více etapách. Jako nová výhybka byla vybrána výhybka v žst. Choceň, jako výhybka již projížděná výhybka v žst. Staré Město u Uherského Hradiště. Měření u obou výhybek byla zahájena ve stejném kalendářním týdnu, ve kterém byly podbíjeny.

Výhybka č. 64 v žst. Choceň je výhybka J60-1:9-300-Lpb. Ve výhybce je podkladnicové upevnění kolejnic typu Vossloh se svěrkami Skl 12 (upevnění typu KS), srdcovka je typu zkrácený monoblok. Výhybka č. 31 v žst. Staré Město u Uherského Hradiště je výhybka J60-1:12-500-I-Lpb.

Pražce byly vybrány tak, aby pokrývaly celou škálu délek výhybkových pražců ve střední a srdcovkové části výhybky. Vybrány byly tyto pražce: dl. 3,3 m ve střední části výhybky, dl. 4,0 m pod srdcovkou a dl. 4,5 m za srdcovkou výhybky. Pro obě výhybky, přestože byly různých typů, byly zvoleny pražce stejných délek tak, aby bylo možné výsledky porovnat.

Měření poklesů pražců se uskutečnila od podbití pražců v průběhu jednoho roku provozu, v žst. Choceň pro výhybku vloženou v roce 2004 ve čtyřech termínech, v žst. Staré Město u Uherského Hradiště pro výhybku vloženou v roce 2003 ve třech termínech.

#### 3.4.1 Vyhodnocení svislých pohybů výhybkových pražců

Celý záznam pro průjezd vlaku byl podroben vyhodnocení z hlediska poklesů pod jedoucí nápravou nebo podvozkem. Vzhledem k množství projíždějících náprav podvozků nebylo možné signály vyhodnocovat ručně. Z tohoto důvodu byl pro hodnocení signálů vyvinut speciální software pro hodnocení špiček signálů – PeakDetector.

#### 3.4.2 Shrnutí poznatků

Při všech měřeních výhybkových pražců byly zjištěny nežádoucí změny v podepření pražců pod samotným hrotem srdcovky, které se projevují vysokými svislými pohyby pražce v jeho středu. Pod hlavami pražců byly identifikovány četné volné prostory mezi ložnou plochou a lavičkou kolejového lože.

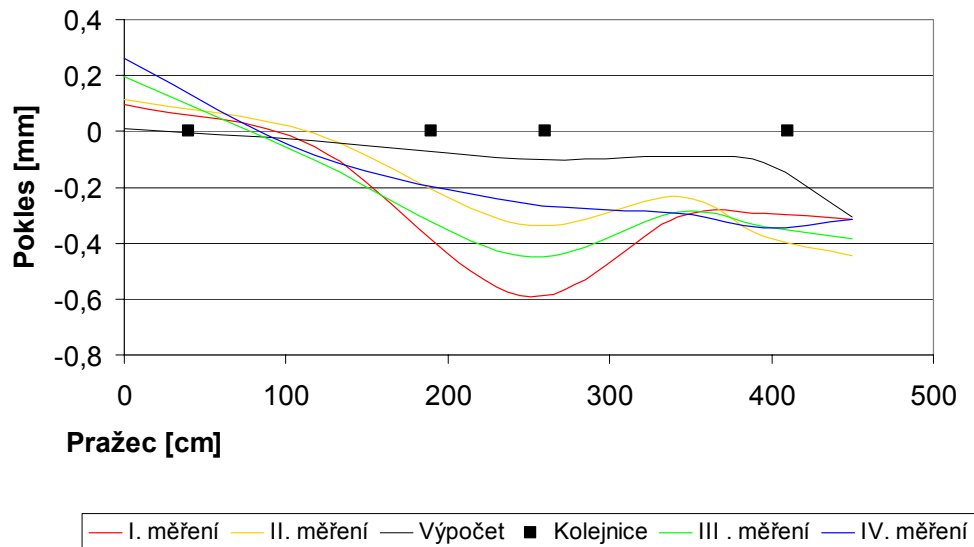
Na chování dlouhých betonových pražců má vliv také doba konsolidace a působící provozní zatížení. Tento vliv se projevil v žst. Staré Město u Uherského Hradiště, kde se podepření pražců jeví rovnoměrnější oproti výhybce v žst. Choceň. S výjimkou odbočné větve výhybky nebyly pozorovány volné prostory mezi ložnou plochou pražce a lavičkou kolejového lože. Výhybka se jeví z hlediska podepření pražců stabilnější. Srovnání obou lokalit, včetně porovnání s výsledky výpočtů metodou konečných prvků jsou na Obr. 22 a Obr. 23.

Je zřejmé, že chování dlouhého výhybkového pražce 15–073 v žst. Staré Město u Uh.Hr. se více blíží předpovídanému podle výpočtu. Celkové posuny jsou však vyšší. U pražce 13–056 se průhybová křivka výrazně odlišuje od předpovídané, což je možné přičíst na vrub změně technologie podbíjení. Na křivce je však patrný trend, při jehož pokračování se i zde křivky přiblíží teoreticky vypočtené. Dobře si však odpovídají největší poklesy hlavy pražce pod přímou větví výhybky.

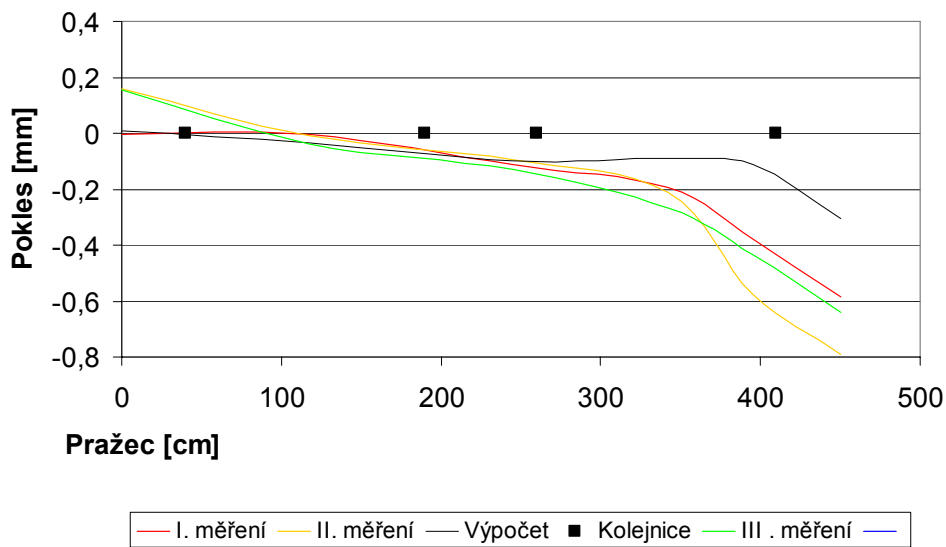
Z hlediska měření svislých zrychlení vibrací je celkově možné konstatovat, že účinky vibrací byly nižší v žst. Staré Město u Uherského Hradiště. Tato skutečnost souvisí s lepším stavem kole-



jové jízdní dráhy včetně podepření pražců v kolejovém loži a s nižšími rychlostmi vlaků. Vyloučit nelze ani vliv jiného typu upevnění kolejnic. V žst. Choceň se v parametrech vibrací projevovaly vlivy podepření pražců, v žst. Staré Město byly nejvýraznějšími vlivy stav jízdních ploch kol a běžné nepravidelnosti pojezděné plochy kolejnic.



