

**U N I V E R Z I T A P A R D U B I C E**  
**DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**2012**

**Ing. Jakub VÁGNER**

**UNIVERZITA PARDUBICE**

**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**SIMULACE PROVOZNÍHO NAMÁHÁNÍ ČÁSTÍ  
KOLEJOVÝCH VOZIDEL NA ZATĚŽOVACÍCH STANDECH**

**Ing. Jakub Vágner**

**Disertační práce**

**2012**

**UNIVERSITY OF PARDUBICE**  
**Jan Perner Transport Faculty**

**SIMULATION OF TRAFFIC LOAD OF PARTS OF RAILWAY  
VEHICLES ON LOADING STANDS**

**Ing. Jakub Vágner**

**Doctoral Thesis**

**2012**

## **Prohlášení**

*Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.*

*Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.*

*Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.*

*V Pardubicích dne 1. 1. 2012*

.....  
Jakub Vágner

### **Poděkování**

*Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Bohumilu Culkovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě této práce. Dále prof. Ing. Bohumilu Culkovi, CSc. za cenné rady a připomínky, zejména při realizaci experimentů. Také bych chtěl poděkovat manželce za podporu nejen při studiu, ale i při psaní disertační práce.*

## **ANOTACE**

*Disertační práce je zaměřena na problematiku experimentálního zjišťování únavových charakteristik konstrukčních uzlů částí kolejových vozidel na dynamickém zkušebním stavu. Cílem práce je návrh metodiky, která umožňuje zjednodušení těchto experimentů. Navržená metodika využívá výpočet pomocí metody konečných prvků, korelační analýzu a odhad pomocí měrné napěťové odezvy. K ověření navržené metodiky byl proveden experiment na reálném vzorku.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*Kolejové vozidlo, konstrukční uzel, mechanické napětí, analýza MKP, materiálové charakteristiky, experimentální výzkum, únavové testy, dynamický zkušební stav.*

## **ANNOTATION**

*The dissertation thesis is focused on the issues of experimental determination of fatigue characteristics of structural nodes of rail vehicle parts on a dynamic test stand. The aim of the thesis is to propose a methodology allowing simplifying the experiments. The proposed methodology uses FEM computation, correlation analysis and estimation based on specific stress response. In order to validate the methodology, an experiment with a physical specimen was performed.*

## **KEY WORDS**

*Rail vehicle, structural node, mechanical stress, FEM analysis, material characteristics, experimental research, fatigue testing, dynamic test stand.*

## OBSAH

<b>ZKRATKY .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>5</b>
<b>2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....</b>	<b>6</b>
2.1. ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY RÁMŮ PODVOZKŮ KV .....	6
2.2. TESTOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH UZLŮ .....	8
<b>3. CÍL PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>11</b>
4.1. ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ .....	11
4.2. VLASTNÍ SW NÁSTROJ PRO HODNOCENÍ MKP VÝSLEDKŮ .....	11
4.3. VYHODNOCOVAČÍ SOFTWARE .....	13
4.4. NÁSTROJE A METODY EXPERIMENTÁLNÍHO OVĚŘENÍ .....	14
4.4.1. Tenzometrické měření .....	14
4.4.2. Dynamický zkušební stav .....	14
<b>5. ÚVODNÍ POPIS NAVRŽENÉ METODIKY .....</b>	<b>16</b>
5.1. CÍL NAVRŽENÉ METODIKY .....	16
5.2. PŘEDPOKLADY PRO POUŽITÍ METODIKY .....	16
<b>6. PRINCIPY, METODY A POSTUPY POUŽITÉ U NAVRŽENÉ METODIKY .....</b>	<b>19</b>
6.1. HODNOCENÍ EKVIVALENTNOSTI ZATÍŽENÍ .....	19
6.2. HODNOCENÍ EKVIVALENTNOSTI NAPJATOSTI KONSTRUKCE .....	20
6.3. HODNOCENÍ S OHLEDEM NA KRITICKÉ MÍSTO .....	23
6.4. MKP ANALÝZA KONSTRUKCE .....	25
6.4.1. Vztah mezi napětovou odezvou a zatížením .....	25
6.4.2. Nalezení matice měrné odezvy .....	27
6.5. PRINCIPY POROVNÁVÁNÍ MKP VÝPOČTŮ S EXPERIMENTEM .....	28
6.6. STANOVENÍ NAPĚTÍ V KRITICKÉM MÍSTĚ .....	31
<b>7. POPIS CELKOVÉHO POSTUPU NAVRŽENÉ METODIKY .....</b>	<b>35</b>
<b>8. APLIKACE METODY NA KONKRÉTNÍ VZOREK .....</b>	<b>37</b>
8.1. NÁVRH VZORKU – VÝBĚR KONSTRUKČNÍHO UZLU .....	37

8.2.	NÁVRH VZORKU – KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	40
8.3.	ZATĚŽOVACÍ SESTAVA.....	42
8.4.	NÁVRH ZATÍŽENÍ .....	44
8.5.	UMÍSTĚNÍ REFERENČNÍCH TENZOMETRŮ .....	46
8.6.	MĚRNÁ NAPĚŤOVÁ ODEZVA - MKP ANALÝZA .....	48
<b>9.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ MĚRNÉ NAPĚŤOVÉ ODEZVY .....</b>	<b>50</b>
9.1.	REALIZACE EXPERIMENTŮ .....	50
9.2.	EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ MĚRNÉ NAPĚŤOVÉ ODEZVY.....	52
9.2.1.	Statické zatížení .....	52
9.2.2.	Dynamické zatížení .....	54
9.2.3.	Porovnání výsledků měrné napěťové odezvy.....	54
<b>10.</b>	<b>JEDNOPARAMETRICKÉ ZJEDNODUŠENÍ.....</b>	<b>57</b>
10.1.	ZATÍŽENÍ VZ2-1-000 A VZ2-1-010.....	58
10.2.	ZATÍŽENÍ VZ2-1-001 A VZ2-1-011.....	59
10.3.	ZATÍŽENÍ VZ2-1-002 A VZ2-1-012.....	60
<b>11.</b>	<b>DVOUPARAMETRICKÉ ZJEDNODUŠENÍ.....</b>	<b>61</b>
11.1.	NOVĚ NAVRŽENÉ VARIANTY ZATÍŽENÍ .....	63
<b>12.</b>	<b>ZÁVĚR K NAVRŽENÉ METODICE.....</b>	<b>67</b>
12.1.	MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝVOJE NAVRŽENÉ METODIKY .....	68
12.2.	MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝVOJE VYTVOŘENÉHO SW .....	69
<b>13.</b>	<b>PŘÍNOS PRÁCE .....</b>	<b>70</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>71</b>



## Zkratky

IIW .....	International Institute of Welding
UIC .....	International Union of Railways
KV .....	Kolejové vozidlo
HBM.....	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
SW.....	software
MKP.....	metoda konečných prvků

## Označení

$F_1$ .....	síla od válce V1
$F_2$ .....	síla od válce V2
$F_3$ .....	síla od válce V3
$E$ .....	modul pružnosti v tahu
$G$ .....	modul pružnosti ve smyku
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ .....	osová napětí ve směru os X, Y a Z
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ .....	smyková napětí v rovinách XY, YZ a ZX
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ .....	hodnoty hlavních napětí
$\tau_{max}$ .....	maximální smykové napětí
$\sigma_c$ .....	mez únavy v tahu
$\tau_c$ .....	mez únavy ve smyku
$\sigma_f$ .....	mez pevnosti v tahu
$\tau_f$ .....	mez pevnosti ve smyku

## Indexy

$a$ .....	amplituda příslušného průběhu
$m$ .....	střední hodnota příslušného průběhu
$h$ .....	horní hodnota rozkmitu příslušného průběhu
$d$ .....	dolní hodnota rozkmitu příslušného průběhu
1, 2, 3.....	účinek od příslušného válce

## Seznam příloh

- Příloha č. 1** Měrná napěťová odezva pro statické zatížení.
- Příloha č. 2** Výsledky MKP výpočtů – měrná napěťová odezva.
- Příloha č. 3** Odezva mech. napětí při dynamickém zatěžování.
- Příloha č. 4** Obrazová dokumentace k experimentu.
- Příloha č. 5** Výsledky MKP výpočtů – původní zatížení (podklad pro korelační analýzu).
- Příloha č. 6** Korelační analýza kritických míst.
- Příloha č. 7** Výběr z výkresové dokumentace.
- Příloha č. 8** Napěťová odezva: Původní zatížení VZ2-1-000.
- Příloha č. 9** Napěťová odezva: Původní zatížení VZ2-1-001.
- Příloha č. 10** Napěťová odezva: Původní zatížení VZ2-1-002.
- Příloha č. 11** Napěťová odezva: Zjednodušené zatížení VZ2-1-010.
- Příloha č. 12** Napěťová odezva: Zjednodušené zatížení VZ2-1-011.
- Příloha č. 13** Napěťová odezva: Zjednodušené zatížení VZ2-1-012.
- Příloha č. 14** Napěťová odezva: Porovnání původního a zjednodušeného zatížení VZ2-1-000 / VZ2-1-010.
- Příloha č. 15** Napěťová odezva: Porovnání původního a zjednodušeného zatížení VZ2-1-001 / VZ2-1-011.
- Příloha č. 16** Napěťová odezva: Porovnání původního a zjednodušeného zatížení VZ2-1-002 / VZ2-1-012.

## 1. Úvod

V dnešní době se pro odhady životnosti konstrukcí často používají výpočtové metody založené na analýzách MKP a následném vyhodnocení specializovaným softwarem. Jsou to progresivní metody, které ale nemohou plně nahradit metody založené na experimentálních postupech, kterými se získávají podklady pro vyhodnocování odhadů životnosti konstrukcí jak v provozních podmínkách, tak v laboratořích při získávání materiálových charakteristik těchto konstrukcí, případně laboratorní ověřování životnosti celých konstrukčních celků simulací provozního namáhání.

Provedení experimentů v laboratorních podmínkách však provází řada zjednodušení oproti reálnému provozu, a s tím je spojena i řada otázek, které je nutno zkoumat a nalézt na ně odpověď. Jsou to např. tyto základní otázky: Jak velká tato zjednodušení mohou být, aby odezva (mechanické napětí) v konstrukci odpovídala odezvě od provozního zatížení? Je zde ještě prostor k dalšímu zjednodušení experimentu? Lze zjednodušit samotnou sestavu experimentu? Lze snížit celkový počet použitých elektrohydraulických zatěžovacích válců?

Aby bylo možné toto zjistit, je nutné navrhnout metodu - systém, který by hodnotil ekvivalentnost zjednodušeného způsobu zatěžování konstrukce oproti původnímu zatížení a to z pohledu únavové pevnosti. Dále musí být navržen postup samotného zjednodušení zatížení. Při aplikaci takto navržených postupů je nutné ve všech krocích dbát na to, aby byla zachována návaznost na experiment a jednotlivé kroky metody byly verifikovány experimentálními výsledky.

## 2. Současný stav problematiky

Fenoménem únavy materiálu se inženýři zabývají již více jak 150 let. Tento obor se postupně rozvětvil do několika oblastí:

- Výzkum materiálových charakteristik základního materiálu.
- Výzkum únavové pevnosti reálných konstrukcí.
- Lomová mechanika z pohledu únavy materiálu.

Všechny tyto oblasti výzkumu se samozřejmě odehrávají jak v teoretické, tak experimentální rovině. Tato práce je zaměřena na experimentální oblast výzkumu únavové pevnosti konstrukcí, při použití nezbytného teoretického aparátu.

Experimentální výzkum únavové pevnosti konstrukcí lze realizovat jak v podmínkách provozu, tak v laboratorních podmínkách. Experiment v podmínkách provozu lze samozřejmě provést pouze na celé konstrukci, v laboratorních podmínkách pak lze použít určitá zjednodušení, která mohou být aplikována jak v oblasti způsobu zatěžování (úprava zatěžovacích průběhů pro zkrácení zkoušky), tak v oblasti rozsahu konstrukce (použití celé konstrukce, použití části konstrukce nebo jen určitého konstrukčního uzlu).

Aby mohl být výsledek experimentu akceptovatelný, je nutné v laboratorních podmínkách zabezpečit, aby způsob vnášení zatížení vyvolal stejné odezvy v konstrukci jako v provozu. Tím je docíleno, že charakter zatížení je ekvivalentní. Vhodný způsob, jak experimentálně zjistit vyvolanou napěťovou odezvu, je použití tenzometrického měření.

### 2.1. Únavové zkoušky rámu podvozků KV

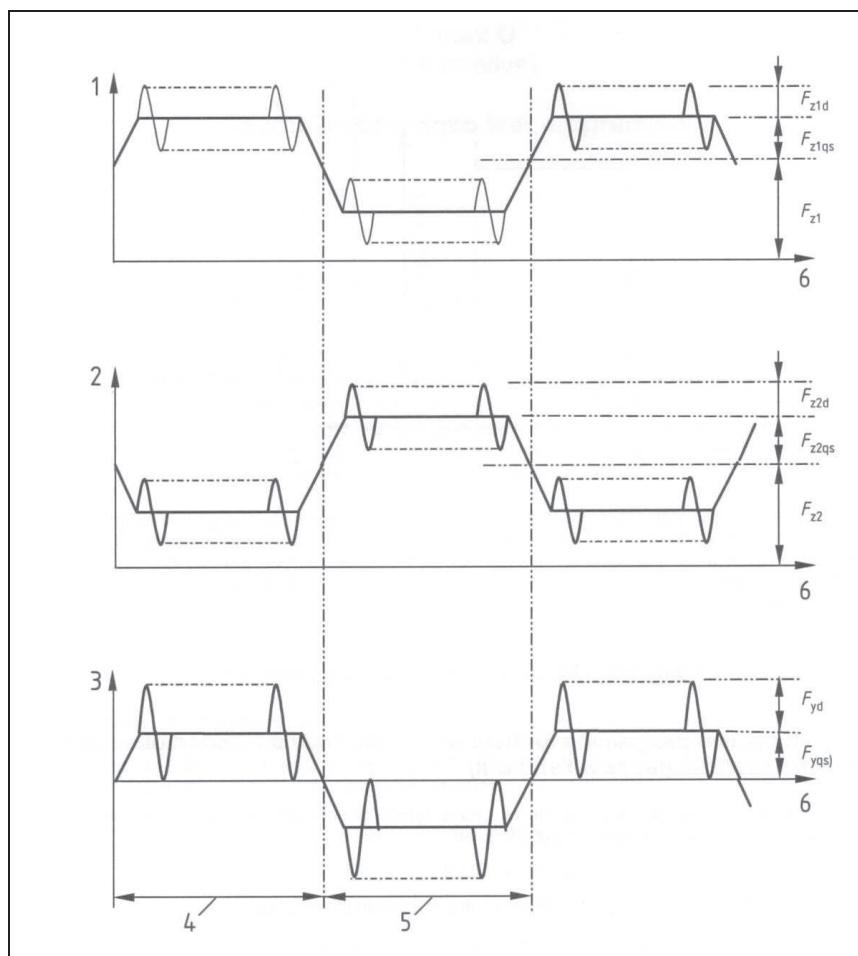
Experimentálním ověřování únavové pevnosti rámu podvozků kolejových vozidel se zabývají následující UIC vyhlášky:

- UIC 510-3 : 1994 (nákladní vozy) [4],
- UIC 515-4 : 1993 (osobní vozy) [5],
- UIC 615-4 : 1994 (hnací vozidla) [8],

Touto problematikou se zároveň zabývá norma ČSN EN 13 749 : 2005 [11], která cituje výše uvedené UIC vyhlášky. Pro testování pevnosti je ve všech dokumentech popsán téměř shodný postup a to ve dvou fázích: statické zkoušky a únavové zkoušky. U statických zkoušek se konstrukce zatěžuje v několika stupních statického zatížení. Největší intenzita zatížení pak představuje zatížení, které se může v provozu objevit výjimečně. U tohoto zatížení se po odlehčení kontroluje, zda

nedošlo k trvalé deformaci konstrukce. U únavových zkoušek se konstrukce zatíží dynamicky a hodnotí se počet cyklů provedených do vzniku trhliny. Zatížení se opět aplikuje ve třech stupních. Po dosažení  $6 \cdot 10^6$  cyklů se zatížení zvýší na 120 %, provede se dalších  $2 \cdot 10^6$  cyklů a zatížení se zvýší na 140 %. V průběhu se stále kontroluje počet cyklů do vzniku trhliny.

Pro jednotlivé testy je uveden postup, jak určit průběhy jednotlivých sil působících na rám a také předepisují, jak by měly být síly na rám podvozků aplikovány. Nehovoří ale o konkrétní realizaci ani o speciálních konstrukcích podvozků. Průběhy sil jsou s ohledem na skutečné provozní zatížení velmi zjednodušené a nelze je tedy považovat za zcela reprezentativní. Nejedná se tedy přímo o simulaci provozního zatížení, ale o smluvním zatížení, kterým se ověřuje odolnost konstrukce proti únavovému poškození. Ani jedna z norem například nepředepisuje frekvenci, s jakou mají být jednotlivé složky zavedeny. Předepsán je pouze počet cyklů v jednom bloku kvazistatické složky zatížení ( $10 \div 20$ ). Průběhy jednotlivých sil lze vidět v grafu na obr. 1. Pokud připustíme tato zjednodušení, je zde ještě prostor také pro jiná zjednodušení?



**Obr. 1 - Průběhy zatěžovacích sil při únavových zkouškách [4]**

Dalším dokumentem je zpráva ERRI B12/RP60 [2] zabývající se únavovými zkouškami a to jak fázi přípravy, průběhem, tak i vyhodnocením. Tento dokument zároveň cituje vyhlášky UIC [4, 5, 8] zmíněné na začátku kapitoly a to v souvislosti se samotnou realizací zkoušek. Předpokládá se zde, že v kritických místech nebo v jiných referenčních místech jsou měřena napětí pomocí tenzometrů. Hodnocení pak lze provést ve dvou variantách a to metodou kumulace únavového poškození nebo metodou Goodmanova diagramu. Zde se dokument odkazuje na zprávu ERRI B12/RP17 [1]. Součástí zprávy jsou také kategorie detailů vrubů, pomocí kterých lze zvolit přiložené únavové křivky zejména pro hodnocení metodou kumulace únavového poškození. Část zprávy se pak zabývá problematikou umístění tenzometrů na konstrukci. Maximální napětí ve vrubu se předpokládá jako lineární extrapolace napětí změřeného v okolí vrubu. V doporučeních na umístění tenzometrů se zde dokument odvolává na doporučení International Institute of Welding [10] a Eurokód 3 [9]. Oba zmíněné dokumenty se také zabývají experimentálním ověřením, i když v principu se využívají zejména pro teoretické odhady životnosti konstrukcí. Zejména [9] využívá kategorií detailů pro výběr únavové křivky pro výpočet. Výběr kategorií detailů je však omezen, a pokud nelze nalézt vhodnou kategorii, pak je potřeba v některých případech přistoupit i k experimentálnímu ověření. Také v [10] není opomíjen experiment.