Obr. 22 – Svislé posuny pražce 13-056 v žst. Choceň



Obr. 23 – Svislé posuny pražce 15-073 v žst. Staré Město u Uherského Hradiště

Obecně je možné konstatovat, že dynamické účinky, které rostou s rychlostmi vlaků, vedou pod konci pražců a pod hrotem srdcovky k vysokému namáhání kolejového lože. Toto vysoké namáhání způsobuje výškové deformace šterkové lavičky. Pod hlavami pražců a pod hrotem srdcovky zůstávají v klidovém stavu volné prostory v rozsahu 0,1 až 0,4 mm. Při průjezdu vlaku jedoucí náprava dotlačuje pražec na lavičku kolejového lože. Podle velikosti působící kolové síly může, ale nemusí být pražec úplně dotlačen ložnou plochou na lavičku kolejového lože.

Změny v uložení pražce se projeví i v dlouhodobé poloze pražců. Poloha pražce z dlouhodobého hlediska následuje tvar šterkové lavičky. Důležitým závěrem uvedených měření je, že převážující příčinou pro nežádoucí změny v poloze pražců jsou způsobeny vysokým namáháním kolejového lože, které se přetváří.

### 3.5 MĚŘENÍ NAPĚTÍ V PRAŽCOVÉM PODLOŽÍ VE VÝHYBCE

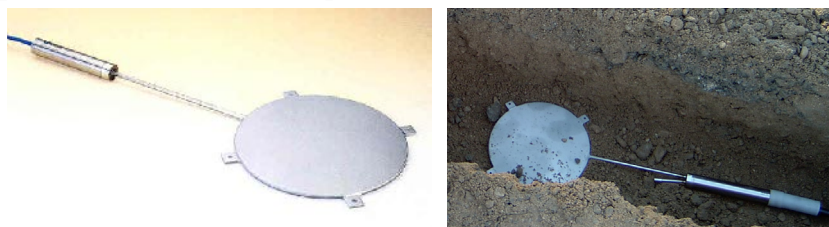
Teoretické předpoklady rozložení napětí v konstrukci kolejové jízdní dráhy byly diskutovány v kapitole Namáhání kolejového lože a zemního tělesa. Tyto předpoklady byly ověřeny praktickými měřeními.

#### 3.5.1 Metodika měření

Předmětem měření bylo měření napětí v konstrukci pražcového podloží v prototypové výhybce č. 5 v žst. Vranovice typu J60-1:12–500 s pohyblivým hrotem srdcovky. Protože se jedná o výhybkovou konstrukci určenou pro poježdění rychlostí až  $300 \text{ km.h}^{-1}$ , má výhybková konstrukce upraven jízdní profil kolejnic LOTS 136 (odpovídá kolejnicím v úklonu 1:40).

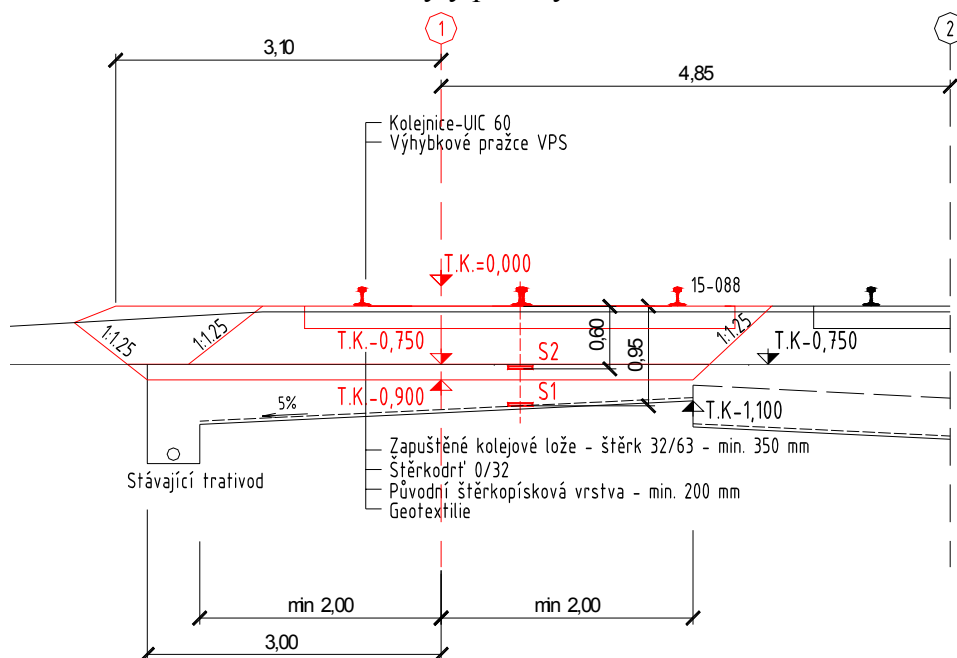
K měření byly použity speciální tlakové snímače, které byly vloženy do konstrukce pražcového podloží v průběhu stavebních prací. K měření normálového napětí v konstrukci pražcového podloží byly zvoleny talířové snímače výrobce GEOKON. Tyto snímače jsou plněny olejem a změna tlaku je převáděna na výstupní elektrický signál v rozsahu napětí 0–5 V. K měření byly na základě předběžné analýzy podle teorie zvoleny snímače:

- pro zemní pláň s rozsahem do 100 kPa,
- pro pláň tělesa železničního spodku 250 kPa.



Obr. 24 – Tlakový snímač řady 3500 firmy Geokon

V každém sledovaném bodě byly umístěny dva snímače – jeden na zemní pláni, druhý bezprostředně pod plání tělesa železničního spodku, viz Obr. 25. Při ověřovacím měření bylo zjištěno, že snímač pod plání tělesa železničního spodku ve výměnové části výhybky byl poškozen. V dalším nebyl tento snímač sledován a k měření byly použity celkem tři snímače.

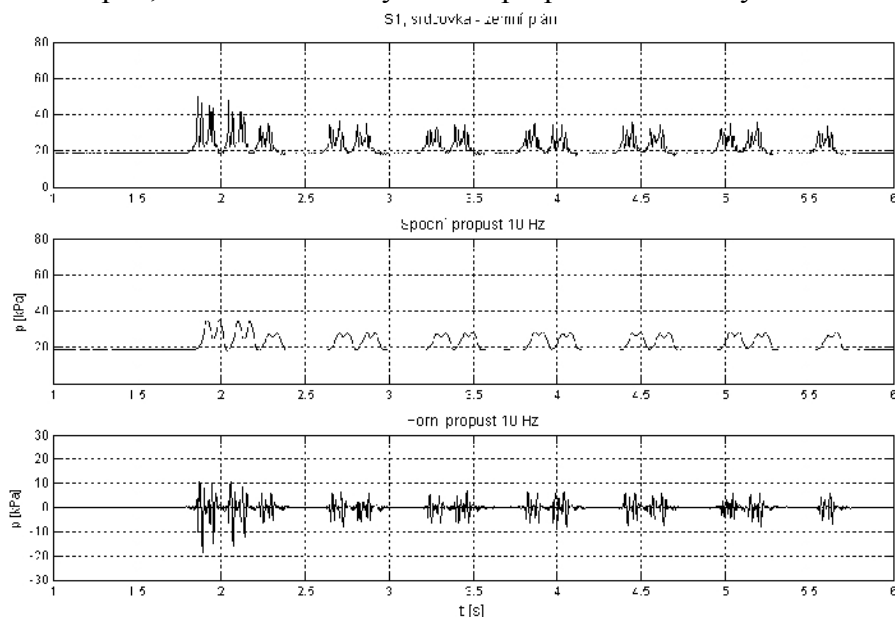


Obr. 25 – Řez výhybkovou konstrukcí pod hrotem srdcovky, snímače S1 a S2

### 3.5.2 Vyhodnocení signálů

Geostatické napětí pro všechny tři snímače dobře odpovídá podmínkám, ve kterých byly snímače uloženy. Pro pláš tělesa železničního spodku je vypočtené geostatické napětí přibližně 5 kPa, pro zemní pláš přibližně 20 kPa. Zaznamenané signály byly vyhodnoceny z hlediska největšího zjištěného napětí v průběhu průjezdu vlaku. Pro hodnoty největšího zjištěného napětí při průjezdu vlaku byly sestaveny popisné statistiky samostatně pro všechny etapy měření.

Vybrané signály (pokrývaly všechny typy vlaků) byly rozloženy na kvazistatickou a dynamickou složku. Na Obr. 26 je původní záznam, záznam filtrovaný s dolní propustí 10 Hz – kvazistatická složka napětí, záznam filtrovaný s horní propustí 10 Hz – dynamická složka.



Obr. 26 – Rozložení signálu na kvazistatickou a dynamickou složku

Dynamický přírůstek činí pro zemní pláš přibližně 1,3násobek kvazistatické hodnoty, pro pláš tělesa železničního spodku až 2,0násobek.

### 3.5.3 Závěry měření napětí v pražcovém podloží

Z měření a vyhodnocení vyplynuly tyto závěry:

- hodnoty napětí v absolutní hodnotě pod srdcovkou na pláni tělesa železničního spodku dosahují až 150 kPa; očekávané statické hodnoty zjištěné výpočtem a statickou analýzou jsou 50 kPa a dobře odpovídající měření; tyto statické hodnoty díky dynamickému přírůstku jsou výrazně překročeny,
- hodnoty extrémního napětí při průjezdu vlaku se pro jednotlivé etapy od sebe statisticky odlišují, pro snímače na zemní pláni byl prokázán nárůst měřených napětí o cca 20 až 40 %, pro snímač na pláni tělesa došlo k nárůstu až o 85 %,
- nárůst hodnot napětí pod všemi snímači připadá na vrub dynamické složce napětí,
- napětí v konstrukci pražcového podloží ne příliš závisí na rychlosti vlaku, s rostoucí rychlostí vlaku mírně roste i měřené napětí.

Celkově lze konstatovat, že s projetým provozním zatížením dochází ke zvyšování hodnot napětí v konstrukci pražcového podloží, pod srdcovkou s pohyblivým hrotem je výrazné zvýšení na vrub dynamických přírůstků hodnot napětí. V průběhu měření byly ověřeny předpoklady o průběhu napětí v pražcovém podloží i předpoklady o dynamických účincích a jejich závislosti na rychlosti vlaku.

## 4 DOPORUČENÍ A OPATŘENÍ

### 4.1 SNIŽOVÁNÍ DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ POMOCÍ PRUŽNÝCH PRVKŮ V KONSTRUKCI KOLEJE

Vyhodnocení statických analýz a měření betonových příčných a výhybkových pražců vedla k závěru, že příčinou potíží s polohou vad pražců je vysoké namáhání kolejového lože. Proto je nutné nalézt takové technické řešení, které povede k ochraně kolejového lože před extrémním namáháním. Tato kapitola je věnována současným zkušenostem evropských železničních správ s použitím pražců z předpjatého betonu opatřených na ložné ploše podpražcovými podložkami. V dalším textu budou tyto pražce označovány jako pražce s pružnou ložnou plochou.

V souvislosti se zvyšováním rychlostí na železničních tratích se rozvíjejí dynamické účinky působící na konstrukci koleje. Tyto účinky nepříznivě působí na kolej a vedou k rozvoji poruch a závad. Tyto vady se zpravidla projevují rozpadem geometrických parametrů koleje, což následně vede k opětovnému zvyšování dynamických účinků. Opakovaná oprava prostorové polohy koleje mívá malou trvanlivost, téměř vždy se kolej v krátkém časovém období navrácí k původnímu stavu a rozvoj vady pokračuje mnohdy rychlejším tempem než bez opravného zásahu.

Vady tohoto typu zpravidla souvisejí se stabilitou vrstev pražcového podloží. Nejvíce namáhanou vrstvou je kolejové lože, které se podílí na tlumení vibrací jen malou měrou [45]. Zavedení betonových pražců vykazující relativně vysokou ohybovou tuhost vedlo ke změně v rozložení namáhání kolejového lože pod pražcem. Teoretickými analýzami bylo prokázáno, že oblasti největšího namáhání pro betonové pražce se nacházejí pod konci pražců. Tyto skutečnosti vedou k poklesu šterkové lavičky pod koncem pražce a přerozdělení napětí pod pražcem. Pražce jsou v mnoha případech podpírány především ve střední části a pod konci pražců vznikají volné prostory. U nesymetricky namáhaných dlouhých výhybkových pražců tento jev může vést k nežádoucím jednostranným poklesům, které se projeví převýšením koleje.

Dynamické účinky nepříznivě ovlivňují všechny nehomogenity v tuhosti kolejové jízdní dráhy. Výhybkové konstrukce jsou charakteristické těmito nehomogenitami, protože po délce výhybky se mění délky pražců a jejich rozdělení. Markantní je tento jev na přechodu mezi posledním nejdelším pražcem za výhybkou a prvním krátkým pražcem v přípoji výhybky.

Řešení uvedených jevů spočívá ve snižování statického a dynamického zatížení a v úpravách dynamických vlastností soustavy vozidlo – kolej. Do koleje se vkládají pružné prvky, které snižují tuhost kolejové jízdní dráhy, přičemž se kolové síly příznivěji roznáší na delším úseku koleje. Na jeden pražec pak připadá menší část kolové síly. Za tímto účelem se vkládají zejména pružné podložky pod podkladnice ve výhybkových konstrukcích.