## **2.2. Testování konstrukčních uzlů**

UIC vyhlášky předpokládají testování celé konstrukce, tzn. celého rámu podvozku. Z pohledu celkové únavové pevnosti konstrukce je výsledná únavová pevnost rovna únavové pevnosti nejvíce exponovaného místa. V případě, že to účel experimentu umožňuje, pak je možné experiment omezit pouze na testování exponované části konstrukce – konstrukčního uzlu. Testování konstrukčních uzlů je sice mnohem náročnější než testování jednoduchých vzorků pro zjištění materiálových charakteristik základního materiálu, avšak ve výsledcích jsou zahrnuty i vlivy plynoucí z technologie výroby, zejména u svařovaných konstrukcí. V některých případech se tak přistupuje pouze k testování části konstrukce, resp. k testování pouze konstrukčního uzlu [32].

Při testování pouze konstrukčního uzlu je nutné zabezpečit, aby způsob namáhání zkoušeného vzorku byl ekvivalentní k namáhání v provozu. Pokud by tomu bylo jinak, mohlo by dojít k odlišnému způsobu namáhání kritického místa (došlo by k jinému způsobu porušení) nebo v extrémních případech by kritické místo vzniklo jinde než v případě provozního zatížení. Je tedy nutné zabývat se při experimentálních činnostech tohoto typu otázkou hodnocení způsobu namáhání konstrukce resp. způsobu namáhání konstrukčního uzlu.

V této souvislosti lze uvažovat s různými způsoby hodnocení ekvivalentnosti zatížení a z tohoto pohledu je realizace experimentu s konstrukčními uzly mnohem složitější oproti např. testování únavové pevnosti materiálu na jednoduchých vzorcích.

Jelikož se v provozu ve většině případů jedná o víceosé namáhání materiálu, přistupuje se někdy také k víceosému zatížení malých laboratorních vzorků a zkoumá se tak multiaxiální zatěžování materiálu. V mnoha případech se jedná o duté vzorky válcového tvaru, které umožňují experimentálně ověřit mechanické napětí na povrchu vzorku. Vzorky jsou obvykle namáhány více složkami namáhání (krutem, ohybem nebo tahem) a tyto složky nemusí být ve stejné fázi. Jedná se tak o velmi složitý způsob namáhání. Všechny experimenty provedené na takovýchto vzorcích jsou však provedeny pro harmonické průběhy a to jako proporcionální i neproporcionální namáhání [25, 36]. Téměř nikdy (až na výjimky) však není simulováno provozní namáhání. Provedené testy mohou posloužit pro experimentální ověření teoretických závěrů a předpokladů, pro experimentální ověřování vztažené k reálné konstrukci je však použít nelze.

Více přínosné, avšak méně nákladné než testování celé konstrukce, je testování konstrukčních uzlů. Zde je obvykle pro vyvolání žádané odezvy zapotřebí větší počet zatěžovacích válců. I při použití většího počtu zatěžovacích válců však není zcela zaručeno, že namáhání je zcela ekvivalentní provoznímu zatěžování, zejména z důvodu nejistot vnášení sil do vzorku pomocí přípravků, nejistot měření sil působících na vzorek a nejistot plynoucích ze způsobu hodnocení této ekvivalentnosti vytvořeného zatížení se zatížením provozním.

Převedení testů do laboratorních podmínek tak představuje mnoho zjednodušení oproti reálnému provozu, ale i tak lze dosáhnout stejné odezvy v konstrukci, jako byla odezva naměřená v provozu. U většiny testů je také potřeba si uvědomit, že zkoušené konstrukce jsou prototypy, proto nejsou k dispozici data z reálného provozu (např. vstupní informace o skříní vozidla, které podvozek ponese). Vstupy je tedy nutné získat z experimentů provedených na obdobných vozidlech nebo je lze získat z multibody simulací. Prvotní odhady napjatosti konstrukce pak lze získat z MKP analýzy na základě již zmíněných vstupů.

### 3. Cíl práce

Hlavním cílem práce bylo nalezení metodiky, která by umožnila zjednodušení experimentálního ověřování únavové pevnosti konstrukčních uzlů rámu podvozků železničních vozidel a ověřit dostupnými prostředky (MKP analýzou a testy na elektrohydraulickém stavu).

K dosažení cíle tak bylo potřeba řešit následující body:

- 1) Nalézt vhodný soubor kritérií, která umožní posoudit ekvivalentnost dvou způsobů namáhání konstrukčního uzlu z pohledu únavového poškození.
- 2) Nalézt vazbu mezi hodnocenou složkou napěťové odezvy a způsobem zatěžování.
- 3) Stanovit postup, který povede k zjednodušení způsobu zatěžování (ke snížení počtu zatěžovacích válců).
- 4) Ověření výše uvedených bodů na teoretických modelech s využitím MKP analýzy.
- 5) Ověřit (demonstrovat) metodiku experimentálně na reálném vzorku.

I když je práce tematicky zaměřená na zjednodušení experimentálního testování únavové pevnosti, bylo nutné k dosažení cíle využít mnoho teoretických postupů a metod. Aby byly teoretické postupy (a tím i výsledek) akceptovatelné, bylo nutné v dílčích krocích tyto postupy podložit experimentem. Pro tento účel byl navržen vzorek konstrukčního uzlu představující charakteristický konstrukční uzel používaný u rámu podvozků kolejových vozidel.



## 4. Zvolené metody zpracování

### 4.1. *Analýza metodou konečných prvků*

Navržená metodika je závislá na výpočtovém odhadu mechanického napětí v testovaném konstrukčním uzlu. K tomuto účelu byla použita metoda MKP.

Až na výjimky byly všechny výpočty provedeny v programu SolidWorks, který obsahuje programový modul Cosmos. Při realizaci MKP analýz bylo nutné dbát na určité zásady tvorby výpočetního modelu a definici vnějšího zatížení a dbát na následnou správnou interpretaci dosažených výsledků.

Ve většině případů jsou v této práci výsledky MKP analýzy exportovány do textových souborů obsahujících hodnoty jednotlivých složek napětí pro jednotlivé uzly. Tyto informace jsou dále zpracovávány vlastními programy.

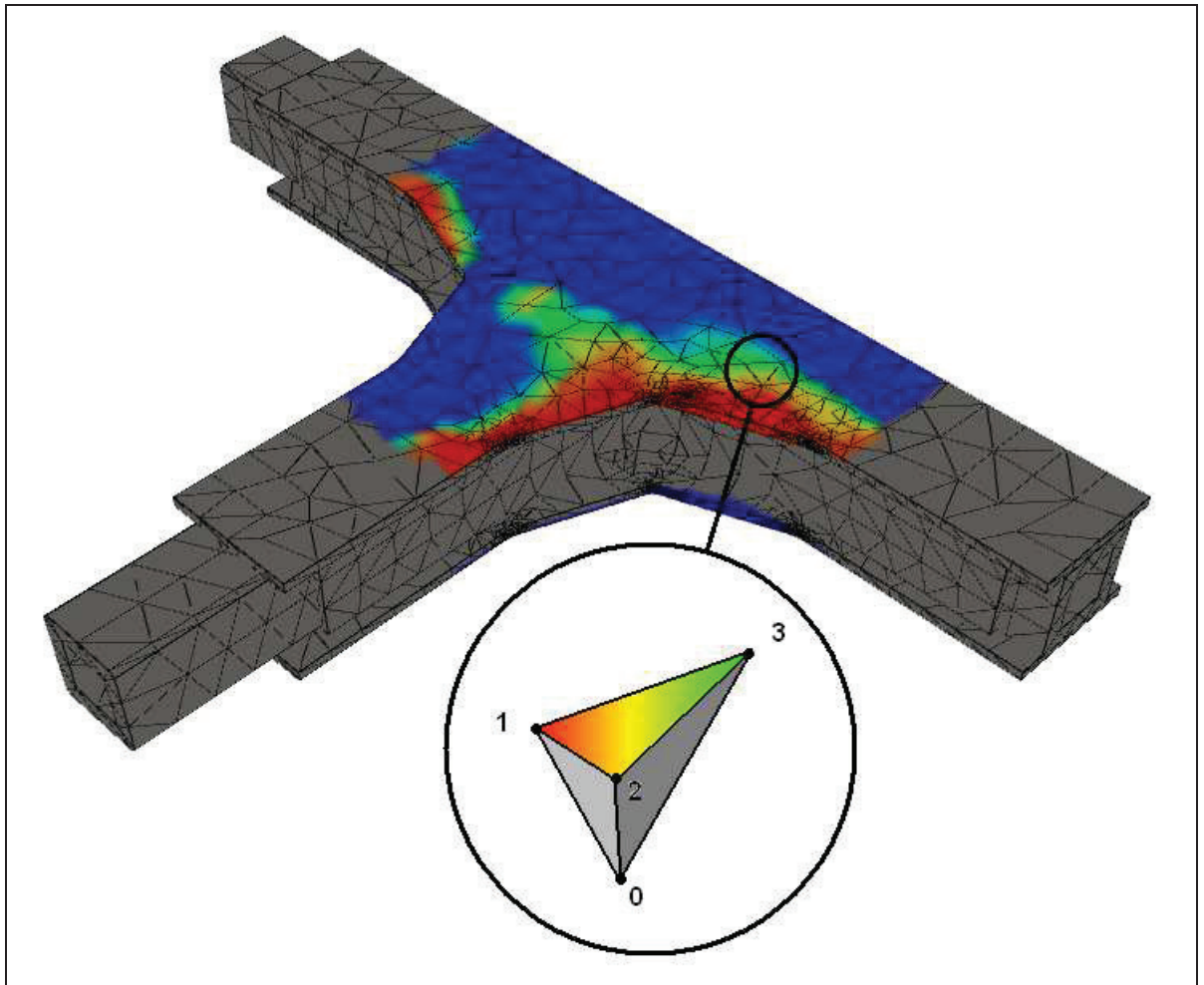
### 4.2. *Vlastní SW nástroj pro hodnocení MKP výsledků*

Jelikož postprocesor použitého MKP software neumožňoval vyhodnotit a vizualizovat požadované výsledky, přistoupil jsem k tvorbě vlastního postprocesoru. Vytvořený program tak umožňuje následující:

- Import geometrie a zátěžových stavů z MKP software.
- Import a vizualizace výsledků vypočtených v MKP software.
- Výpočet a vizualizace hodnot vypočtených dle zadaných vztahů.
- Výpočet koeficientů korelace mezi libovolnými složkami napětí ve zvolených místech (MKP uzlech) pro zadané zátěžové stavy.
- Výpočet napětí pro zadaný „virtuální“ tenzometr.
- Generaci průběhů sil dle vyhlášek UIC.
- Vizualizaci výsledků do MKP sítě v trojrozměrném zobrazení.
- Vizualizace výsledků do grafů.
- Export vypočtených hodnot do textového souboru.

Celý software byl programován ve vývojovém prostředí Borland Delphi 7.0. Vizualizace do trojrozměrného modelu je vytvořena na platformě OpenGL [38] přímým programováním bez použití podpurných knihoven. Každý element MKP sítě (v tomto případě čtyřstěn) je složen ze čtyř trojúhelníků texturovaných lineárním přechodem s barvami, které odpovídají hodnotám v okolních uzlech (obr. 2). Hodnotou v uzlu může být napětí získané přímo z MKP výpočtů nebo vlastní vypočtená hodnota. Pro účely disertační práce byl použit zejména výpočet

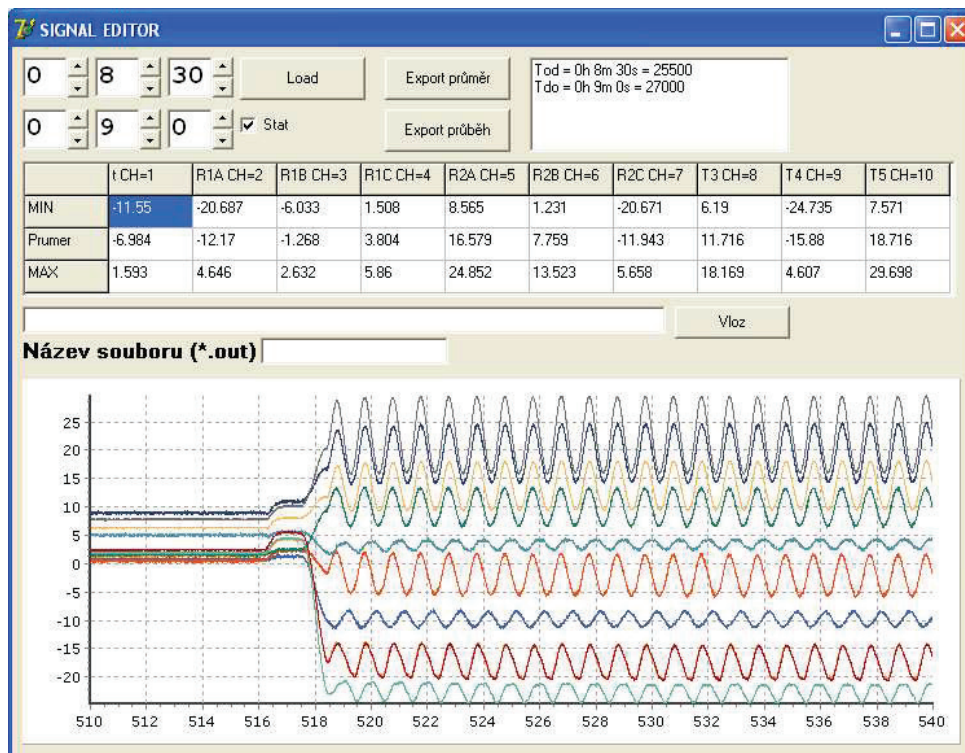
korelačního koeficientu mezi zvolenými složkami napětí ve dvou uzlech přes zvolené stavy zatížení.



**Obr. 2** – Náhled na mapovaný povrch jednoho z elementů

### 4.3. Vyhodnocovací software

Pro zjednodušení vyhodnocení experimentálně naměřených dat bylo vytvořeno několik vyhodnocovacích programů. Základním úkolem bylo rozdělit datové soubory velkých datových objemů na bloky určené k vyhodnocení.



**Obr. 3** – Program pro rozdělování velkých datových souborů.

Vstupem jsou datové soubory obsahující naměřené hodnoty napětí tenzometrů a hodnoty zatěžujících sil. Program umožňuje výběr části signálu, který má být vyhodnocen. Při exportu výsledků jsou exportovány vstupní hodnoty a zároveň jsou dle potřeby dopočteny následující hodnoty:

- Hodnoty  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\alpha$  a  $\tau_{\max}$  vypočtené ze vstupních hodnot napětí  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$  a  $\sigma_c$  změřených pomocí tenzometrických růžic.
- Hodnoty napětí stanovené z měrné napěťové odezvy na základě naměřených sil.

Vypočtené hodnoty lze exportovat do datových souborů a následně zpracovat nebo vynést do grafů.

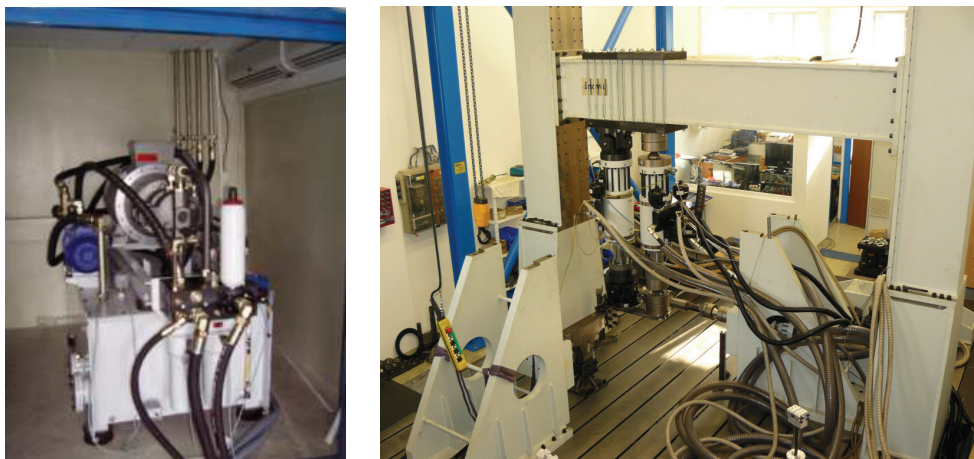
## **4.4. Nástroje a metody experimentálního ověření**

### **4.4.1. Tenzometrické měření**

Pro tenzometrické měření byly použity jak klasické tenzometry, tak tenzometrické růžice. Jednalo se o tenzometry o velikosti mřížky 3 mm a jmenovitým odporem 120Ω. Všechny tenzometrické můstky byly zapojeny pro kompenzaci teploty do polovičního Wheatstoneova můstku. Pro jeden měřicí kanál tedy byly použity vždy dva tenzometry. Jeden aktivní a jeden kompenzační. Všechny kanály byly připojeny k měřicí ústředně DMCplus, která obsahovala 18 měřících karet typu DV 55. Na tyto karty byly připojeny také napěťové výstupy zatěžujících sil z řídicího počítače zatěžovacího stroje. Měřicí ústředna byla propojena s měřícím počítačem pomocí převodníku USB ↔ GPIB. Měřená data byla online zobrazována a ukládána do měřicího počítače. Konkrétní realizace tenzometrického měření je popsána v kapitole 9 a v příloze č. 4.

### **4.4.2. Dynamický zkušební stav**

Pro experimentální ověření metody bylo provedeno několik statických i dynamických zkoušek na dynamickém zkušebním stavu (DZS) v těžkých laboratořích DFJP. Jedná se o elektronicky řízený elektrohydraulický systém, který umožňuje statické i dynamické zatěžování konstrukcí. Celý zkušební stav je nesen základovou ocelolitinovou deskou o rozměrech 6,0 x 2,0 x 0,5 m odpruženou od základu budovy. Vlastní frekvence uložení je cca 2 Hz. Na základovou desku lze montovat libovolné zátěžové sestavy – systém je stavebnicový. Spojení se základovou deskou je provedeno pomocí podélných T-drážek DIN 650-22H12 s roztečí 250 mm. Jako zdroj tlaku je zde použit hydraulický agregát HU 165 o výkonu 100 kW, který vyvine tlak až 28 MPa a dovede dodávat až 165 l oleje za minutu (obr. 4). Tlak oleje je poté přiveden do napáječů, které dodávají olej do jednotlivých elektrohydraulických (EH) válců.