Dynamické účinky se projevují hlukem a šířením vibrací v podloží. Protože se vibrace v konstrukci železničního svršku tlumí jen omezeně, vkládá se oddělující pružná vrstva na pláň tělesa železničního spodku. Podšterkové rohože oddělují vibrace v železničním svršku od zemního tělesa. Nevýhodou podšterkových rohoží je jejich vysoká cena a ztížená možnost hutnění kolejového lože.

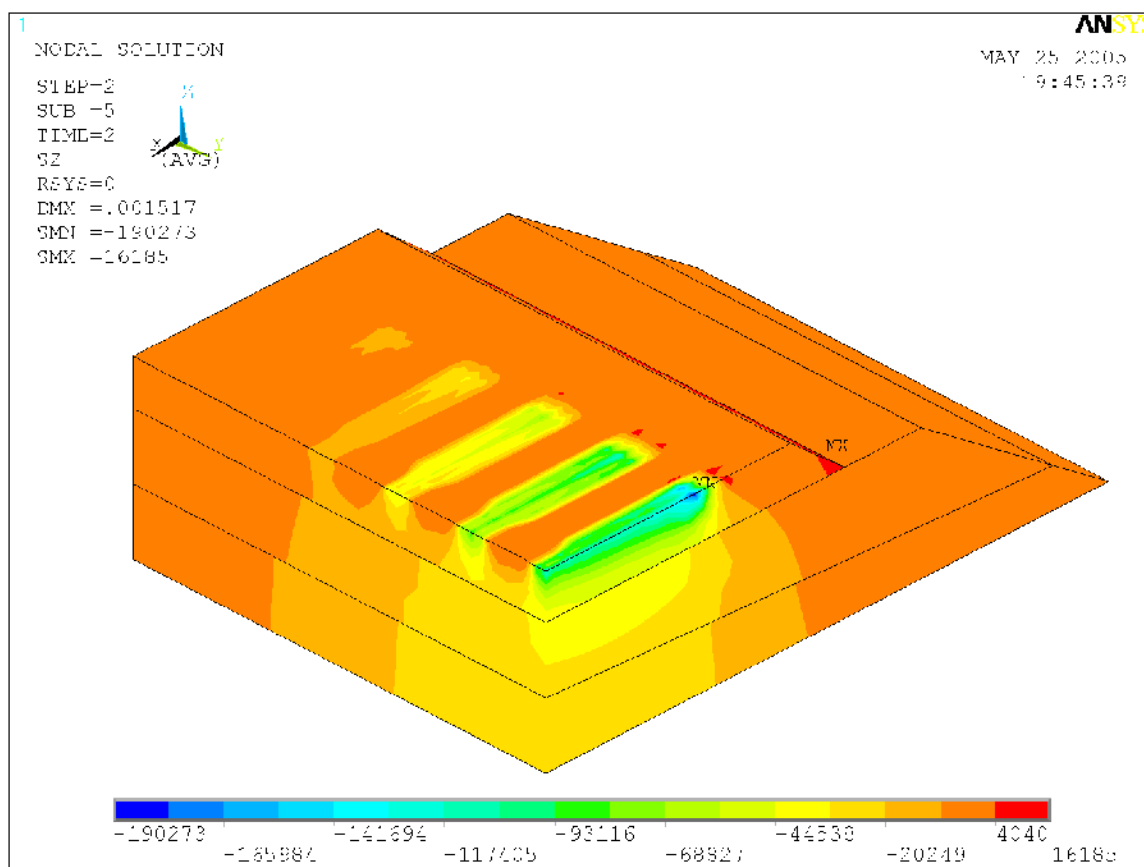
Uvedené nové prvky konstrukce kolejové jízdní dráhy se samy o sobě podílejí na tlumení vibrací jen malou měrou. Mají však výrazný vliv na celkové vlastnosti dynamické soustavy vozidlo – kolej. Při vhodné volbě tuhostí se energie vibrací spotřebuje na kmitání hmot součástí železničního svršku, které však musí být schopny tomuto kmitání vzdorovat.

Další možností, kam vložit pružný prvek do konstrukce železničního svršku a snížit tuhost kolejové jízdní dráhy, je ložná plocha pražce. Výhoda použití pražců s pružnou vrstvou na ložné ploše pražce spočívá v příznivějším roznosu namáhání na lavičku kolejového lože, protože se zvyšuje plocha, na níž je pražec podepřen. Toto opatření dále odděluje kmitání pražců od kolejového lože a tlumení vibrací se přesouvá v konstrukci koleje výše.

## 4.2 STATICKÁ ANALÝZA PRAŽCŮ S PRUŽNOU LOŽNOU PLOCHOU

Předmětem statické analýzy byly pražce B 91S opatřené pružnou podložkou na ložné ploše. Cílem výpočtu bylo porovnat statické vlastnosti pražců s pružnou ložnou plochou různé tuhosti a různých tloušťek s pražcem bez pružné ložné plochy. Výpočet byl proveden metodou konečných prvků pomocí stejného modelu, jako pro statickou analýzu příčných pražců. Pod pražcem přibyla vrstva prvků modelující podpražcovou podložku. Ostatní části modelu včetně rozměrů zůstaly beze změny.

Pro všechny varianty výpočtu hodnoceno především namáhání kolejového lože formou hodnocení napětí, které v něm vzniká pod pražcem. S tím souvisejí také poklesy šterkové lavičky a poklesy celého kolejového roštu. Výsledné namáhání šterkových laviček pod ložnými plochami pražců je na Obr. 27.



Obr. 27 – Svislé napětí  $\sigma_z$  na šterkové lavičce – podložka tuhosti  $0,15 \text{ N.mm}^{-3}$  a tloušťky 10 mm

Z Obr. 27 je zřejmé, že došlo k výrazné změně ve způsobu namáhání kolejového lože pod ložnou plochou pražce. Lokální extrémní napětí se posunuly z rohů u pražce bez podložky pod podélnou osu pražce. Současně se přitom posunuly směrem od konce pražce. Extrémy v kolejovém loži se snížily na úroveň v průměru 60 %. Vliv tuhosti a tloušťky podložky přitom není už tak výrazný.

Při rozhodování o tuhosti podložek je nutné zvážit konkrétní účel použití a lokalitu zejména s ohledem na změny tuhosti jízdní dráhy.

## ZÁVĚR

V předložené práci je pojednáno o nové vadě polohy dlouhých výhybkových pražců, která je spojena se změnou materiálu, ze kterého jsou pražce vyrobeny, a se zvyšováním rychlostí vlaků. Příčiny vady a prognózy jejího vývoje byly vysvětleny současně s objasněním chování betonových pražců v kolejovém loži. Prostředkem k objasnění základní příčiny byly statické analýzy a měření betonových příčných a výhybkových pražců v koleji. Na tomto základě bylo navrženo použití pražců s pružnou ložnou plochou jako prostředku ochrany kolejového lože před extrémním namáháním.

Při uložení betonových pražců v kolejovém loži při statickém působení síly dochází ke vzniku extrémního napětí pod konci pražců. Velikost napětí v kolejovém loži je taková, že při jeho zvýšení v důsledku dynamických jevů dojde k trvalému přetvoření lavičky kolejového lože. Lavička kolejového lože po opakovaném namáhání získá takový tvar, že pražec je při projíždějícím nápravovém tlaku na lavičku postupně dotlačován.

Důsledkem výše uvedeného způsobu chování betonových pražců dochází k rozvoji volných prostorů pod pražci. V případě, že tuhost kolejového lože není po délce zcela homogenní, dochází k různému přetváření kolejového lože po délce koleje, dokud není dosaženo rovnoměrného zatížení kolejového lože pro jednotlivé pražce. Výsledkem jsou nepravidelnosti v uložení pražců v kolejovém loži a geometrických parametrů koleje projevující se v podélné výšce koleje a zborcení koleje.

Chování výhybkových pražců je komplikovanější o nesymetrické působení nápravového tlaku. Princip chování zůstává stejný. Nesymetrie zatížení vede u výhybek, které jsou pojížděny převážně v jedné větvi, k jednostranným poklesům dlouhých výhybkových pražců.

Odstranění vady podbíjením pražců nemá dlouhou životnost. Vzhledem ke změnám v tuhosti po délce koleje dané vlastnostmi všech vrstev pražcového podloží, které se podbíjením nezmění, vrátí se velmi rychle kolej podle předloženého scénáře do původní polohy. Protože při opravném zásahu dojde k narušení konsolidovaného stavu, může naopak dojít k rychlejšímu rozvoji vad.

Opatření, které má odstranit příčiny nežádoucích změn ve výškové poloze koleje, musí být zaměřeno na ochranu kolejového lože před extrémním namáháním. Jedním z efektivních opatření, které v současné době ověřují evropské železniční správy, je použití podpražcových podložek. Pražce s pružnou ložnou plochou vedou ke snížení namáhání kolejového lože až na 60 % původní hodnoty. Pražce s pružnou ložnou plochou omezují rozvoj vad pojížděné plochy kolejnice, vedou k potlačení dlouhodobých poklesů koleje a příznivě ovlivňují kvalitu geometrických parametrů koleje.

Cílem současných výzkumných prací v této oblasti je dovedení pražců s pružnou ložnou plochou k praktickému použití. Prostředkem k tomu je stanovení optimálních vlastností podpražcových podložek a sestavení evropského standardu pro podpražcové podložky i pražce s pružnou ložnou plochou.

Zvyšování rychlostí na železničních tratích podmiňující atraktivitu železniční dopravy staví před správce železničních tratí nové problémy spojené s dynamickými účinky. V nejbližších letech se proto v oblasti železničních konstrukcí a staveb budou uskutečňovat především dynamické analýzy formou matematického modelování, zkoumání dynamických vlastností na laboratorních modelech a měření provozních účinků. Lze očekávat integraci výzkumných prací v rámci evropského regionu s důrazem na interoperabilitu evropských železničních systémů, která umožní rozšiřování vysokorychlostní železniční dopravy i do států, které v minulosti železniční infrastrukturu zanedbávaly.

## LITERATURA

### Knihy, skripta a příručky

- [1] DARR, E., FIEBIG, W.: *Feste Fahrbahn. Konstruktion, Bauarten, Systemvergleich Feste Fahrbahn – Schotteroberbau*. Tetzlaff Verlag Hamburg, 1999, 156 p. ISBN 3-87814-700-7
- [2] ESVELD, C.: *Modern Railway Track. Second Edition*. Delft, MRT – Production, 2001, 2nd ed. 654 p. ISBN 90-800324-3-3
- [3] FUNKE, H.: *Broušení kolejnic*. ELKA PRESS, Praha 1992, 112 str.
- [4] KLIMEŠ, F. a kol.: *Železniční stavitelství I. díl*. SNTL, ALFA, 2. přepracované vydání, Praha 1978
- [5] kolektiv: *Technická příručka stavbyvedoucího pro práce na železničním svršku ČD v kolejích normálního rozchodu*. ÚVAR – Servis, a. s., Brno, 2003, 2. vydání.
- [6] LICHTBERGER, B.: *Handbuch Gleis. Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. Tetzlaff Verlag Hamburg 2003, 562 p. ISBN 3-87814-803-8
- [7] MORAVČÍK, M., MORAVČÍK, M.: *Mechanika železničních tratí. Teoretická analýza a simulace úloh mechaniky železničních tratí. 1. díl*. Vydala Žilinská univerzita v Žilině/Edis – vydavatelství ŽU. Žilina 2002, 300 str. ISBN 80-7100-983-0
- [8] MORAVČÍK, M., MORAVČÍK, M.: *Mechanika železničních tratí. Teoretická analýza a simulace úloh mechaniky železničních tratí. 2. díl*. Vydala Žilinská univerzita v Žilině/Edis – vydavatelství ŽU. Žilina 2002, 312 str. ISBN 80-7100-984-9
- [9] MORAVČÍK, M., MORAVČÍK, M.: *Mechanika železničních tratí. Teoretická analýza a simulace úloh mechaniky železničních tratí. 3. díl*. Vydala Žilinská univerzita v Žilině/Edis – vydavatelství ŽU. Žilina 2002, 220 str. ISBN 80-7100-985-7
- [10] NEJEZCHLEB, M. a kol.: *Technická příručka stavbyvedoucího pro práce na železničním spodku*. ÚVAR – Servis, a. s., Brno 2003
- [11] PLÁŠEK, O., ZVĚŘINA, P., SVOBODA, R., MOCKOVČIAK, M.: *Železniční stavby. Železniční spodek a svršek*. 1. vyd., Brno: CERM, 2004. 291 str. ISBN 80-214-2621-7
- [12] POPP, K., SCHIEHLEN, W. (eds.): *System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 488 p. ISBN 3-540-43892-0
- [13] TYC, P., KUBÁT, B., DOSTÁL, K., HAVÍŘ, B.: *Železniční stavby. Projektování železničních tratí. Železniční spodek a svršek*. Dh-Press, Bratislava 1993, 253 str. ISBN 80-855545-05-5
- [14] TYC, P., KUBÁT, B.: *Železniční stavby 1. díl*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1993
- [15] TYC, P., KUBÁT, B.: *Železniční stavby 2. díl*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1994
- [16] ZVĚŘINA, P.: *Železniční stavby. Návod do cvičení I*. Ediční středisko VUT, Brno 1990
- [17] ZVĚŘINA, P.: *Železniční stavby. Návod do cvičení II*. Ediční středisko VUT, Brno 1989