**Obr. 4 – Hydraulický agregát HU 165 a stavebnicový rám.**

Řízení je zabezpečeno regulátory jednotlivých válců a řídicím počítačem [41]. Každý z EH válců má integrovaný snímač polohy (indukční) a do zátěžové sestavy je vždy vložen siloměr (tenzometrický). Oba signály jsou měřeny měřicím zesilovačem, který je součástí každého regulátoru příslušného EH válce. Zde jsou signály převedeny na signál s úrovní +/- 10 V a tento signál je dále přenesen do AD převodníku v řídicím počítači (měřicí AD karta ADAS16) [42, 43].

Při experimentech byly tyto signály přivedeny také do měřicí ústředny DMCplus, která byla použita pro tenzometrické měření. Synchronizace naměřených dat mezi signály sil a napětí tenzometrů tak byla zaručena. V případě statických zkoušek je na základě naměřených hodnot vysílán signál požadované hodnoty řídicího PC po datové lince RS 485 přímo do regulátoru příslušného EH válce, který pak generuje signál pro elektrohydraulické servoventily, které řídí průtok oleje nad a pod píst EH válce. V případě dynamických zkoušek je tento signál požadované hodnoty generován AD převodníkem v řídicím PC (nebo externím zařízením) v napěťové úrovni +/- 10 V a následně odeslán do regulátoru, který pak na základě tohoto signálu řídí EH servoventily na EH válcích. V obou případech může být zpětnou vazbou řídicí smyčky signál síly nebo signál polohy. Samotná regulace je řešena jako PID regulátor, jehož parametry lze přes datovou linku měnit v regulátorech pomocí řídicího PC. Optimální hodnoty PID regulátoru je nutné zjistit experimentálně na základě odezvy soustavy na pokusný skokový signál (obr. 5). Cílem je nastavit takové parametry, aby se skutečný průběh co nejvíce podobal průběhu požadovanému. Při nevhodném zadání PID konstant hrozí rezonance soustavy, která může způsobit překročení mezních hodnot síly nebo polohy, nebo naopak nastane situace, kdy regulovaná veličina nedosáhne požadovaných hodnot.



**Obr. 5** – Příklad odezvy PID regulátoru při optimalizaci válce

## 5. Úvodní popis navržené metodiky

### 5.1. Cíl navržené metodiky

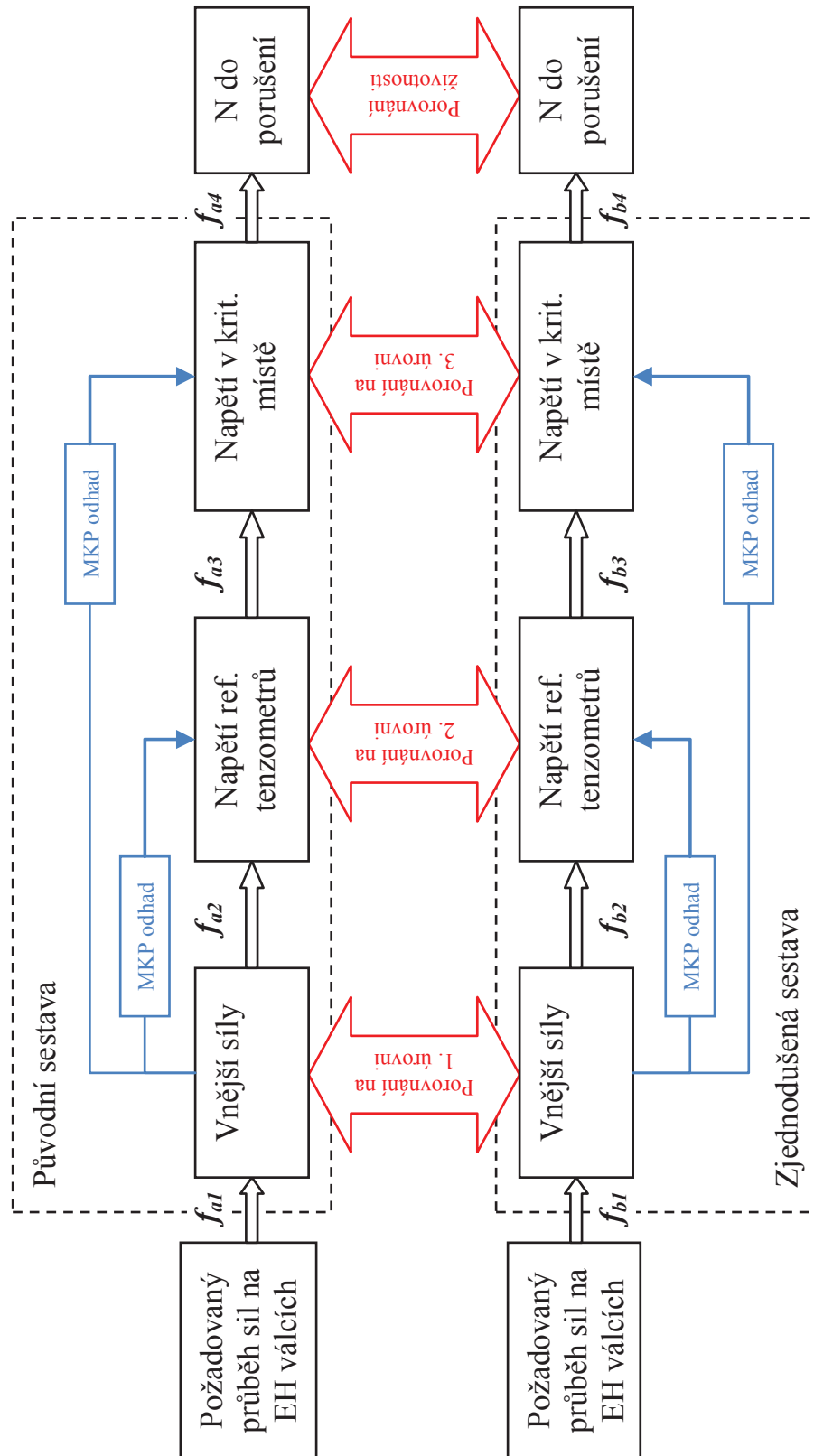
Navržená metodika zjednodušení má za úkol snížit potřebný počet válců (tzn. i dalšího vybavení) při únavových zkouškách pro zjištění únavových vlastností konstrukčních uzlů a to zejména konstrukčních uzlů konstrukcí kolejových vozidel. Aby bylo možné metodiku uplatnit, bylo potřeba navrhnout nejen samotný systém zjednodušení, ale také nalézt systém hodnocení ekvivalentnosti nového (zjednodušeného) zatížení. Tento systém hodnocení může v principu vycházet z některých hypotéz únavového porušení materiálu používaných při odhadu životnosti konstrukcí. Bylo tedy nutné najít takovou hypotézu, která by nebyla příliš konzervativní a z pohledu únavy materiálu umožnila porovnat účinky od zatížení dvou sestav co nejpřesněji a také co nejjednodušeji.

### 5.2. Předpoklady pro použití metodiky

Při použití metody se předpokládá, že zatěžovaná sestava je lineární. Pokud se bude hladina zatížení pohybovat v oblasti vysokocyklové únavy, pak je zaručeno, že z pohledu velikostí deformací a napětí bude platit Hookův zákon. Dalším důležitým předpokladem je vhodné upevnění, které musí být dostatečně pevné – zejména pak bez vůlí, které by do systému zatěžování vnesly nelinearity. Dále je nutné, aby byl vzorek dostatečně tuhý a mohlo být použito řízení EH válců v režimu, kdy veličinou pro zpětnou vazbu řízení je síla. Další předpoklad je, aby zatěžovaný vzorek měl z pohledu aplikovaného zatížení jedno kritické místo. Neměl by nastat stav, kdy jsou na vzorku dvě kritická místa, a pravděpodobnost únavového porušení je s ohledem na zatížení v obou místech stejná. Jediný akceptovatelný případ je, pokud by byl vzorek souměrný.

Před samotnou aplikací metody musí být provedena analýza (nejlépe pomocí MKP), pomocí které se stanoví místo předpokládaného porušení konstrukce – kritické místo. Výsledek této analýzy je závislý na vstupech – zejména na aplikovaném zatížení. Mělo by být použito takové zatížení, které by bylo svým charakterem ekvivalentní k zatížení v provozu. Na vzorku budou vhodně rozmístěny referenční tenzometry. Ty mají důležitou funkci jednak pro ověření, zda je do vzorku vnášeno správné zatížení a také pro verifikaci MKP analýz, které slouží jako podklad pro generaci zjednodušeného zatížení.

Na obr. 6 je znázorněno blokové schéma znázorňující teoretický model sestavy původní a sestavy zjednodušené včetně tří úrovní kontroly ekvivalentnosti obou sestav. Modely obou sestav jsou totožné co do použitých bloků, přenosové funkce mezi bloky jsou však rozdílné.



Obr. 6 – Blokové schéma teoretického modelu sestavy

Na počátku obou případů jsou požadované průběhy sil. Tyto průběhy zpravidla nemohou být stejné u obou sestav, protože právě změna způsobu zatěžování je předmětem zjednodušení. Přenosová funkce  $f_{a1}$  (resp.  $f_{b1}$ ) představuje vztah mezi požadovanými a reálně dosaženými hodnotami sil. Tuto funkci nelze zpravidla předem odhadnout, protože obsahuje mnoho vlivů, mezi které patří např.: vlastnosti regulační smyčky EH válců, vlastnosti hydraulického okruhu, vlastnosti elektrického okruhu, vlastnosti siloměrů zařazených do zpětnovazební smyčky, mechanické vlastnosti upevnění vzorku k přípravkům a k základnímu rámu. Blok „vnější síly“ tedy představuje síly, které působí přímo na vzorek, nikoli síly, které jsou změřeny siloměrem na EH válci. Rozdíl mezi těmito hodnotami ovšem není dán všemi vlivy spadajícími do přenosu  $f_{a1}$ , ale je dán pouze vlastnostmi přípravků a kloubů zařazených mezi siloměrem a vzorkem, popř. kinematickými vlastnostmi celé sestavy. Při hodnocení budou tyto vlivy z části zanedbány, protože není možné je všechny identifikovat.

Blok „napětí referenčních tenzometrů“ představuje hodnoty naměřené na referenčních tenzometrech. Toto napětí samozřejmě vznikne na základě působení vnějších sil. Odezva na tenzometrech je pak dána zejména geometrií samotného vzorku. Přenos mezi vnějšími silami a napětím na tenzometrech je lineární, resp. je to jeden z předpokladů použití metodiky. Tento přenos lze odhadnout pomocí MKP analýzy – postup bude popsán dále.

Blok „napětí v kritickém místě“ představuje napětí v kritickém místě konstrukčního uzlu. Tyto hodnoty nejsou obvykle experimentálně jednoznačně ověřitelné, protože kritické místo je obvykle poměrně malé a tvořené vrubem, ve kterém není možné použít tenzometr. Samozřejmě by bylo možné použít jiné metody, zejména bezkontaktní optické metody, ale ty zatím nejsou dostatečně přesné pro tyto účely. Napjatost v kritickém místě je tedy potřeba odhadnout za použití MKP analýzy, pomocí které lze určit přenos  $f_{a3}$  nebo nejlépe rovnou  $f_{a2} + f_{a3}$ .

Vztah mezi blokem „napětí v kritickém místě“ a blokem „N do porušení“ představuje samotný únavový proces porušení materiálu v kritickém místě. Tento princip sice není zcela znám, protože v sobě ukrývá mnoho nejistot plynoucích z reálného materiálu a reálného vzorku. Právě určení vztahu mezi napětím a počtem cyklů do poruchy (S-N křivka) je cílem experimentálního ověření materiálových charakteristik konstrukčních uzlů.



## 6. Principy, metody a postupy použité u navržené metodiky

### 6.1. Hodnocení ekvivalentnosti zatížení

Obecně je cílem metodiky navrhnout takové zatížení, které by z pohledu realizace sestavy bylo jednodušší, ale z pohledu počtů cyklů do poruchy bylo ekvivalentní k původnímu zatížení. Důležité je si uvědomit, že samotná shoda počtu cyklů do poruchy není určující pro splnění ekvivalentnosti. V extrémním případě totiž může dojít k tomu, že je vzorek namáhán zcela jiným způsobem, ale dojde k poruše při stejném (obdobném) počtu cyklů. Výsledkem pak zřejmě bude rozdílný průběh vzniklých trhlin mezi oběma případy. Z toho plyne, že je nutné ekvivalentnost hodnotit také podle dalších parametrů. Z pohledu teoretického modelu na obr. 6 lze ekvivalentnost hodnotit ve 3 různých úrovních a pak také samotným porovnáním výsledného počtu cyklů do poruchy (4. úroveň).

- a) Hodnocení na 1. úrovni - První úroveň hodnocení porovnává hodnoty vnějších sil. Toto porovnání sice za podmínky, že všechny následující přenosové funkce obou sestav jsou stejné, zabezpečí stejné výsledky, ale prakticky až na výjimky znemožňuje jakékoli zjednodušení ve způsobu zatěžování. Tento způsob tedy není vhodný.
- b) Hodnocení na 2. úrovni - Tento způsob umožňuje hodnotit napjatost v konstrukci s ohledem na umístěné tenzometry. Tyto hodnoty lze získat jak experimentálně tak MKP výpočtem.
- c) Hodnocení na 3. úrovni - Tato možnost porovnání má zásadní omezení pokud se jedná o experimentální ověření. Obvykle totiž nelze přímo experimentálně stanovit napětí v kritickém místě, protože do tohoto místa nelze aplikovat tenzometr natožpak tenzometrickou růžici. Je to ale místo, ve kterém dojde k porušení materiálu, takže z pohledu hodnocení je klíčové.
- d) Hodnocení na 4. úrovni - Posledním parametrem, který lze mezi dvěma různými sestavami hodnotit je výsledná životnost konstrukce resp. počet cyklů do poruchy. Rovnost mezi sestavami musí být s určitou malou nepřesností zaručena. Musí být také zaručeno, že bude stejný také charakter porušení.

Popsané možnosti hodnocení jsou však pouze obecné. Není zde řečeno jaká složka napětí a jakým způsobem bude hodnocena atd.

## 6.2. Hodnocení ekvivalentnosti napjatosti konstrukce

V předchozí kapitole byly popsány 4 úrovně v teoretickém modelu sestavy, ve kterých lze hodnotit ekvivalentnost dvou sestav. Cílem samozřejmě je, aby bylo dosaženo stejného počtu cyklů do poruchy (4. úroveň), ale jak již bylo řečeno, musí být mimo jiné splněna podmínka, že nové zatížení má stejný charakter, resp. že dojde ke stejnému způsobu porušení na stejném místě oproti původní sestavě. Tato druhá podmínka může být splněna pouze v případě, že napjatost v kritickém místě bude z pohledu únavového porušení stejná (obdobně). Existuje několik teorií, které popisují vztah mezi napjatostí v materiálu a únavovým porušením. Existuje také mnoho vlivů, které tento vztah ovlivňují. Téměř všechny teorie vznikly za účelem odhadu životnosti konstrukcí nebo pro použití při dimenzování konstrukcí ve fázi jejich návrhu. Některé postupy uplatňované v těchto teoriích je možné využít právě k hodnocení ekvivalentnosti dvou zatížení.

Při porovnávání ekvivalentnosti zatížení dvou sestav však pochopitelně celý postup použít nelze, protože by to popíralo základní princip a vlastně i cíl experimentálního ověřování únavových parametrů konstrukčního uzlu. Pomocí materiálových charakteristik základního materiálu a odhadů životnosti lze pouze odhadnout vhodné zatížení prvního vzorku při návrhu experimentu.

Pokud bychom hodnotili napjatost na povrchu vzorku jako rovinnou, pak tato je určena třemi složkami:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\alpha$  nebo  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau$ . Pokud není potřeba hodnotit směr hlavního napětí vůči souřadnému systému, pak lze z hodnocení vynechat hodnotu  $\alpha$  jako úhel směru hlavního napětí vůči směru osového napětí např. ve směru X. Graficky lze vztah mezi všemi složkami znázorňovat pomocí Mohrova diagramu.

Při hodnocení únavy se předpokládá, a také experimenty to potvrzují, že tahová a smyková složka mají na únavovou pevnost rozdílný účinek. Na základě těchto předpokladů vznikly také základní statické hypotézy porušování materiálu a to: hypotéza maximálního normálového napětí, hypotéza maximálního smykového napětí a hypotéza HMM. V několika zdrojích [9, 10] lze nalézt poměr meze únavy pro tah k mezi únavy pro smyk, a to v poměru:

$$\frac{\sigma_c}{\tau_c} = \sqrt{3}. \quad (1)$$

Také sklon únavové křivky se předpokládá odlišný. U tahového napětí je to  $m = 3$  a u smykového napětí  $m = 5$  [9, 10]. Téměř ve všech případech se uvádí únavové křivky pro kategorie detailů namáhaných tahem a kategorie detailů namáhaných smykem. Přitom směr, ve kterém se hodnotí napjatost, je obvykle vztahen ke směru předpokládané trhliny. Pokud opomeneme to, že směr trhliny lze zjistit až experimentem, pak je přesný směr trhliny předem neznámý. Odhadnout jej

však lze. Při složitém způsobu zatěžování v čase, kdy se směr napjatosti mění, je přesný směr trhliny téměř nezjistitelný.

Pokud tedy není přesně znám směr trhliny, pak ani nelze přesně znát směr tahové (smykové) složky napětí, která by měla porušení způsobit. Pokud se směr v průběhu zatěžování mění, pak se obvykle mění i poměr smykové a tahové složky. Jaký má tato kombinace složek účinek na únavovou pevnost? Jakou křivku únavové pevnosti v tomto případě použít? Je dominantní namáhání smykové nebo tahové? Obecně lze říci, že to závisí také na vlastnostech materiálu. V každém případě zde vznikl předpoklad hodnotit obě složky napětí.

Dle výše zmíněných informací jsem navrhnul několik variant hodnocení. Jedná se o varianty vycházející ze základních principů tří zmíněných hypotéz (není však vyloučeno použití i jiných postupů).