## Normy, předpisy a vzorové listy

- [18] Bahn-Norm BN 918 145-01 *Spannbetonschwellen mit elastischer Sohle. Elastische Schwellensohlen.*
- [19] Bahn-Norm BN 918 145-02 *Spannbetonschwellen mit elastischer Sohle. Verbundsystem Spannbetonschwelle-elastische Schwellensohle.*
- [20] Code UIC 713 R *Design of Concrete Sleepers*
- [21] *Commission Decision of 30 May 2002 concerning the technical specification for interoperability relating to the infrastructure subsystem of the trans-European high-speed rail system referred to in Article 6(1) of Council Directive 96/48/EC.* Official Journal of the European Communities. L 245/143 – L 245/279
- [22] ČSN 73 6360-1 *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha, Část 1: Projektování, platná od 1. června 1997*
- [23] Předpis ČD S3 *Železniční svršek*
- [24] Předpis ČD S3/2 *Bezstyková kolej*
- [25] Předpis ČD S4 *Železniční spodek*
- [26] Předpis ČD S67 *Vady a lomy kolejnic*
- [27] Služební rukověť SR 103/3 (S) *Výkresy materiálu pro železniční svršek*
- [28] Vzorový list železničního spodku Ž1 *Základní rozměry pláň tělesa železničního spodku*
- [29] Vzorový list železničního spodku Ž2 *Zemní těleso*
- [30] Vzorový list železničního spodku Ž3 *Odvodňovací zařízení*
- [31] Vzorový list železničního spodku Ž4 *Pražcové podloží*
- [32] Vzorový list železničního spodku Ž5 *Úprava drážních svahů*

## Články v odborných periodících

- [33] EBERBASCH, D., MÜLLER-BORUTTAU, F. H.: *Dynamische Wegmessungen im Gleis – eine unverzichtbare Methode zur Auswahl neuer Oberbaukomponenten.* Eisenbahntechnische Rundschau 1996, roč. 45, čís. 5, str. 271–280
- [34] EISENMANN, J., MATTNER, L.: *Auswirkung der Oberbaukomponenten auf die Schotter- und Untergrundbeanspruchung.* Der Eisenbahningenieur, 1984, str. 99–107
- [35] EISENMANN, J., RUMP, R.: *Eine Schotteroberbau für hohe Geschwindigkeit.* Eisenbahntechnische Rundschau, 1997, roč. 46, čís. 3, str. 99–108
- [36] ENDMANN, K.: *Die Y-Stahlschwelle. Vergleichende Betrachtung von Stabschwellen und Y-förmigen Stahlschwellen im Schotter.* Der Eisenbahningenieur, 2002, roč. 53, čís. 11, str. 18–25
- [37] FRANZ, J.: *Teil 2: Fahrbahnkonstruktionen.* Der Eisenbahningenieur, September 1999, vol. 50, no. 9, p. 58–61
- [38] GIROTTO, J. B.: *Les appareils de voie Tres Grande Vitesse.* Le Rail, Juillet 2000, no. 19, p. 22
- [39] GRASSIE, S. L.: *Preventive Grinding Controls RCF Defects.* International Railway Journal, 2001, čís. 1, str. 13–17
- [40] GROHMANN, H. D.: *Head Checks - und was draus (noch) werden kann.* Der Eisenbahningenieur, 2003, roč. 54, čís. 1, str. 32–35
- [41] HARTLEBEN, D.: *Schienenschleifen als Massnahme der Lärmvorsorge und Lärmsanierung.* Der Eisenbahningenieur, 2003, roč. 54, čís. 8, str. 22–28



- [42] HENN, W.: *Entwicklungslinien in der Planungsverbesserung*. Der Eisenbahningenieur, 2003, roč. 54, čís. 9, str. 12–18
- [43] HEYDER, R.: *The New UIC Catalogue of Rail Defects*. Der Eisenbahningenieur, 2001, roč. 52, čís. 9, str. 102–109
- [44] HÖHNE, H.: *Weichen in Hochleistungsstrecken*. Der Eisenbahningenieur, Januar 1995, vol. 46, no. 1, p. 38–42
- [45] HOLTZENDORFF, K.: *Dynamische Untersuchungen von Schotterbeanspruchungen mit differenzierten Schottermodellen*. Eisenbahningenieur, März 2001, vol. 52, no. 3, p. 44–47.
- [46] ISHIDA, M., TAKIKAWA, M., AOKI, F., SONE, Y.: *Influence of Gauge Face Worn Profile and Lubrication on Vehicle/track Interaction*. Quarterly Report of Railway technical Research Institute, 2002, roč. 43, čís. 3
- [47] IŽVOLT, L., LELÁK, J.: *Experience of Reinforcing Applications in Railway Corridor Čadca-Zwardoň*, Konferencja Naukowo-techniczna „Logistika systemy transportowe – LOGITRANS“. 22.–24. 10. 2003. Politechnika Radomska im Kazimierza Pułaskiego, Wydział Transportu. Prace naukowe „TRANSPORT“ Nr. 1(17)/2003, str. 87–92
- [48] IŽVOLT, L., PLACEK, J.: *Modernisierung der Eisenbahnkorridore in der Slowakei*. Eisenbahn-technische Rundschau 7–8/2003, str. 464–468
- [49] JUDGE, T.: *Frog Research show promise*. Railway Track & Structures., May 2001, vol. no. 5
- [50] JUDGE, T.: *Measuring Stress to Combat Sun Kinks*. Railway Track and Structures, 2003, čís. 4, str. 43–49
- [51] KATAOKA, H., ABE, N., WAKATSUKI, O.: *Evaluation of Service Life of Jointed Rails*. Quarterly Report of Railway technical Research Institute, 2002, roč. 43, čís. 3, str. 101–106
- [52] KRISTAN, J., SAWLEY, K.: *Material property characterization and specifications for improved rail steels*. Railway Track & Structures, 2002, čís. 10, str. 14–16
- [53] KRUSE, P., HOLEGER, K., MATUTTIS, H., SCHINNER, A.: *Behandlung des Schotters als Vielkörpersystem mit wechselnden Bindungen*. Eisenbahningenieur, Februar 2001, vol. 52, no. 2, p. 30–34
- [54] LEYKAUF, G., STAHL, W.: *Untersuchungen und Erfahrungen mit Besohlenen Schwellen*. Eisenbahningenieur, June 2004, vol. 55, no. 6, p. 8–16
- [55] LIEBERENZ, K., MÜLLER-BORUTTAU, F., WEISEMANN, U.: *Sicherung der dynamischen Stabilität von Unterbau/Untergrund*. Der Eisenbahningenieur, 2003, roč. 54, čís. 2, str. 14–24
- [56] LIEBERENZ, K., WEISEMANN, U.: *Geokunststoffe in dynamisch belasteten Erdbauwerken an Eisenbahnstrecken*. Rail International – Schienen der Welt, Dezember 2002, str. 30–39
- [57] LÓPEZ PITA, E. A., FONSECA TEIXERIA, P.: *Resistant Track Homogeneity: A Way To Reduce Maintenance Costs*. Railway Engineering 2001. 4th International Conference London, UK
- [58] MANDULA, J., SALAIOVÁ, B.: *The utilizing of dynamic penetration test results in diagnostics and design of sleeper bearing*. In: Construction, No. 3–4/2003, ISSN 1727-7094, BY, s. 237–241
- [59] MAURER, T.: *Hochgeschwindigkeit auf Weichen und Schienenauszügen – Erfahrungen, Folgerungen, Entwicklungen*. Eisenbautechnische Rundschau, Juni 1995, vol. 44, no. 6, p. 440–445
- [60] MAURER, T.: *Instandhaltungsarme Weichen – Weg und Entwicklungsstand bei der Deutschen Bahn*. Der Eisenbahningenieur, September 1999, vol. 50, no. 9, p. 17–18

- [61] MÜLLER-BORUTAU, F. H., KLEINERT, U.: *Betonschwelle mit elastischer Sohle. Erfahrungen und Erkenntnisse mit einem neuen Bauteil.* Eisenbahntechnische Rundschau, 2001, roč. 50, čís. 3, str. 90–98
- [62] OBERWEILWE, G.: *Feste Fahrbahn.* Eisenbahntechnische Rundschau, 2002, roč. 51 čís. 1–2
- [63] PAPACEK, F., PFLEGER, H.: *Wartungsarme Systeme zur Umstellung und Überwachung von Weiche.* Signal + Draht, Dezember 2000, vol. 92, no. 12, p. 46–49
- [64] PLÁŠEK, O.: *Provozní ověření žlabových pražců výhybek.* Nová železniční technika, 1999, roč. 7, č. 4, str. 108–110, ISSN 1210-3942
- [65] RUMP, R., EHLING, B.: *Schotteroberbau für hohe Geschwindigkeiten – eine Zwischenbilanz.* Eisenbahntechnische Rundschau, 2000, roč. 49, čís. 10, str. 694–700
- [66] SCHULZ, P., HÖHNE, H.: *Konstruktive Innovationen bei Weichen für den Hochgeschwindigkeitsverkehr.* Der Eisenbahningenieur, September 1999, vol. 50, no. 9, p. 12–17
- [67] SMULDERS, J.: *Management And Tackle Rolling Contact Fatigue.* Railway Gazette International, July 2003, str. 433–436
- [68] SPIEGEL, K., SCHÖN, W., ZOLL, A.: *Schleifen von Weichen in Schnellfahrabschnitten.* Der Eisenbahningenieur, März 2001, vol. 52, no. 3, p. 59–61
- [69] STAHL, W.: *Untersuchungen eines für HGV optimierten Schotteroberbaus. Querverschibewiderstandsmessungen und Schwingungsverhalten.* Der Eisenbahningenieur, 2003, roč. 54, čís. 5, str. 8–16
- [70] TERASHITA, Y., TATSUMI, M.: *Analysis of Damaged Rail Weld.* Quarterly Report of Railway technical Research Institute, 2003, roč. 44, čís. 5
- [71] *Voie et grande Vitesse. Autriche.* Les Appareils de Voie. Le Rail, Decembre 1994, no. 48, p. 40
- [72] WERNICK, F., PFIRTER, A.: *Just-in-Time-Konzept für einen modernen Weichenumbau.* Der Eisenbahningenieur, Januar 2001, vol. 52, no. 1, p. 23–25
- [73] WOOD, J., BURSTOW, M.: *Controlling Rolling Contact Fatigue.* Modern Railways, 2002, čís. 4, str. 66–67
- [74] ZVĚŘINA, P., PLÁŠEK, O.: *Měření namáhání železničního svršku při zkušebních jízdách rychlostí 200 km/h.* Nová železniční technika, 2002, roč. 10, č. 3, str. 96–101, ISSN 1210-3942

#### **Příspěvky ve sbornících odborných konferencí**

- [75] JANOŠTÍK, D., PLÁŠEK, O., MOCKOVČIAK, M., SMUTNÝ, J., SVOBODA, R.: *Měření dynamického namáhání konstrukce železničního svršku ve výhybce.* In proc. of the 3rd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering DYN-WIND 2005. Vrátna – SR, 2005, str. 204–207
- [76] MANDULA, J.: *Modelovanie konštrukcie podvalového podložia s geosyntetickou výstužnou vrstvou,* In: Zb. z konferencie s medzinárodnou účasťou: Rozvoj dopravy v Košiciach a východoslovenskom regióne, Košice, 2002, ISBN 80-232-0209, s. 265–268
- [77] PLÁŠEK O., SALAJKA, V.: *Ověřování výhybkových žlabových pražců.* Česko-Slovenská konference Experiment '04, Fakulta stavební VUT v Brně, 2004, str. 423–428, ISBN 80-7204-354-4
- [78] PLÁŠEK, O.: *Měření dynamických účinků ve výhybkách.* International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, Vyhne – SR, 2000. str. 229–232, ISBN 80-7100-734-X

- [79] PLÁŠEK, O., SAHÁNEK, Z., MOSLER, T.: *Chování betonových pražců ve výhybkách na modernizovaných tratích*. Modernizácia železničných tratí XI. medzinárodná konferencia VRT. Žilina 2001, str. 151–156, ISBN 80-7100-893-1
- [80] PLÁŠEK, O., SALAJKA, V.: *The Behavior of Concrete Sleepers in Ballast*. Railway Engineering – 2004, The Seven International Conference on „Maintenance & Renewal of Permanent Way; Power & Signalling; Structures & Earthworks, The Commonwealth Institute London, UK, 2004. 10 str., ISBN 0-947644-54-7
- [81] PLÁŠEK, O., SMUTNÝ, J., SVOBODA, R., JANOŠTÍK, D., MOCKOVČIAK, M.: *Chování dlouhých betonových pražců v kolejovém loži*. In proc. of the 3rd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering DYN-WIND 2005. Vrátna – SR, 2005, str. 200–203
- [82] PLÁŠEK, O., SMUTNÝ, J.: *Měření napětí v pražcovém podloží ve výhybce*. 2. konferencia s medzinárodnou účasťou pozemné komunikácie a dráhy Konštrukcia podvalového podložia, Herľany, 2004, str.41–46, ISBN 80-8073-168-3
- [83] PLÁŠEK, O., VALENTA, M.: *The Monitoring of Train Operation Load*. Transport System Telematics, In proc. of the 4th International Conference, Katowice-Ustroń, 2004, Silesian University of Technology, Proc. on CD ISBN 83-917156-2-0, p. 339–346 ISSN 0209-3324
- [84] PLÁŠEK, O., VALENTA, M.: *Zkušenosti z měření a vyhodnocení dynamického namáhání železničního svršku při zkušebních jízdách rychlostí 200 km.h<sup>-1</sup>*. The 2nd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, Tale – SR, 2003, str. 196–201, ISBN 80-8070-066-4
- [85] SALAJKA, V., KANICKÝ, V.: *Dynamic Properties Analysis of Slab Track*. In: Proceedings XI. Int. Science Conference, , 18.–20. October 1999, Brno University of Technology, Brno, p. 193–196, ISBN 80-214-1439-1
- [86] SALAJKA, V., KANICKÝ, V.: *Track Response to Traffic Load Using Non-linear Computing Model*. In: Proceedings Traffic Applied Mechanics'99, University Pardubice, June 1999, p. 15–20, ISBN 80-7194-185-6
- [87] SMUTNÝ, J., JANOŠTÍK, D.: *Measurement and analysis of dynamic parameters of rail fastening*, Dynamic of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering - International Conference, 2003, Slovak Republic, University of Žilina, pp. 202–205, ISBN 80-8070-066-4
- [88] SMUTNÝ, J.: *Measurement and analysis of dynamic and acoustic parameters of rail fastening*, Railway Engineering – 2002, 5th International Conference, London, UK, 6/2002, pp. 14, ISBN 0-947644-49-0
- [89] SMUTNÝ, J., PLÁŠEK, O.: *Stress Measurement in the Railway Substructure in the Turnout*. In Proc. of The Eighth International Conference on „Maintenance & Renewal of Permanent Way; Power & Signalling; Structures & Earthworks on CD, University of Westminster, London, UK, 6 p. ISBN 0-947644-57-1
- [90] ŠVÁBENSKÝ, O.: *Uplatnění technologie Globálního Polohového Systému při měření posunů*. In: sborník referátů mezinárodní konference “Geodézia, Fotogrammetria a Inžinierska geodézie v informačnej spoločnosti”, STU Bratislava, 2001, pp. 233–238, ISBN 80-227-1589
- [91] ZVĚŘINA, P., PLÁŠEK, O.: *Dynamic Diagnostic Of the Track Substructure*. 4th International Conference, London, UK, 2001. 8 str., ISBN 0-947644-45-8