### Jednparametrické

- a) **Hodnota  $\sigma_1$**  – *Hodnotí se pouze hodnota hlavního napětí - není zohledněn jeho směr!*
- b) **Hodnota  $\tau_{\max}$**  - *Hodnotí se pouze hodnota maximálního smykového napětí, není zohledněn směr!*
- c) **Hodnota  $\sigma_{\text{HMH}}$**  – *Hodnotí se pouze tato hodnota – nelze tedy zohlednit směr ani poměr smykové a tahové složky! Nelze zohlednit záporné hodnoty napětí (hodnota již z principu výpočtu nikdy nedosáhne záporné hodnoty).*
- d) **Referenční napětí  $\sigma$**  – *Na konstrukci je vhodně umístěn tenzometr nebo více tenzometrů, které měří napětí v příslušném směru. Předpoklad je, že mezi tímto napětím a maximálním napětím ve vrubu je vztah. Hodnotí se hodnota napětí ve směru tenzometru a ta je následně přepočtena na napětí ve vrubu (v kritickém místě). To vyžaduje předběžnou detailní MKP analýzu v okolí kritického místa a vhodné umístění tenzometru. Tuto metodu nelze použít obecně.*

### Dvoupametrické

- e) **Hodnota  $\sigma_1 - \tau_{\max}$**  - *Hodnotí se obě hodnoty napětí a to s ohledem na mezní elipsu únavového porušení v  $\sigma - \tau$  diagramu. Není zohledněn směr (orientace) ve vztahu ke kritickému místu. Zatížení je ekvivalentní pokud body obou porovnávaných případů leží na jedné elipse konstantní únavové pevnosti v  $\sigma - \tau$  diagramu.*
- f) **Hodnota  $\sigma - \tau$**  – *Hodnotí se hodnota tahového napětí a hodnota smykového napětí ve zvoleném referenčním směru. Tento směr musí být orientován s ohledem na předpokládaný směr trhliny. Hodnotí se obě hodnoty napětí a to*

s ohledem na mezní elipsu únavového porušení v  $\sigma - \tau$  diagramu. Je tedy zohledněn směr (orientace) ve vztahu ke kritickému místu. Zatížení je ekvivalentní pokud body obou porovnávaných případů leží na jedné elipse konstantní únavové pevnosti v  $\sigma - \tau$  diagramu.

Jak již bylo řečeno, lze použít i další metody. U všech metod se vždy předpokládá vhodné umístění tenzometrů, které je klíčové pro správnou funkci každé z metod. Umístění lze odhadnout z MKP analýz nebo předchozích zkušeností získaných na obdobných konstrukcích. Je potřeba zdůraznit, že umístění tenzometru není ovlivněno pouze geometrií konstrukce ale také způsobem zatěžování. Důležitý je pak zejména účinek dominantních složek zatížení a to nejen pokud se jedná o jejich absolutní hodnoty napětí, ale zejména také o četnost v zátěžovém bloku (resp. v provozu). Pokud pro hodnocené kritérium (pro zvolenou hypotézu únavového porušení) platí superpozice účinků, pak lze použít navrženou metodiku pro zjednodušení zátěžové sestavy.

V následující tabulce (tab. 1a) jsou přehledně zhodnoceny vlastnosti popsaných způsobů hodnocení ekvivalentnosti napjatosti konstrukce (kritického místa).

**Tab. 1a - Výběr vhodné hypotézy pro hodnocení ekvivalentnosti zatížení**

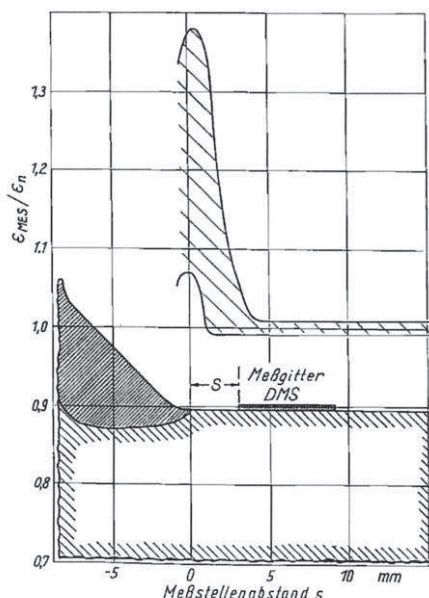
Metoda \ Vlastnost	Zohledňuje orientaci namáhání vůči vrubu?	Lze zohlednit střední hodnotu?	Platí princip superpozice?	Zohledňuje tahovou složku?	Zohledňuje smykovou složku?	Lze zohlednit časovou následnost?	Je metoda obecně použitelná?	Počet hodnocených parametrů
$\sigma_1$	-	++	+	++	-	++	++	1
$\tau_{\max}$	-	++	+	-	++	++	++	1
$\sigma_{HMH}$	--	++	--	+	+	++	++	1
$\sigma$	++	++	++	+	-	++	+	1 (n)
$\sigma_1 - \tau_{\max}$	-	++	+	++	++	++	++	2
$\sigma - \tau$	++	++	++	++	++	++	++	2

**Tab. 1b - Označení použitá v tab. 1a.**

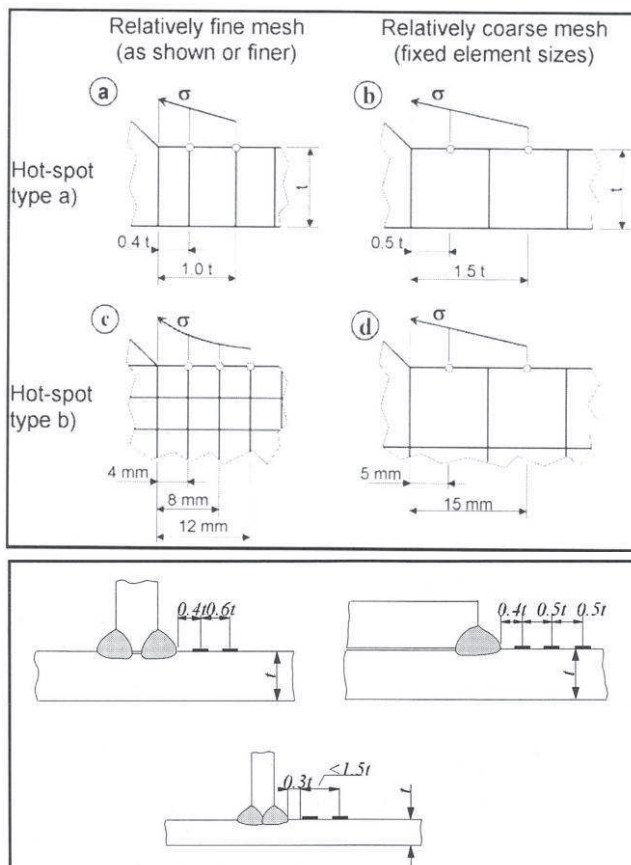
<b>++</b>	ANO,
<b>+</b>	ANO, pouze za určitých podmínek,
<b>0</b>	nelze hodnotit,
<b>-</b>	NE, až na určité výjimky,
<b>--</b>	NE.

### 6.3. Hodnocení s ohledem na kritické místo

Všechny metody popsané v předchozí kapitole hodnotí napětí v kritickém místě, jak již bylo ale zmíněno, tak toto napětí nelze obvykle experimentálně měřit. Je tedy potřeba použít vhodnou metodu odhadu hodnocené složky napětí ve vrubu (kritickém místě). Bude se tedy jednat o hodnocení na druhé úrovni podle schématu teoretického modelu sestavy s přepočtem do třetí úrovně (obr. 6). Špičky napětí ve vrubu lze odhadnout podle hodnot napětí naměřených (vypočtených) v okolí vrubu. Např. v [10] se uvádí postupy jak odhadnout (hodnotit) napětí ve vrubu, a to jak pro experimentální ověření, tak pro MKP analýzu. Uvedeny jsou dva principy, a to extrapolace lineární vypočtena z napětí ve dvou místech nebo extrapolace vypočtena ze třech hodnot napětí (obr. 7 a 8) zjištěných v okolí vrubu.



**Obr. 7 – Princip umístění tenzometru v okolí vrubu [2]**



**Obr. 8** – Princip extrapolace nominálního napětí do místa vrubu dle [9]

Tyto metody však byly navrženy zejména pro určení maximálního napětí ve svaru a jak je vidět z obrázků, tak například umístění tenzometrů je závislé na tloušťce materiálu konstrukce v místě měření. Obecný princip je vlastně založen na koncentraci napětí v místě vrubu oproti nominálnímu napětí v konkrétním směru (řezu). Metoda tedy nemusí být obecně použitelná pro jakýkoli případ koncentrace mechanického napětí, protože je hodnocena pouze ve dvou rozměrech (rovina řezu) a je hodnocena pouze jediná složka napětí. Tento vztah lze určit pomocí MKP výpočtů, kde lze zohlednit i více složek napětí. Zde je ale potřeba mít na paměti, že právě velmi velký gradient napětí na velmi malé vzdálenosti (s ohledem na velikost konečných prvků) nemusí vykazovat dostatečně přesné výsledky.

V této práci není cílem hledat obecný vztah mezi napětím ve vrubu a nominálním napětím, protože právě výsledky experimentálního ověření únavových charakteristik konstrukčního uzlu v sobě zahrnují tento efekt. Pokud opravdu dojde k porušení materiálu v kritickém místě, pak výsledkem je vztah mezi aplikovaným zatížením a únavovou pevností v kritickém místě. Samotným výsledkem jsou tedy počty cyklů do porušení při aplikaci předpokládaného zatížení.

Cílem je ale vhodně zvolit referenční místa, která dostatečně korelují s napětím ve vrubu. Pod pojmem „napětí“ je ale potřeba si představit tu složku

napětí, která podle předpokladů z předchozí kapitoly způsobuje únavové poškození materiálu. Tímto se ovšem můžeme dostat k protichůdným požadavkům na umístění tenzometrů, pokud se parametry hledaného místa stanou závislé na způsobu zatěžování. Tato závislost je obvykle způsobena změnou směru napjatosti, zejména při nesoufázovém zatížení. Aby tedy bylo možné stanovit odezvy ve vrubu (kritickém místě) je nutné provést MKP analýzu vzorku, protože experimentální ověření přímo v kritickém místě nemůže být vždy zaručeno.

#### **6.4. MKP analýza konstrukce**

Aby bylo možné metodu zjednodušení aplikovat na konkrétní konstrukci a pro konkrétní způsob zatěžování, je potřeba alespoň odhadem předem znát chování konstrukce z pohledu napěťové odezvy. Je nutné provést výpočet při několika variantách zatížení a každou variantu poté vyhodnotit. Pro zjednodušení a urychlení tohoto kroku byl navržen následující postup:

- 1) Vytvoří se příslušný MKP model.
- 2) Všechny složky zatížení se aplikují s jednotkovou velikostí (např. 1 kN).
- 3) Jsou vypočteny všechny varianty vždy pouze pro jednu složku zatížení.
- 4) Všechny složky napětí v uzlech se exportují pro další zpracování.

Takto získaná data tedy představují napětí v konstrukci vždy pro jednotkové zatížení od konkrétní složky zatížení. Hodnoty jsou sice exportovány z MKP SW obvykle ve fyzikální jednotce *MPa*, ale pro další použití je lze označit jako jednotku *kN/MPa*, protože jsou vždy vztažené na jednotku zatížení v jednotkách *kN*. Tato hodnota je **měrná napěťovou odezvou**.

##### **6.4.1. Vztah mezi napěťovou odezvou a zatížením**

Za předpokladu, že je model lineární tzn., že velikost napěťové odezvy v konstrukci je lineárně závislá na velikosti silového zatížení objektu, lze psát:

$$k \cdot F = \sigma \quad (2)$$

Pokud bychom hodnotili rovinnou napjatost, pak je nutné hodnotit tolik složek, aby byla tato napjatost jednoznačně popsána. Obecně jak pro rovinnou napjatost, tak pro prostorovou napjatost to jsou všechny osově normálové složky napětí a také všechny složky smykové. Každá složka napětí bude mít jinou citlivost odezvy na zatěžující sílu. Pro rovinnou napjatost je tedy potřeba definovat 3 a pro prostorovou 6 složek měrné napěťové odezvy *k*. Závislost je pak podle (3) pro rovinnou napjatost, podle (4) pro prostorovou napjatost.

$$\begin{bmatrix} k_{\sigma x} \\ k_{\sigma y} \\ k_{\tau xy} \end{bmatrix} \cdot F = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} k_{\sigma x} \\ k_{\sigma y} \\ k_{\sigma z} \\ k_{\tau xy} \\ k_{\tau yz} \\ k_{\tau zx} \end{bmatrix} \cdot F = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (4)$$

V provozu může na konstrukci působit i více sil. Za podmínky, že platí princip superpozice, pak lze účinky těchto sil sčítat. V tomto případě je nutné stanovit pro každou zatěžující složku samostatnou matici koeficientů úměrnosti. Proto budou matice koeficientů úměrnosti označeny indexem zatěžující složky. Označení matic bude provedeno dle (5) a (6).

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{\sigma x} \\ k_{\sigma y} \\ k_{\tau xy} \end{bmatrix} \text{ resp. } [K] = \begin{bmatrix} k_{\sigma x} \\ k_{\sigma y} \\ k_{\sigma z} \\ k_{\tau xy} \\ k_{\tau yz} \\ k_{\tau zx} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \text{ resp. } [S] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Pak lze bez ohledu na rozměr úlohy napsat:

$$[K] \cdot F = [S]. \quad (7)$$

Pokud by na objekt působilo více složek zatížení, pak:

$$\sum_{i=0..n} ([K]_i \cdot F_i) = [S] \quad (8)$$



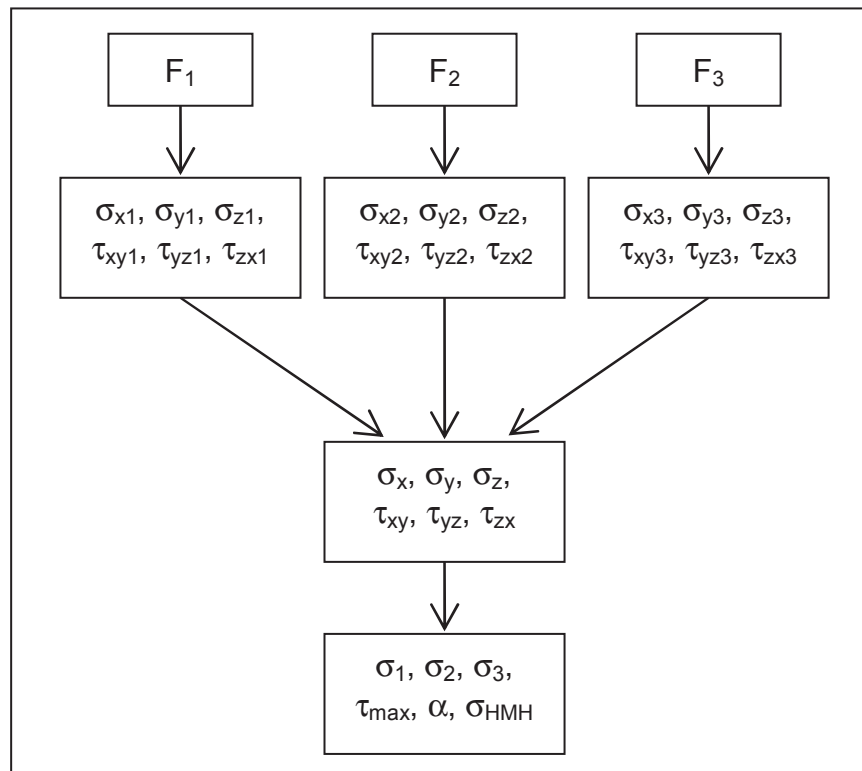
To lze ale převést na čistě maticový zápis, kdy matice **K** bude obsahovat koeficienty pro všechny složky zatížení:

$$\begin{bmatrix} k_{\sigma x 1} & \dots & k_{\sigma x n} \\ k_{\sigma y 1} & \dots & k_{\sigma y n} \\ k_{\sigma z 1} & \dots & k_{\sigma z n} \\ k_{\tau xy 1} & \dots & k_{\tau xy n} \\ k_{\tau yz 1} & \dots & k_{\tau yz n} \\ k_{\tau zx 1} & \dots & k_{\tau zx n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Takto rozšířená matice koeficientů úměrnosti bude mít podle rozměrnosti úlohy 3 resp. 6 řádků a počet sloupců podle počtu zatěžujících složek. Tato matice je **maticí měrné napěťové odezvy** a její hodnoty budou stanoveny pro jednotkovou hodnotu zatížení přesně, tak jak bylo popsáno na začátku kapitoly. Hodnoty *k* jsou tedy v jednotkách *MPa/kN* a lze je stanovit v případě trojrozměrné varianty (v celém objemu konstrukce) pomocí MKP výpočtů. V případě dvourozměrné varianty (na povrchu konstrukce) jak pomocí MKP výpočtů, tak experimentálně. Je ale potřeba připomenout, že tato matice popisuje odezvy pouze v jednom jediném místě na konstrukci (resp. v MKP uzlu nebo v místě tenzometru). Pro stanovení napjatosti v celé konstrukci (všech uzlech) lze použít pouze MKP výpočet. V případě experimentu lze odezvy stanovit pouze v místě měření napětí – v místech kde byly umístěny tenzometry – a to pouze pro napětí změřené v hlavním směru mřížky tenzometru. Lze ale předpokládat, že pokud bude nalezena shoda mezi vypočteným a experimentálně zjištěným napětím v dostatečném počtu vhodně zvolených referenčních míst, pak bude napjatost v konstrukci ekvivalentní.

#### 6.4.2. Nalezení matice měrné odezvy

Matici měrné napěťové odezvy lze stanovit tak, že se zkoumaný objekt postupně zatíží jednotlivými složkami zatížení. To lze s výhodou provést jak při použití MKP analýzy, tak i experimentálně. V případě MKP analýzy se aplikuje přímo hodnota zatížení o jednotkové velikosti (1 kN). V případě experimentu ale musí být hodnota zatížení rovna maximální hodnotě, která se předpokládá při provozu, nebo dostatečně velká s ohledem na přesnost měření jak sil, tak napětí. Takto zjištěné hodnoty jednotlivých složek napětí jsou v případě MKP přímo hodnotou měrné napěťové odezvy. V případě experimentu je nutné hodnotu přepočítat na jednotku působící síly.