## Výzkumné zprávy

- [92] HŘEBÍČEK, Z. a kol.: *Zpráva k úkolu E 63 13 006 Navrhnout a ověřit technologie podbíjení, zhutňování a stabilizace koleje s cílem minimalizovat celkové náklady na opravné práce*. VÚŽ Brno, 1996
- [93] SCHILDER, R.: *Under sleeper Pads*. Report for UIC Track Expert Group, Paris, 2004, 24 p.
- [94] ÚVAR Servis a. s, Stavební zkušebna a laboratoř. *Zpráva č. 3630/14/00 o sledování deformací pražců VPS v žst. Svitavy*. Závěrečná zpráva pro ŽPSV Uherský Ostroh, prosinec 2000, 2 strany textu, 3 přílohy
- [95] ÚVAR Servis a. s, Stavební zkušebna a laboratoř. *Zpráva č. 3630/12/01 o sledování deformací pražců VPS v žst. Pečky*. Závěrečná zpráva pro ŽPSV Uherský Ostroh, prosinec 2000, 2 strany textu, 3 přílohy
- [96] ÚVAR Servis a. s, Stavební zkušebna a laboratoř. *Zpráva o měření průhybu a dotvarování pražců VPS*. Závěrečná zpráva pro ŽPSV Uherský Ostroh, březen 1998–březen 1999, 12 stran textu, 8 příloh
- [97] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Poklesy a průhyby pražců VPS. Souhrnná zpráva pro ŽPSV Uherský Ostroh*, a. s. Brno 2001, 8 str., 1 příloha
- [98] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb.: *Měření namáhání železničního svršku při  $V = 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$* . Závěrečná zpráva pro KPM CONSULT a AŽD Praha. Brno, 2002, 118 str.
- [99] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Dlouhodobé sledování projeté zátěže pro výhybku č. 5 v žst. Vranovice*. Závěrečná zpráva pro DT výhybkárna a mostárna, a. s. Brno 2003
- [100] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Dynamické namáhání betonových pražců v žst. Moravský Písek*. Závěrečná zpráva pro ŽPSV Uherský Ostroh, a. s. Brno, 2003, 20 str., 8 příloh
- [101] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Měření dynamických účinků ve výhybkách v žst. Poříčany*. Závěrečná zpráva pro TÚDC, DDC, ČD s. o., Brno, 1997, 26 str., 29 příloh
- [102] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Měření dynamického namáhání nových konstrukcí výhybek v žst. Roudnice nad Labem*. Závěrečná zpráva pro TÚDC, DDC, ČD s. o., Brno 1998, 29 str., 10 příloh
- [103] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Měření dynamických účinků na výhybkových pražcích v žst. Moravský Písek*. Závěrečná zpráva pro ŽPSV Uherský Ostroh, a. s. Brno 2001, 17 str., 9 příloh
- [104] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Měření dynamického namáhání konstrukce železničního svršku ve výhybce č. 5 v žst. Vranovice*. Závěrečná zpráva pro DT výhybkárna a mostárna, a. s. Brno 2003
- [105] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Měření napětí v konstrukci pražcového podloží ve výhybce č. 5 v žst. Vranovice*. Závěrečná zpráva pro DT výhybkárna a mostárna, a. s. Brno 2003
- [106] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Statická analýza pražce VPS*. Závěrečná zpráva pro ŽPSV Uherský Ostroh, a. s. Brno 2002, 17 str., 4 přílohy
- [107] VUT v Brně, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Výpočet pražce B 91S s pružnou ložnou plochou. Statická analýza metodou konečných prvků*. Brno, 2005

## ABSTRACT

### **Theoretical and Experimental Analysis of Concrete Sleeper Behavior in Ballast Bed**

The new types of problems have appeared with the velocity increasing of trains, even though many quality proceedings were launched. Solutions for these problems are searching both by infrastructure administrators and suppliers and contractors. The thesis is focused on one of the new problems – undesirable settlements of long bearers in crossings. The thesis contents under mentioned items:

- The state of art for defect of bearer position in ballast bed, description of defects and typical trends
- The searching of defect causes, the theoretical presumptions, the static analyses and the measurements in tracks
- The proposals for ballast protection by using under sleeper pads, description of European railway administrators, results of static analysis

The stress value in ballast bed under concrete sleeper ends leads to the permanent bed deformation in the case of high dynamic effects. That is the reason for the evolution of cavities under ends of sleepers. The similar deformation in the ballast bed could be observed due inhomogeneities of the substructure stiffness until isn't distribution of stresses under sleepers homogenous. Irregularities in sleepers support in the ballast bed are the consequence. Track misalignments in the longitudinal track elevation and the track distortion. The behavior of bearers is complicated by an unsymmetrical loading by axle forces, so the loading asymmetry leads to one sided settlement.

The precaution, which should eliminate undesirable changes in track alignment, has to be focused on a ballast bed protection against extreme stresses. One of effective possibilities is using of under sleeper pads. This technical solution is currently evaluated by European railway administrators. Under sleeper pads decreases ballast stresses to 60 % of origin values so the settlements of concrete sleepers and bearers are significant lower. The other positive effects of under sleeper are the suppressing of rail corrugations and better quality of track geometry parameters.