Obr. 9 – Blokové schéma odhadu mech. napětí podle vnějšího zatížení

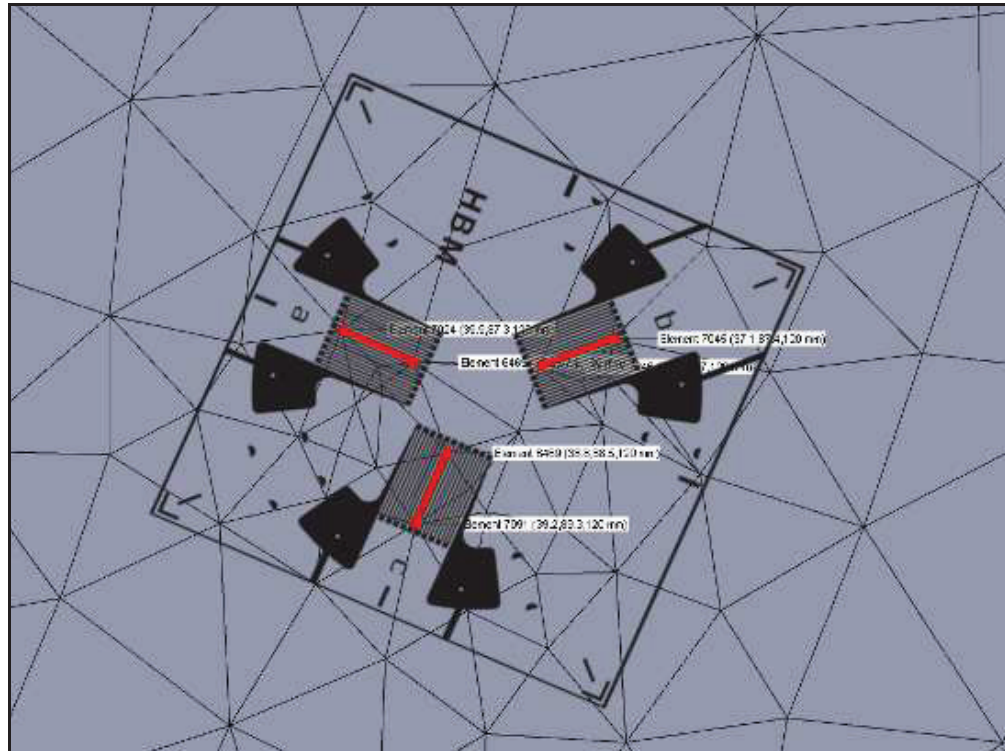
### 6.5. Principy porovnávání MKP výpočtů s experimentem

Při porovnání je potřeba vyřešit, jakým způsobem porovnávat napjatost zjištěnou při MKP analýze s napětím, které je experimentálně zjištěno měřením na tenzometru. Byly zvažovány tyto varianty:

- 1) Z hodnot osových napětí a hodnoty smykového napětí stanovených pro MKP uzel pod mřížkou tenzometru sestrojít Mohrovu kružnici (resp. na základě této teorie provést výpočet) a hodnotu napětí přepočíst do směru, kterým směřuje hlavní směr mřížky tenzometru.
- 2) V MKP modelu vytvořit na povrchu čtvercovou plošku (nebo čtvercový shell prvek), která by představovala mřížku tenzometru a pomocí její deformace přepočíst deformaci do hlavního směru mřížky tenzometru [29].
- 3) V MKP modelu vytvořit uzly sítě tak, aby se přesně na konci mřížky tenzometru nacházel uzel. Pomocí výpočtu vzdáleností uzlů v nezatíženém a následně zatíženém stavu lze určit poměrné prodloužení ve směru hlavní mřížky tenzometru (ve směru spojnice obou uzlů).

Každá metoda má své klady a zápory. Metody jsou rozdílné zejména v pracnosti přípravy MKP modelu, v pracnosti vyhodnocení dat a také v univerzálnosti. Klady a zápory jsou popsány níže:

- ad 1. Zde vzniká určitá nejistota o pravdivosti získaného výsledku, protože napjatost je získána z jediného bodu, ale skutečný tenzometr měří deformaci jako průměrnou hodnotu celé plochy pod aktivní části mřížky. Dále je nutné zabezpečit, aby se bod nacházel přesně uprostřed předpokládané mřížky. Hodnota napětí je pak do tohoto bodu přepočtena z okolních elementů. Dále princip výpočtu je sice algoritmizovatelný, ale oproti ostatním metodám mnohem složitěji zejména proto, že obnáší složitou analýzu geometrie MKP modelu v okolí uzlu a složitý přepočet osových napětí do jednoho obecného směru. Úloha je tedy použitelná, ale složitěji algoritmizovatelná, popř. zdlouhavá v případě jednorázového výpočtu pro příslušný tenzometr.
- ad 2. Podobná metoda byla nalezena v [29], kde byla použita pro vytvoření tzv. virtuálních tenzometrů. Metoda je vhodná pro případ, kdy je model vytvořen z shell prvků s rovnoměrnou sítí. Nevýhodou je, že virtuální tenzometry vzniknou v místě prvků. S ohledem na rovnoměrné rozložení sítě však v některých případech nelze prvky oproti tenzometru libovolně umísťovat a natáčet.
- ad 3. U této metody je nutné v MKP modelu vytvořit síť tak, aby na koncích mřížky vznikly uzly. Tato metoda je použitelná jak pro shell prvky (nutno zohlednit tloušťku prvků), tak pro objemové prvky. Vhodná je zejména pro nerovnoměrnou síť nebo pro rovnoměrnou síť, u které spojnice použitých uzlů směřuje požadovaným směrem. Konkrétní případ umístění tenzometrické růžice je vidět na obr. 10.



**Obr. 10** – Umístění tenzometrické růžice s ohledem na uzly MKP prvků.

Jak již bylo řečeno, tak výsledné napětí je vypočteno z deformace a to následujícím způsobem:

- 1) Z nezatíženého MKP modelu jsou odečteny X, Y a Z souřadnice počátečního (A) a koncového (B) uzlu:

$$x_A, y_A, z_A, x_B, y_B, z_B \quad (10)$$

- 2) Počáteční délka mřížky se vypočte jako:

$$l_0 = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \quad (11)$$

- 3) Z MKP výsledků pro zatížený stav jsou odečteny hodnoty posuvů obou bodů:

$$ux_A, uy_A, uz_A, ux_B, uy_B, uz_B \quad (12)$$

- 4) Deformovaná délka mřížky se vypočte jako:

$$l_1 = \sqrt{(x_A + ux_A - x_B - ux_B)^2 + (y_A + uy_A - y_B - uy_B)^2 + (z_A + uz_A - z_B - uz_B)^2} \quad (13)$$

- 5) Poměrné prodloužení je potom:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (14)$$

6) Z toho je mechanické napětí rovno:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (15)$$

Výše popsanou metodu lze použít jak pro verifikaci MKP výpočtů s experimentem, tak pro odhad napětí v kritickém místě na základě hodnot zjištěných referenčními tenzometry. Výhodou je, že je metoda lehce algoritmizovatelná a výpočetně nenáročná. V případě, že lze ovlivňovat tvorbu sítě MKP prvků je použitelná pro jakýkoli druh prvků. Je zde také nejjednodušším způsobem vyřešeno hodnocení rovinné napjatosti na povrchu konstrukce u trojrozměrné úlohy a to bez složitého nalezení orientace směru mřížky tenzometru v trojrozměrném prostoru.

### **6.6. Stanovení napětí v kritickém místě**

Pro stanovení napětí v kritickém místě byla v principu použita nepřímá metoda. Jednalo se o postupy založené na korelační analýze, MKP výpočtech a vše bylo částečně podloženo experimentem. Postup bude následující:

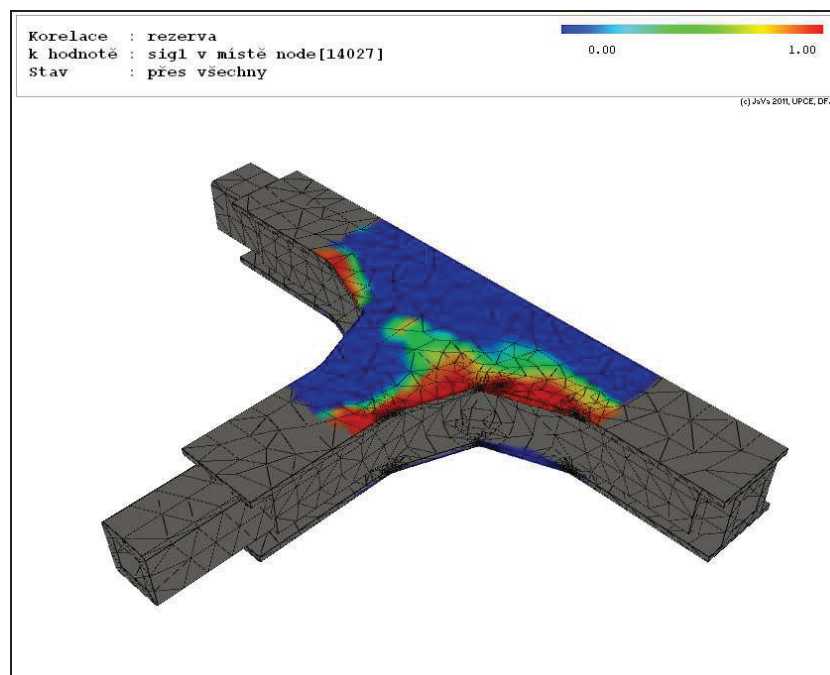
1. Provede se MKP analýza vzorku – stanovení měrné napěťové odezvy.
2. Provede se korelační analýza napětí v kritickém místě vzhledem ke všem místům na konstrukci, kam by bylo technicky možné umístit tenzometr.
3. Vyberou se nejvhodnější místa pro umístění tenzometrů. Tzn. místa s přijatelnou mírou korelace.
4. Pro verifikaci výsledků MKP výpočtů se provede experimentální zatížení konstrukce před započítáním dynamických zkoušek.
5. Z výsledků MKP analýz se vypočte funkční závislost pomocí lineární regrese. Pomocí této závislosti lze dle napětí na tenzometrech odhadnout napětí ve vrubu.

Podle 2. bodu výše uvedeného postupu je nutné vypočítat s ohledem na počet MKP uzlů velké množství korelačních koeficientů. Aby bylo možné tuto analýzu provést, bylo nutné k tomuto účelu sestavit vhodný program, který toto provede.

Postup výpočtu byl následující:

1. Import geometrie MKP modelu.
2. Import výsledků MKP výpočtů pro jednotlivé zátěžové stavy.
3. Analýza geometrie MKP modelu – výběr pouze povrchových uzlů.
4. Výběr uzlů, které představují kritické místo.
5. Stanovení směrů, ve kterých se bude analyzovat napětí – směry tenzometrů.
6. Samotný výpočet korelačních koeficientů.
7. Vykreslení barevné mapy do 3D modelu konstrukce.
8. Výpis výsledků seřazených podle hodnoty koeficientu korelace.
9. Výběr vhodných míst.
10. Stanovení funkční závislosti pro zvolená místa.

Pro obecné použití lze body 4 a 5 vynechat. Na obr. 11, 12 a 13 lze vidět konkrétní výstupy z programu. V prvním případě se jedná o barevnou mapu na konstrukci, která umožňuje rychlý přehled pro výběr vhodného místa. Pro výpočet lze aktivovat pouze některé plochy, na kterých se předpokládá umístění tenzometrů. Šedé plochy jsou neaktivní.



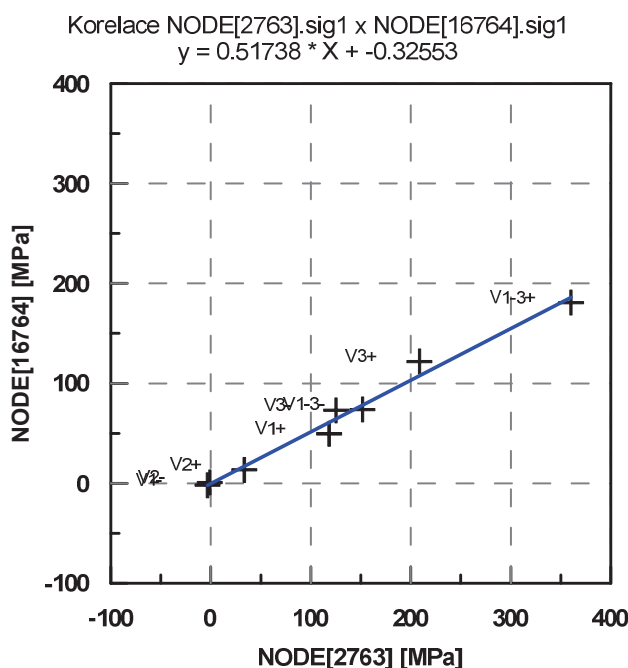
**Obr. 11** – Barevná mapa hodnot korelačního koeficientu vypočtených pouze na vybraných plochách.

Tuto mapu lze dále zobrazit tak, že jsou renderovány pouze plochy těch prvků, které dosahují přednastavené hodnoty korelace (obr. 13).

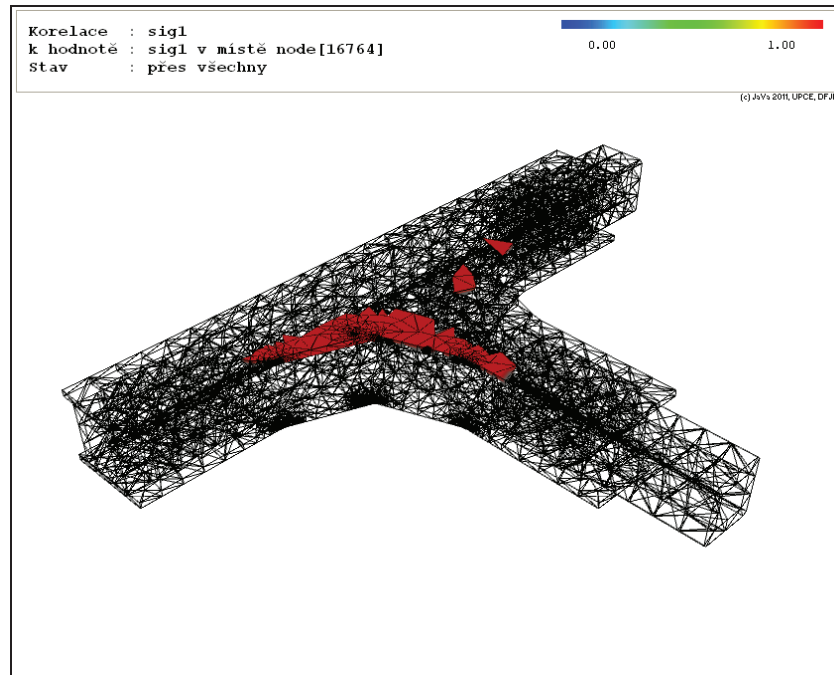
Druhým výstupem je funkční závislost resp. korelace mezi vybranou složkou napětí ve vybraných uzlech (obr. 12). Jednotlivé body v grafu představují extrémy jednotlivých zátěžových stavů. Modrá přímka pak představuje nalezenou funkční závislost. Samotná funkční závislost je pak zapsána v záhlaví grafu.

Celý postup, tak jak byl popsán, má svá omezení. Základním omezením je fakt, že nalezená korelace, zejména pak nalezená funkční závislost platí pouze pro zátěžové stavy, které vstupují do výpočtu. Výsledek tedy nelze považovat za obecně platný! Pro odhad pro konkrétní experiment, kde jsou všechny zátěžové stavy předem známy, je však dostačující.

V případě, že tyto postupy nelze použít, je možné napjatost v kritickém místě získat z měrné napěťové odezvy. Oproti původnímu postupu, kde bylo napětí určeno na základě hodnot z referenčních tenzometrů, je zde napětí v kritickém místě určeno na základě působících sil. Tento postup je sice jednodušší, avšak zde vstupují nejistoty plynoucí z rozdílu sil vnášených do vzorku a sil měřených siloměry v blízkosti EH válce.



**Obr. 12** – Nalezená závislost v hodnotách napětí u dvou MKP uzlů.



**Obr. 13** – Vykreslení elementů s hodnotou koeficientu korelace vyšším než 0,9.



## 7. Popis celkového postupu navržené metodiky

V následujících bodech bude popsán celý postup při zjednodušení způsobu zatěžování konstrukčního uzlu. V některých bodech jsou zmíněny postupy a principy popsané v předchozích kapitolách. Jiné budou popsány dále.

- 1) Jako vstupní hodnoty slouží průběhy vnějších sil, které jsou předpokládány při provozu (experimentu). Data mohou být získány experimentálně z prototypu konstrukce nebo jako výsledek multibody simulací.
- 2) Dalším vstupem jsou data potřebná pro porovnání ekvivalentnosti zatížení – napětí změřené v provozu na prototypu nebo napětí z MKP analýzy konstrukce vypočtené při zatížení dle předchozího bodu.
- 3) Proveďte návrh sestavy experimentu. Předpokladem je, že musí být zachována dominantní složka (složky) původního zatížení. Tato sestava bude dále označena jako „zjednodušená“.
- 4) Navržením sestavy s konstrukčním uzlem obnáší návrh samotného vzorku – konstrukčního uzlu, dále návrh upevnění a systému vnášení zatěžujících sil.
- 5) Proveďte MKP analýzu vzorku zatíženého dle navržené sestavy s jednotkovým zatížením od jednotlivých sil.
- 6) Z výsledků se provede určení měrné napěťové odezvy navržené sestavy. Výsledkem jsou měrné napěťové odezvy pro každou složku (sílu) zatížení.
- 7) Pomocí vhodného SW se na základě výsledků MKP analýzy najdou místa na konstrukci, kde budou umístěny referenční tenzometry tak, aby naměřené hodnoty dostatečně korelovaly s napětím v kritickém místě. Lze aplikovat také druhý přístup, kdy je napjatost v kritickém místě stanovena na základě hodnot zatěžujících sil.
- 8) Nalezne se funkční vztah mezi napětím referenčních tenzometrů a napětím v kritickém místě nebo napětím referenčních tenzometrů a hodnotami působících sil.
- 9) Z původního zatížení se vypočte průběh napětí pouze od dominantní síly.
- 10) Rozdíl mezi původním napětím a napětím od dominantní síly bude kompenzován ostatními silami, které v sestavě zůstaly.
- 11) Pomocí principů superpozice se navrhne účinky ostatních sil tak, aby bylo dosaženo stejného účinku jako mělo původní zatížení.
- 12) Po výpočtu nového zatížení se vypočte nový výsledný průběh napětí v kritickém místě.

- 13) Provede se porovnání původního a nového průběhu dle zvoleného kritéria hodnocení ekvivalentnosti zatížení. Pokud není nepřesnost v přijatelných mezích, pak je potřeba návrh upravit.
- 14) Před spuštěním samotného experimentu se provede kontrola, zda je odezva na referenčních tenzometrech s ohledem na silové zatížení dostatečně přesná při srovnání s MKP výpočty. Porovnání lze provést jako porovnání matic měrné napěťové odezvy MKP výpočtů a měrné napěťové odezvy zjištěné experimentálně. Verifikace MKP výpočtů tedy proběhne ve 2. úrovni teoretického modelu s ohledem na to, že bylo aplikováno stejné zatížení jak pro experiment, tak pro MKP výpočet.

S ohledem na účel, za kterým bylo ke zjednodušení přistoupeno a s ohledem na charakter vzorku se může postup nepatrně lišit. Zejména rozsah vstupních parametrů může být různý.

## 8. Aplikace metody na konkrétní vzorek

### 8.1. Návrh vzorku – výběr konstrukčního uzlu

Hlavním předpokladem při návrhu vzorku bylo to, že by se mělo jednat o konstrukční uzel charakteristický pro rám podvozku KV. Byl tedy navržen ocelový svařenec reprezentující konstrukční uzel spojení příčnicku s podélníkem. V druhé fázi byly stanoveny jeho rozměry a způsob upevnění.

Při volbě konstrukčního uzlu byly zohledněny následující faktory:

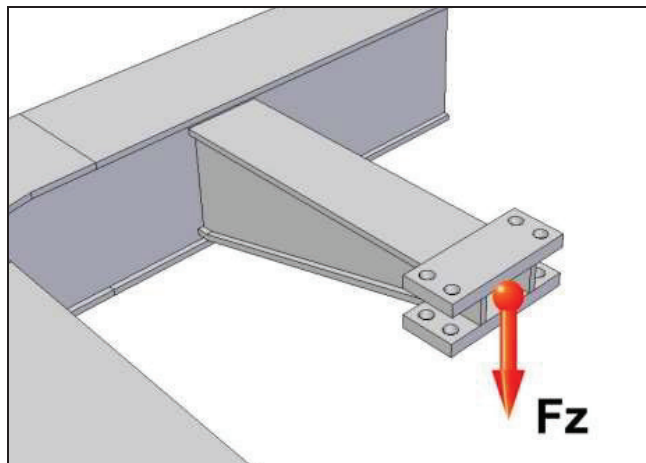
- a) Velikost: Omezením jsou prostorové a silové možnosti dynamické zkušebny. Pro experiment je vhodné použít měřítko 1:1 vzhledem k předloze nebo alespoň měřítko blízké skutečnému rozměru.
- b) Vyrobitelnost a jednoduchost: Jednoduchost výroby je dalším kritériem (snížení časových a finančních požadavků). Z tohoto pohledu je výhodnější zvolit svařovanou konstrukci, která je v porovnání např. s odlitky výhodnější.
- c) Možnosti zatěžování: Výběr konstrukčního uzlu je ovlivněn také požadovaným charakterem zatěžování. Zkušební vzorek musí být zatížitelný vícerozměrným zatížením, které bude svým charakterem obdobné provoznímu zatížení.
- d) Upevnění: Možnost vhodného upevnění do zatěžující sestavy pro snadnou montáž a demontáž.
- e) Kritické místo: Kritické místo by pro účely tohoto výzkumu nemělo být ovlivněno technologickými vrubů např. svarem. S ohledem na geometrii a způsob zatěžování musí být kritické místo pouze jedno.

Při výběru konstrukčního uzlu byly zvažovány následující možnosti:

#### 1) Konzola kotoučové brzdy v podvozku osobního vozu

Konstrukční uzel je ve své podstatě pouze nosník vetknutý do hlavního příčnicku, který na svém volném konci nese brzdovou jednotku kotoučové brzdy (obr. 14). Jde pouze o jednoosé namáhání svislou silou na konci tohoto nosníku.

**Nevhodný konstrukční detail – nevyhoví kritériu „c“ (možnosti zatěžování).**

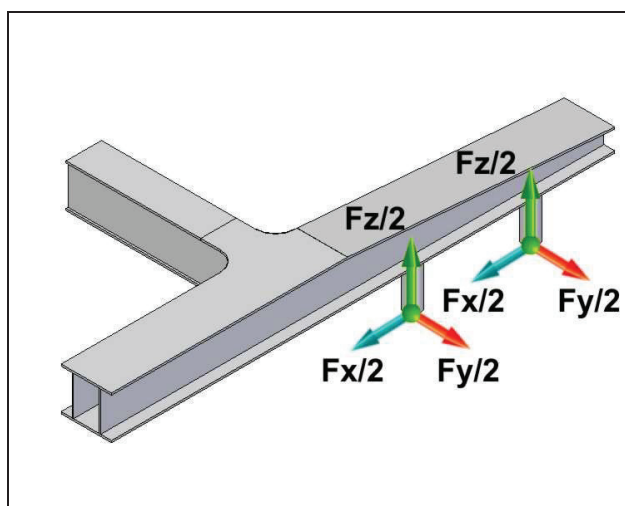


Obr. 14 - Příklad konzoly kotoučové brzdy [20]

## 2) Hlavní podélník podvozku osobního vozu

Hlavní podélník se vyskytuje téměř u všech novodobých podvozků. Bývá řešen jako skříňový nosník obdélníkového průřezu sestavený ze dvou stojin a dvou pásnic. Na tento prvek působí síly v místě primárního vypružení, kde jsou vnášeny síly ve svislém, podélném i příčném směru (obr. 15). Tento konstrukční uzel by byl poměrně komplikovaný jak z pohledu výroby, tak z pohledu vnášení zatěžujících sil.

**Nevhodný konstrukční detail – nevyhoví kritériu „b“ (jednoduchost výroby).**



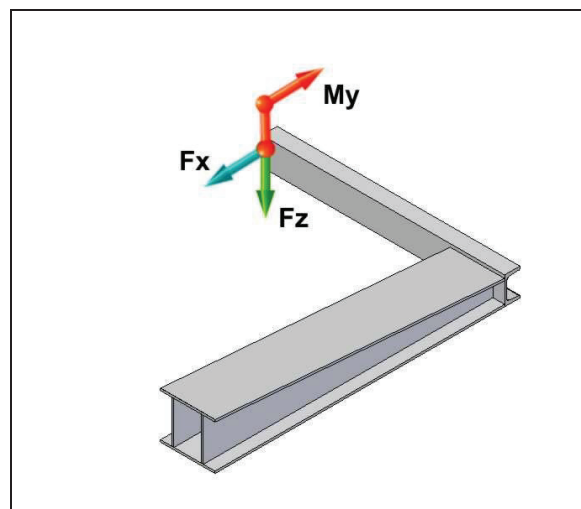
Obr. 15 - Příklad podélníku [20]

## 3) Spojení podélníku s čelníkem

Tento konstrukční uzel se vyskytuje ve dvou variantách. V prvním případě se jedná o čelník rámu podvozku, který nemá příčník (spojení v příčném směru zajišťují právě čelníky). Pak je tento čelník jediným pevným spojením obou podélníků. Ve druhém případě se jedná o podvozky s hlavním příčníkem (nebo se dvěma příčníky),

kde čelník není hlavním nosným prvkem, ale pouze zvyšuje tuhost tohoto rámu (někdy také nese zavěšené komponenty brzd). Napojení čelníku k podélníku vytváří vrub a vznikne zde ono kritické místo (obr. 16). V oblasti kritického místa se však nachází svar – z tohoto důvodu je tento prvek použitelný s obtížemi. Také možnosti zatěžování třemi elektrohydraulickými válci jsou omezené.

**Nevhodný konstrukční detail – nevyhoví kritériu „e“ (kritické místo).**

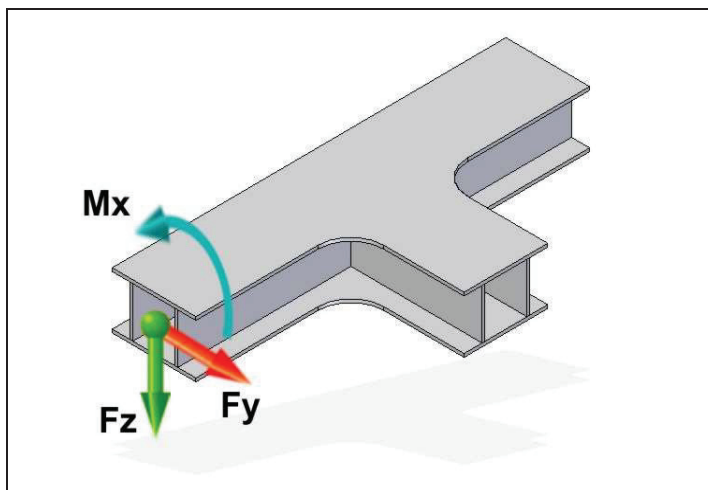


Obr. 16 - Spojení čelníku a podélníku [20]

#### **4) Spojení hlavního příčnicku s podélníkem**

Další variantou je hlavní příčník spojený s podélníkem. Tento konstrukční uzel tedy zabezpečuje tuhé spojení dvou na sebe kolmých nosníků (spojení do tvaru „T“). Právě toto napojení představuje z hlediska únavového poškození kritické místo. Pokud tento konstrukční uzel vyjmemme z rámu podvozku, z jedné části podélníku za spojem se stává volný nosník, na který působí síly od primárního vypružení, resp. od vedení dvojkolí (obr. 17). Ostatní konce lze vetknout k rámu. Výhodou je také souměrnost vzorku, která by mohla za jistých okolností umožnit použití jednoho vzorku pro dva testy. Kritické místo v místě napojení neobsahuje svar.

**Vhodný konstrukční detail – vyhovuje kritériím „a“ až „e“.**

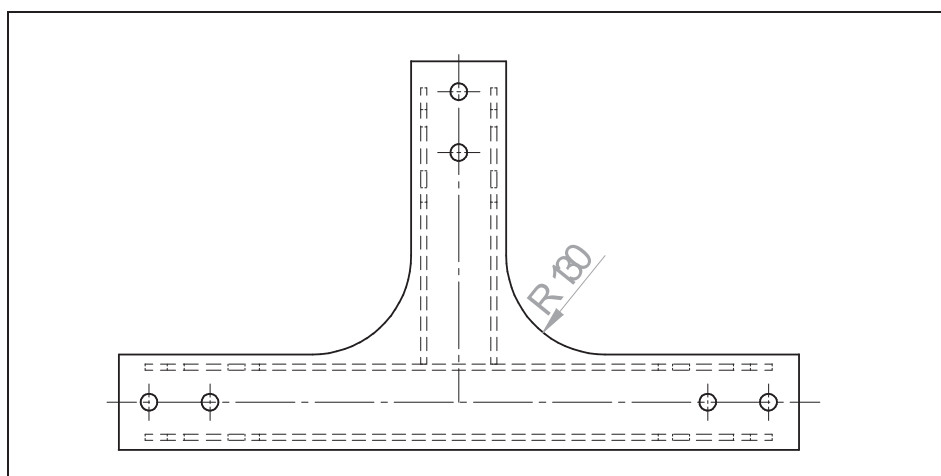


Obr. 17 - Spojení příčnicku a podélníku [20]

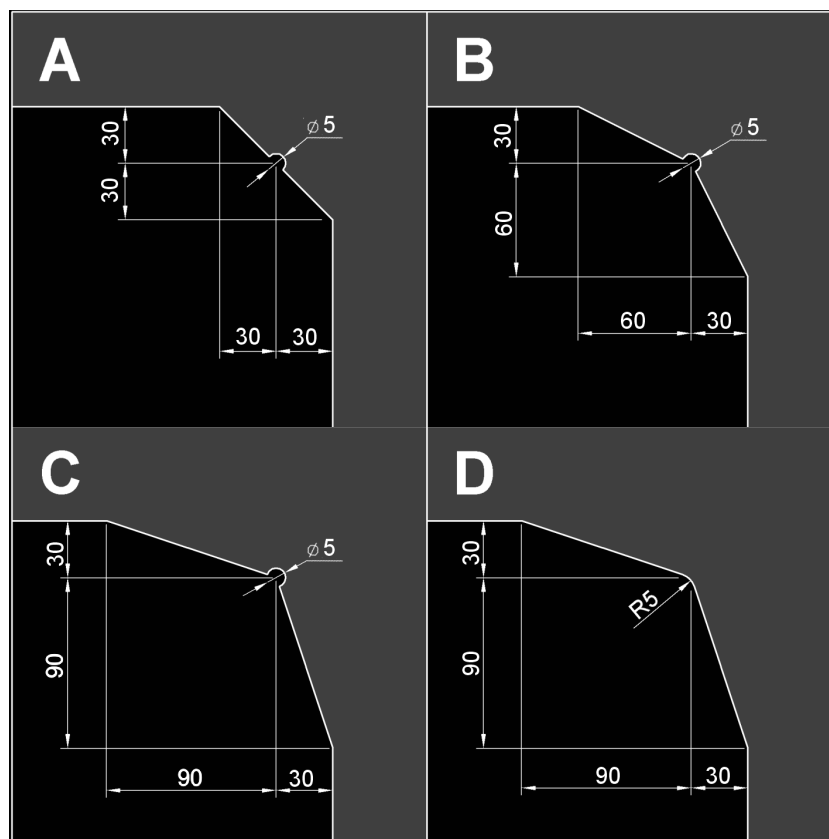
## 8.2. Návrh vzorku – konstrukční řešení

Pro experiment bude použit vybraný konstrukční uzel. Výsledný vzorek (výchozí verze před úpravou) je zobrazen na obr. 18. Podélníky a příčnický jsou tvořeny uzavřenými profily svařenými ze stojin a pásnic. Pásnice mají tloušťku 10 mm a jsou přivařeny ke stojinám o tloušťce 8 mm. V místě napojení podélníků na příčnický je provedeno na pásnici zaoblení.

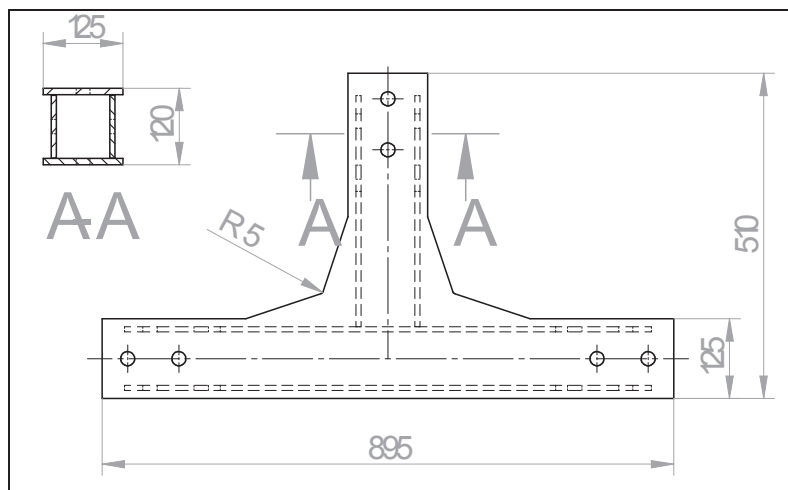
Jelikož se bude jednat o porovnávací zkoušky a zejména pak z důvodu snížení energetické náročnosti testu byl pozměněn tvar přechodu v místě zaoblení pásnic. Ze všech návrhů (obr. 19a) byl vybrán poslední (varianta D) a původní rádius o poloměru 130 mm byl upraven (obr. 19b). V nejkritičtějších místech tak vznikl rádius o poloměru 5 mm. Výkresová dokumentace vzorku je součástí přílohy č. 7.



Obr. 18 - Prvotní návrh vzorku [20]

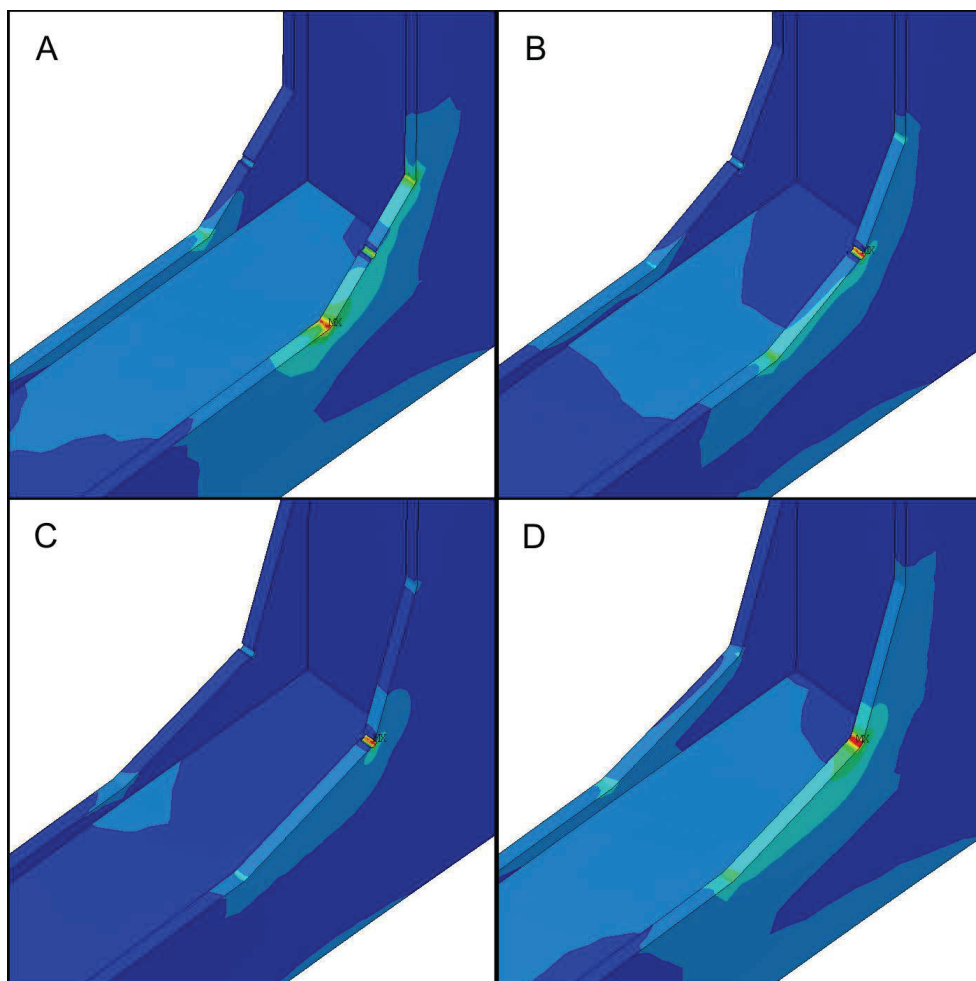


Obr. 19a - Varianty přechodu



Obr. 19b – Výsledná podoba vzorku

Výběr byl proveden na základě MKP analýzy (výběr z výsledků na obr. 20), která ukázala, že varianty s odvrtným otvorem nejsou z hlediska rozložení napětí vhodné, protože se zde napětí koncentruje v jednom místě a nebylo by tak možné nalézt vhodná referenční místa v okolí kritické oblasti. Vytvořený přechod má také další efekt a to ten, že v oblasti kde se pásnice rozšiřuje, by mohlo vzniknout sekundární (méně zatížené) kritické místo. Jeho využití bude popsáno dále.



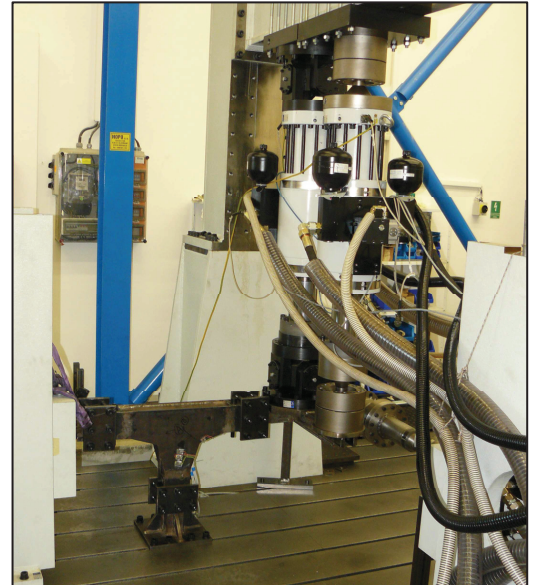
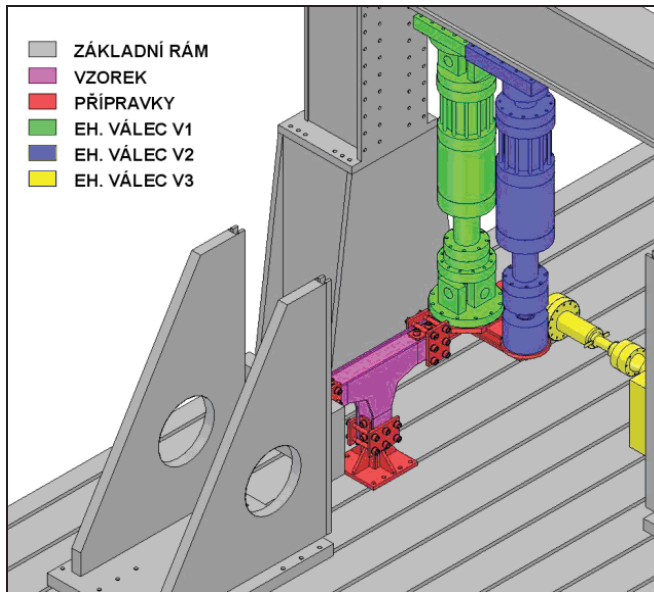
*Obr. 20 – Porovnání výsledků MKP analýzy pro jednotlivé varianty*

### **8.3. Zatěžovací sestava**

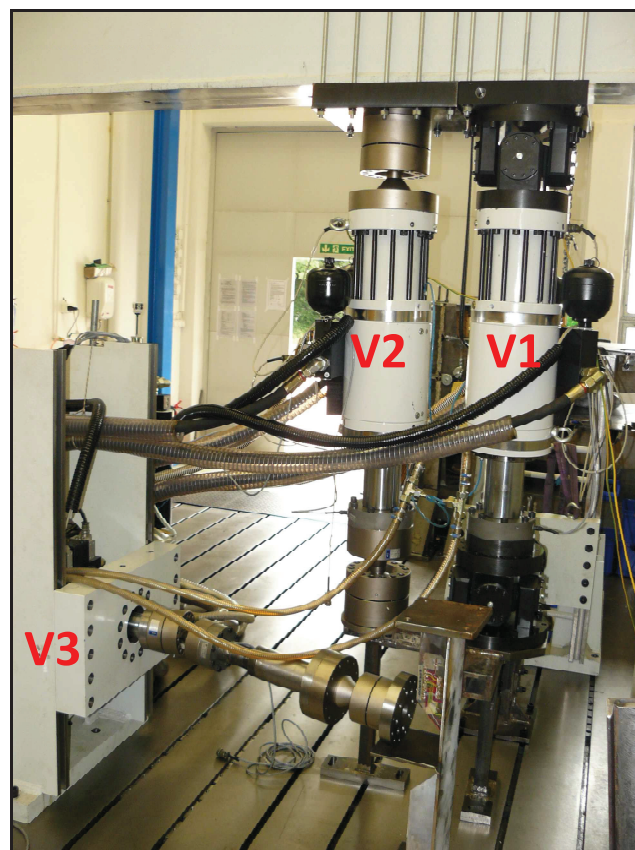
Vzorek navržený v předchozí kapitole (také popsán např. v [20] a [19]) je na dvou koncích vetknutý do základního rámu pomocí přípravků. Třetí konec (konec podélníku) je připojen k přípravku, přes který budou do vzorku vnášeny zatěžovací síly. Přípravky jsou vždy vsunuty do průřezu nosníku a vně sevřeny přes přítlačné desky pomocí šroubů. Na obr. 21 lze vidět celou sestavu zkoušky. Podrobnější informace lze nalézt v příloze č. 4.

Vzorek byl zatěžován víceosým zatížením tvořeným třemi EH válci (V1, V2, V3) dle obr. 22. Dle charakteru vzorku (napojení příčnick podélník) je zřejmé, že svislé zatížení bude do vzorku vnášet válec V3. Příčné zatížení bude vnášet válec V1. EH válec s označením V2 bude vytvářet v součinnosti s válcem V1 krouticí moment. Krouticí moment totiž musí vzniknout působením dvojice sil, což vyžaduje odečíst hodnotu síly válce V2 od hodnoty síly válce V1.

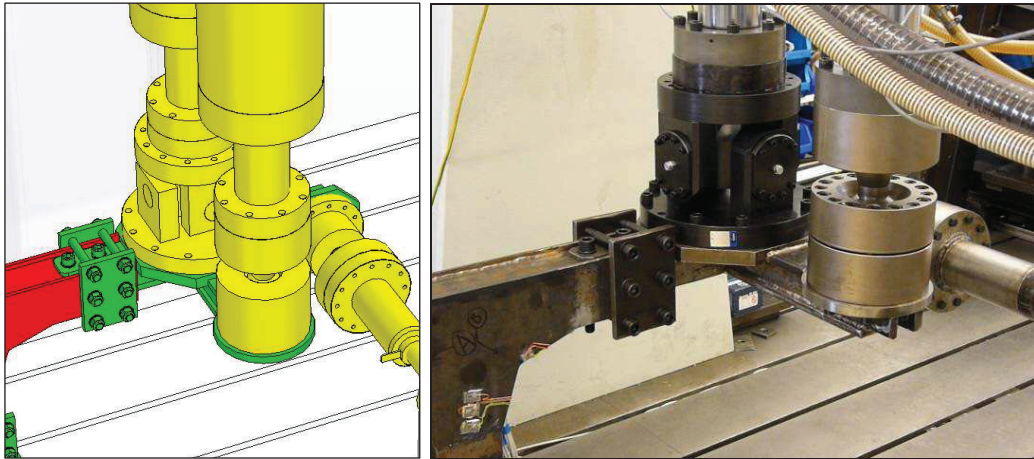




Obr. 21 – Sestava experimentu multiaxiální zkoušky



Obr. 22 – Označení EH válců v sestavě



Obr. 23 – Sestava experimentu – detail spojení vzorku a přípravku

#### 8.4. Návrh zatížení

Vycházel jsem z předpokladu, že charakter zatížení bude rámcově představovat charakter zatížení konstrukce kolejového vozidla. Pro širší ověření metodiky byly použity i jiné (obecnější) průběhy zatížení. Zatížení kolejového vozidla (resp. dopravního prostředku obecně) se skládá z několika složek. Podle směru působení se jedná zejména o složky svislého zatížení, příčného zatížení a podélného zatížení. U svislé složky se předpokládá nenulová střední hodnota (předpětí), které je způsobeno tíhou samotného vozidla. Tato složka je z pohledu průběhu v čase považována za statickou. Na tuto složku se pak superponují složky kvazistatické a dynamické. Kvazistatická složka vzniká zejména při průjezdu obloukem a její polarita je dána směřováním koleje (pravý nebo levý oblouk). Polarita zatížení levé a pravé strany je opačná. Dynamická složka vzniká od svislých nerovností koleje. V případě příčného směru se předpokládá pouze kvazistatická a dynamická složka závislá na směru oblouku a na příčných nerovnostech koleje. V podélném směru působí síly vzniklé zejména tažnou a brzdou silou. Dále nelze opomenout krouticí moment, který může na konstrukci působit např. vlivem zborcené koleje nebo zatěžující silou, která působí na rameni mimo osu konstrukce. Tento charakter zkušebního zatížení se také objevuje ve vyhláškách UIC [3, 4, 5, 8].

Jelikož cílem výzkumu nebylo věrně simulovat provozní zatížení, ale provést porovnávací zkoušky dvou typů zatížení, bylo aplikováno velmi zjednodušené zatížení. Oproti výše popsanému zatížení se skládá pouze ze složek svislých ( $F_z$ ), příčných ( $F_y$ ) a složky způsobující krut ( $F_x$ ). U svislé složky se jedná o statické předpětí a dynamickou složku, u příčného zatížení a krutu se jedná pouze o dynamickou složku. Pro jednoduchost jsou dynamická zatížení vytvořena harmonickou funkcí a ve všech případech se stejnou frekvencí ve stejné fázi.

Všechny průběhy zatížení lze vyjádřit rovnicemi:

$$\begin{aligned} F_Z &= F_{Zdyn} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) + F_{Zst} \\ F_Y &= F_{Ydyn} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \\ F_X &= F_{Xdyn} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \end{aligned} \quad (16, 17, 18)$$

kde  $F_{Zst}$  je statická síla plynoucí od tíhy vozidla,

$F_{Zdyn}$ ,  $F_{Ydyn}$ ,  $F_{Xdyn}$  jsou dynamické složky příslušné síly,

$f$  je frekvence průběhu dynamických složek.

Mezi svislou a příčnou složkou zatížení byl aplikován vztah:

$$F_{Ydyn} = 0,5 \cdot F_{Zst} \quad (19)$$

Dále je možné odhadnout poměr mezi statickou a dynamickou složkou svislého zatížení. Inspirací může být tzv. dynamická přirážka, která se využívá při dimenzování vypružení KV. Obvyklá hodnota může být v rozmezí 10 až 25%. Pro účely experimentu bude použita hodnota 25%. Složka zatížení způsobující krut byla navržena jako:

$$F_{Xdyn} = -0,15 \cdot F_{Zst} \quad (20)$$

U této složky závisí její velikost na geometrii rámu, na jeho tuhosti a na systému vypružení. Tato složka sice z pohledu silového nemusí být dominantní, ale její účinek na konstrukci – napěťová odezva – nemusí být zanedbatelná. Výsledkem výše uvedeného jsou vztahy:

$$\begin{aligned} F_Z &= 0,25 \cdot F_{Zst} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) + F_{Zst} \\ F_Y &= 0,5 \cdot F_{Zst} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \\ F_X &= -0,15 \cdot F_{Zst} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \end{aligned} \quad (21, 22, 23)$$

Touto úpravou jsme dostali vztahy, které jsou (kromě času) pouze funkcí hodnoty  $F_{Zst}$ . Tato hodnota, jak už bylo řečeno, představuje zatížení od tíhy vozidla. Celkovou intenzitu takto navrženého zatížení tak lze „dimenzovat“ volbou jediného parametru:  $F_{Zst}$ . Pro experiment neexistuje vazba na reálné vozidlo, takže je bezpředmětné tuto hodnotu vyčíslovat vzhledem ke konkrétní hmotnosti vozidla. Hodnota tedy byla stanovena s ohledem na navržený počet cyklů potřebných k dosažení hranice životnosti vzorku v oblasti hranice nízkocyklové a vysokocyklové únavy.

Z této definice zatížení lze stanovit minimální a maximální účinek obou zatížení, resp. střední hodnotu a amplitudu. V tomto případě to je:

$$\begin{aligned}
 F_{Z \min} &= 0,75 \cdot F_{Zst} & F_{Zm} &= F_{Zst} \\
 F_{Z \max} &= 1,25 \cdot F_{Zst} & F_{Za} &= 0,25 \cdot F_{Zst} \\
 F_{Y \min} &= -0,5 \cdot F_{Zst} & F_{Ym} &= 0 \\
 F_{Y \max} &= +0,5 \cdot F_{Zst} & F_{Ya} &= 0,5 \cdot F_{Zst} \\
 F_{X \min} &= -0,15 \cdot F_{Zst} & F_{Xm} &= 0 \\
 F_{X \max} &= +0,15 \cdot F_{Zst} & F_{Xa} &= 0,15 \cdot F_{Zst}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Intenzita zatížení (resp. hodnota  $F_{Zst}$ ) byla stanovena dle potřeby konkrétního experimentu.

### 8.5. Umístění referenčních tenzometrů

V kritických místech není možné přímo experimentálně zjišťovat hodnotu mechanického napětí, protože zde nelze použít tenzometry. Na základě MKP analýzy však lze nalézt vztah mezi napětím v kritických místech a vnějším zatížením, které na konstrukci působí. Proto bylo nalezeno místo na konstrukci poblíž (kritického místa), které bude vykazovat dostatečnou korelaci napětí v tomto místě s napětím v kritickém místě.

Pro nalezení vhodného místa pro tenzometry byl vytvořen program, který na základě výsledků MKP analýz mapuje předem stanovené plochy na vzorku a na základě korelační analýzy zobrazí plochy vhodné pro umístění tenzometru. Tento program již byl popsán v kapitole 4.2. Pro výpočet byly zvoleny pouze ty MKP uzly, které se nacházejí v místech, kde lze nalepit tenzometry. Některé uzly proto byly z výpočtu vyloučeny již před zahájením výpočtu.

Je tedy hledáno místo (MKP uzel), které vykazuje dostatečnou korelaci mezi napětím v tomto uzlu a napětím v kritickém místě. Nalezený vztah musí platit bez ohledu na hodnotu zatěžujících sil, resp. musí platit ve všech zatěžovacích kombinacích. Vhodnost uzlu je hodnocena podle koeficientu korelace „ $k$ “:

$$k = \left| \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X S_Y} \right| \tag{25}$$

$$Y = k_a \cdot X + k_b \tag{26}$$

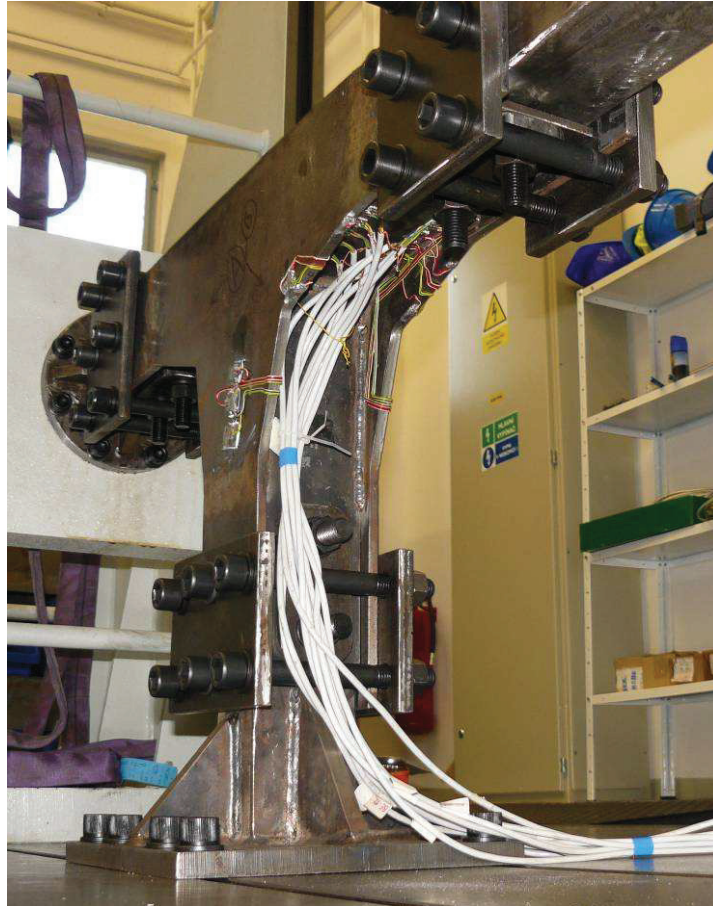
Kde  $X$  je hodnota napětí v hodnoceném uzlu a  $Y$  je hodnota napětí v kritickém místě. To, jak je hodnocený uzel vhodný pro umístění tenzometru, lze stanovit z lineární regresní funkce  $Y = f(X)$ . Pro hodnocení lze použít různé složky napětí. Může se jednat jak o hodnotu hlavního napětí, tak o hodnotu některého z osových napětí, nebo napětí přepočtené do určitého směru. Je nutné si uvědomit, že lze použít pouze složky napětí, pro které platí princip superpozice a jsou lineárně závislé

na vnějším zatížení. Nelze tak např. použít hodnotu napětí dle hypotézy HMM. Pro tuto složku lze nalézt dostatečný koeficient korelace ale výsledek je platný pouze pro zvolené zatížení a nemusí tak platit pro jiné zátěžové stavy.

Vytvořený SW dovede stanovit hodnotu koeficientu korelace pro vybrané body na vzorku a seřadí je podle velikosti. Poté je potřeba z nalezených bodů vybrat body vhodné pro nalepení tenzometru. Jelikož součinitelem korelace se hodnotí pouze jedna veličina, lze provést korelační výpočet vícekrát pro více veličin, zvolit pouze takový bod, který dosahuje dostatečné hodnoty korelace u všech složek. Lze tak hodnotit např. splnění podmínky velikosti i směru hlavního napětí. Dále lze vybírat tenzometry podle citlivosti odezvy. Zároveň s korelačním koeficientem jsou vypočteny také konstanty  $k_a$  a  $k_b$  v rovnici (26), která popisuje závislost mezi korelovanými veličinami. Rovnice však platí jen v případě, že koeficient korelace je roven jedné. V opačném případě se jedná jen o odhad zjištěný lineární regresi. Každopádně pro dobře korelující body pak koeficient  $k_a$  ukazuje vzájemnou citlivost korelovaných uzlů.

Výsledky výpočtu korelace jsou uvedeny v příloze 6.

Pro experiment byly použity tenzometry typu 1-LY11-3/120 (4 ks / vzorek) od firmy HBM a to s velikostí mřížky 3 mm. V případě tenzometrických růžic se jednalo o typ 1-RY11-3/120 (2 ks / vzorek) [39]. Přesné rozmístění je uvedeno v příloze č. 4. Náhled na vzorek opatřený tenzometry lze vidět na obr. 24, podrobněji pak v příloze č. 4. Tenzometry i tenzometrické růžice jsou zapojeny do polovičního Wheatstonova můstku, vždy s jedním aktivním a jedním kompenzačním tenzometrem. Je tedy uplatněna kompenzace změny teploty. Tenzometrické můstky s tenzometry řady LY jsou napájeny napětím 2,5 V a tenzometrické můstky tenzometrických růžic řady RY jsou napájeny napětím 1,0 V. Při měření byla aplikována nepřímá kalibrace pomocí zadání lineární charakteristiky do měřicího SW. Výpočet je popsán v příloze č. 4.



*Obr. 24 – Pohled na vzorek s tenzometry*

### **8.6. Měrná napěťová odezva - MKP analýza**

MKP výpočet byl proveden pro tři případy. Ve všech případech působila síla vždy pouze od jednoho válce a to vždy silou 1 kN. Při tomto zatížení pak lze jednoduše stanovit poměrnou odezvu jako  $\sigma / F$  [kN/MPa] pro jednotlivé válce. Zatížení tedy bylo provedeno dle tab. 2.

*Tab. 2 - Silové zatížení při MKP výpočtu*

Výpočet \ Síla	F1 (V1)	F2 (V2)	F3 (V3)
	MKP 0_0_1	0 kN	0 kN
MKP 0_1_0	-1 kN	1 kN	0 kN
MKP 1_0_0	1 kN	0 kN	0 kN

**Tab. 3 - Hodnoty souřadnic uzlů tenzometrů pro nezatížený stav**

Tenzometr	Node	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	L <sub>0</sub> [mm]
T3	8017	40.629	78.000	115.000	3.0000202
	8019	43.434	79.064	115.000	
T4	7181	40.629	78.000	5.000	3.0000202
	7180	43.434	79.064	5.000	
T5	8014	122.100	108.900	115.000	3.0032815
	8015	119.290	107.840	115.000	
T6	7178	119.290	107.840	5.000	3.0032815
	7177	122.100	108.900	5.000	
R1A	6389	39.189	87.619	120.000	0.7993904
	6388	39.918	87.291	120.000	
R1B	6234	37.896	87.658	120.000	0.7997456
	6235	37.148	87.375	120.000	
R1C	6385	38.838	88.545	120.000	0.8003024
	6384	39.166	89.275	120.000	
R2A	5689	39.166	89.275	0.000	0.8003024
	5845	38.838	88.545	0.000	
R2B	5846	37.896	87.658	0.000	0.7997456
	5687	37.148	87.375	0.000	
R2C	5694	39.189	87.619	0.000	0.7993904
	5695	39.918	87.291	0.000	

**Hodnoty vypočtené pomocí MKP analýzy pro jednotlivé zátěžové stavy jsou uvedeny v příloze č. 2.**

## 9. Experimentální ověření měrné napět'ové odezvy

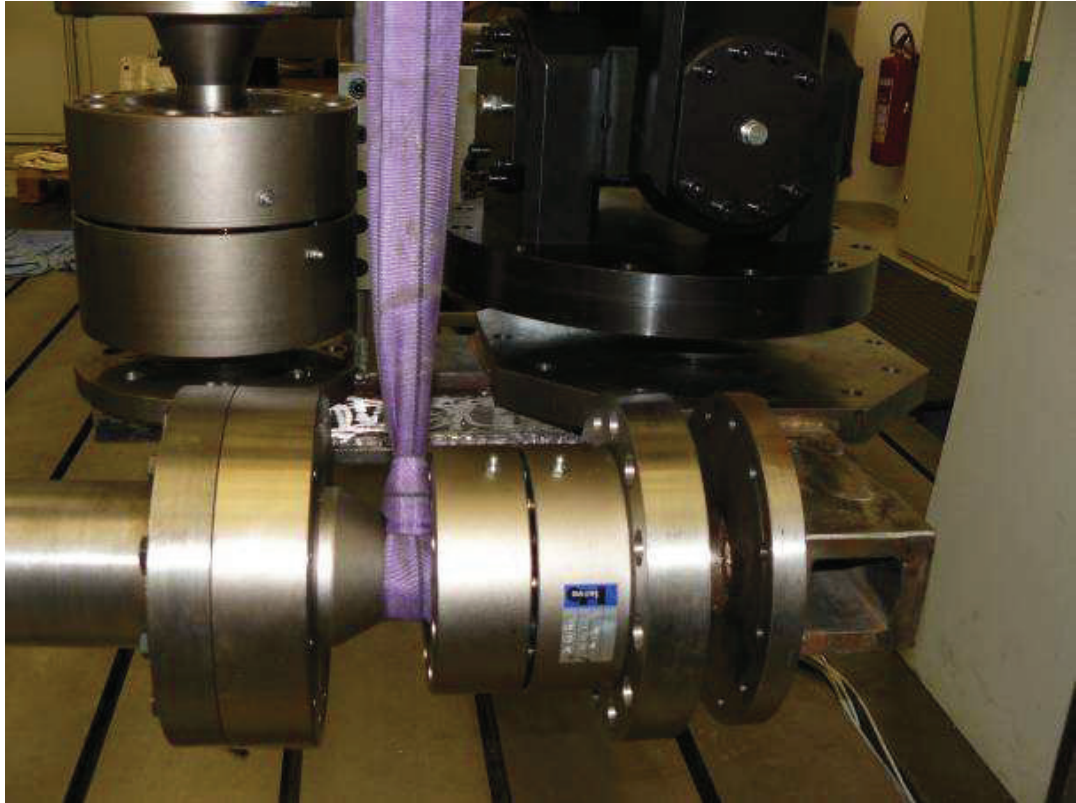
### 9.1. Realizace experimentů

Na vzorku byly nalepeny referenční tenzometry. Měření bylo provedeno pomocí měřicí ústředny HBM DMCplus. Deset kanálů bylo využito pro tenzometrické měření, tři kanály byly použity pro měření průběhů zatěžujících sil (příloha č. 4). Zde bylo potřeba technicky vyřešit propojení měřicí ústředny a měřicí elektroniky zatěžovacího stroje. Při režimu dynamického zatěžování jsou řídicí signály (žádané hodnoty) generovány pomocí A/D karty ADAS16 v řídicím PC. Tato karta zároveň umožňuje měřit hodnoty signálů síly a polohy, které jsou upraveny na jmenovitý rozsah +/-10 V. Právě v tomto místě byly vyvedeny signály, které lze přímo měřit pomocí zesilovačů použité měřicí ústředny. Tímto způsobem je zaručena synchronizace mezi měřením sil a tenzometrickým měřením napětí. [42, 43]

Při měření byly dodrženy následující zásady:

- Hodnota napětí na tenzometrech je kompenzována hodnotou „TARE“ v měřicím zesilovači na nulovou hodnotu ve stavu, kdy není vzorek namontován do sestavy.
- Hodnota napětí na tenzometrech je kompenzována hodnotou „ZERO“ v měřicím zesilovači na nulovou hodnotu ve stavu, kdy je vzorek namontován do sestavy, a válce jsou řízené silou na hodnotu nulové síly. V tomto případě je kompenzace hodnotou „TARE“ také aktivní.
- Nulování pomocí měřicího software nebylo aplikováno (bylo v programu zablokováno). Na počátku každého měření tedy nebyly hodnoty tenzometrů nulové. To umožní posoudit, zda nebyla konstrukce nějakým způsobem zatížena již před začátkem zatěžování. Zároveň lze z počátečních hodnot usoudit, zda nebyla konstrukce při předcházejícím testování přetížena (vznik plastických deformací). Pokud by bylo potřeba při vyhodnocení, aby byly hodnoty tenzometrů na počátku měření nulové, pak lze toto nulování provést až následně transformací naměřených dat.
- I při manipulaci s EH válci bylo zapnuto měření napětí a sil pomocí měřicí ústředny. Zejména pak při optimalizaci PID regulace, kdy mohlo dojít k rezonanci řízené veličiny (síly), je vhodné měření provést vyšší vzorkovací frekvencí. Lze tak dohledat případné nechtěné statické resp. dynamické přetížení vzorku.
- Před začátkem experimentálního měření bylo vždy provedeno „zahřívací“ cca 30 minutové měření. To zabezpečilo vyloučení vlivu ohřívání přístrojů a kabelů.





**Obr. 25** – Sestava s odpojenými klouby od přípravku

Před vykonáním všech experimentů bylo nutné provést následující kroky:

- Před montáží vzorku do sestavy provést tenzometrické měření, aby bylo možné stanovit výchozí hodnoty napětí na tenzometrech, které byly považovány za nulové. Tenzometrické můstky proto byly vyváženy hodnotou „tare“ přímo v nastavení měřicího zesilovače příslušného kanálu.
- Před mechanickým spojením silových řetězců jednotlivých EH válců (obr. 25) provést „nulování“ síly měřené siloměrem příslušného válce. Z pohledu měřicího řetězce bylo toto provedeno přímo v měřicím zesilovači příslušného siloměru, to znamená, že hodnoty síly naměřené měřicí ústřednou byly již po této korekci.
- Při montáži vzorku bylo kontinuálně měřeno napětí na tenzometrech, aby bylo možné stanovit velikost napětí, které je vnášeno samotným upevněním vzorku do sestavy.
- Po upevnění vzorku byly EH válce řízené v režimu řízení silou a síly byly nastaveny na nulovou hodnotu. V tomto stavu by měly být hodnoty napětí na tenzometrech teoreticky nulové. Nulové hodnoty však nelze nikdy dosáhnout. V tomto stavu byly můstky vyváženy hodnotou „zero“.
- Bylo provedeno několik statických zatížení pro ověření funkce upevnění vzorku a přípravku.

## 9.2. Experimentální stanovení měrné napěťové odezvy

Měrná napěťová odezva byla experimentálně ověřena dvěma způsoby: staticky a dynamicky. V obou případech byl použit měřící řetězec dle přílohy č. 4. Z pohledu řízení experimentu byla řízenou veličinou vždy síla příslušného válce. Tyto síly a také hodnoty napětí na tenzometrech byly měřeny vzorkovací frekvencí 150 Hz.

Jak již bylo řečeno v popisu navržené metodiky – měrnou napěťovou odezvu lze získat postupným zatěžováním konstrukce vždy jedním z válců. Napětí naměřené na tenzometrech se pak pomocí velikosti působící síly od válce přepočte na měrnou napěťovou odezvu (jednotka [MPa/kN]). Přitom hodnota sil musí být dostatečná s ohledem na nepřesnost jejího stanovení a s ohledem na nepřesnost měření tenzometry.

### 9.2.1. Statické zatížení

Statické zatížení bylo provedeno v režimu manuální manipulace s válci postupným nastavováním hodnot sil od příslušných válců. Zatížení bylo provedeno dle následujících tabulek (tab. 4, tab. 5, tab. 6).

**Tab. 4 – Statické zatížení od síly F1.**

<b>F1</b>	<b>Čas záznamu od</b>	<b>Čas záznamu do</b>
0 kN	00:14:00	00:15:00
1 kN	00:15:15	00:16:15
2 kN	00:16:30	00:17:30
5 kN	00:17:45	00:18:45
10 kN	00:19:10	00:20:10
0 kN	00:20:50	00:21:50
-1 kN	00:22:05	00:23:05
-2 kN	00:23:30	00:24:30
0 kN	00:26:20	00:27:20

**Tab. 5 – Statické zatížení od síly F2.**

<b>F2</b>	<b>Čas záznamu od</b>	<b>Čas záznamu do</b>
0 kN	00:38:20	00:39:20
1 kN	00:39:45	00:40:45
2 kN	00:41:05	00:42:05
5 kN	00:42:30	00:43:30
0 kN	00:44:05	00:45:05
-1 kN	00:45:25	00:46:25
-2 kN	00:46:50	00:47:50
-5 kN	00:48:15	00:49:15
0 kN	00:49:55	00:50:55

**Tab. 6 – Statické zatížení od síly F3.**

<b>F3</b>	<b>Čas záznamu od</b>	<b>Čas záznamu do</b>
0 kN	01:11:05	01:12:05
1 kN	01:12:20	01:13:20
2 kN	01:13:35	01:14:35
5 kN	01:15:00	01:16:00
0 kN	01:16:45	01:17:45
-1 kN	01:18:00	01:19:00
-2 kN	01:19:30	01:20:30
-5 kN	01:21:00	01:22:00
0 kN	01:22:50	01:23:50

V každém kroku zatížení bylo vždy ponecháno časové rozmezí k ustálení hodnoty síly (ustálení regulace EH válců), tak aby bylo možné získat přibližně 30 s dlouhý záznam pro vyhodnocení. To bylo provedeno tak, že jako hodnota síly pro výpočet měrné napěťové odezvy byla použita střední hodnota naměřené síly v tomto časovém úseku. Výsledné hodnoty pak byly zakresleny do  $F - \sigma$  grafu. Předpoklad byl, že napěťová odezva bude lineární, a proto byla pomocí principů lineární regrese ze získaných hodnot vypočtena regresní přímka. Její směrnice (koeficient  $k$ ) pak přímo udává hodnotu měrné napěťové odezvy v jednotkách [MPa/kN]. Výsledné grafy jsou uvedeny v příloze č. 1.

### 9.2.2. Dynamické zatížení

Měrná napěťová odezva byla stanovena také na základě odezvy od dynamického zatížení harmonickým signálem. Jednalo se vždy o minutové bloky signálu o frekvenci 0,5 Hz a příslušné amplitudě. Přehled bloků je v tab. 7.

**Tab. 7 – Přehled dynamických zatěžovacích bloků.**

<b>F1</b> [kN]	<b>F2</b> [kN]	<b>F3</b> [kN]	<b>f</b> [Hz]	<b>Délka záznamu</b> mm:ss
+/- 1	0	0	0,5 Hz	01:00
+/- 2	0	0	0,5 Hz	01:00
+/- 3	0	0	0,5 Hz	01:00
+/- 5	0	0	0,5 Hz	01:00
+/- 10	0	0	0,5 Hz	01:00
+/- 15	0	0	0,5 Hz	01:00
+/- 20	0	0	0,5 Hz	01:00
0	0	+/- 1	0,5 Hz	01:00
0	0	+/- 5	0,5 Hz	01:00
0	0	+/- 10	0,5 Hz	02:00
+/- 2	-/+ 2	0	0,5 Hz	02:00
+/- 5	-/+ 5	0	0,5 Hz	02:00
+/- 7	-/+ 7	0	0,5 Hz	02:00

Výsledná měrná napěťová odezva je uvedena v příloze č. 3. Z grafů je patrné, že každá ze sil vyvolá na referenčních tenzometrech jinou odezvu. Ze sklonu přímky lze lehce hodnotit, zda je odezva kladná nebo záporná. Z grafů lze také usuzovat, jak výrazně se ovlivňují jednotlivé složky zatížení, protože to je dáno sklonem zjištěné přímky (v případě linearizace charakteristiky). U síly  $F2$  lze pozorovat určitou hysterezi v odezvě, kterou způsobují pasivní odpory v kulovém kloubu nebo nesoufázovost s ostatními silami. Vlivy kulového kloubu bohužel nelze odstranit. Lze ho minimalizovat dostatečným mazáním kloubu a přesným nastavením sevření kulových ploch. Malou hysterezi lze ignorovat, protože je odstraněna lineární regresí. Při testech byla vždy kontrolována a korigována soufázovost všech sil. Vždy však nebylo možné dosáhnout přesné fáze, protože fázový posun zadávaný do řídicího SW lze zadat pouze s přesností na jeden úhlový stupeň.

### 9.2.3. Porovnání výsledků měrné napěťové odezvy

Takto získané hodnoty, a to jak z MKP výpočtů, tak z experimentu, mohou posloužit k odhadům napětí ve vzorku (v případě experimentu pouze v místech tenzometrů) při kombinovaném namáhání od více zatěžujících sil. V tomto případě

poslouží jako podklad pro verifikaci výsledků MKP výpočtů. Výsledné porovnání je uvedeno v následujících tabulkách (tab. 8, 9, 10).

Kromě některých případů (vyznačeno v tabulkách červeně) se odchylka pohybovala v rozmezí od -4% do 4%. Značné odchylky se vyskytují zejména u válců V2 a V3, a to u tenzometrů, které vykazovaly nízkou hodnotu odezvy. Zde je nutné si uvědomit, že pokud má tenzometr malou hodnotu odezvy, pak i napětí změřené při experimentu bylo malé hodnoty, takže nejistota měření byla poměrně velká. Např. tenzometr *R2B* vykazuje velkou nepřesnost u válce V2, ale u ostatních válců vykazuje dobrou shodu. Jelikož má ale u válce V2 nejnižší hodnotu odezvy, pak pro hodnocení zatížení od tohoto válce nikdy použit nebude.

**Tab. 8 - Zatížení od V1**

Tenz.	MKP	Exp. stat.	Exp. dyn.
	[MPa/kN]	[MPa/kN]	[MPa/kN]
<b>T3</b>	4.97 0%	5.07 2%	5.32 7%
<b>T4</b>	4.97 0%	4.97 0%	5.84 17%
<b>T5</b>	4.85 0%	--- ---	4.85 0%
<b>T6</b>	4.85 0%	--- ---	4.58 -6%
<b>R1A</b>	1.23 0%	1.26 3%	--- ---
<b>R1B</b>	4.44 0%	4.57 3%	4.84 9%
<b>R1C</b>	2.16 0%	2.21 2%	--- ---
<b>R2A</b>	2.16 0%	2.15 0%	2.25 4%
<b>R2B</b>	4.44 0%	4.50 1%	4.53 2%
<b>R2C</b>	1.24 0%	1.25 1%	1.31 5%

**Tab. 9 - Zatížení od V2**

Tenz.	MKP	Exp. stat.	Exp. dyn.
	[MPa/kN]	[MPa/kN]	[MPa/kN]
T3	8.17 0%	8.07 -1%	3.28 -60%
T4	1.73 0%	1.55 -11%	-3.94 -328%
T5	5.51 0%	--- ---	-1.61 -129%
T6	4.20 0%	--- ---	1.30 -69%
R1A	0.88 0%	0.88 -1%	--- ---
R1B	7.99 0%	8.24 3%	-4.05 -151%
R1C	5.41 0%	5.63 4%	--- ---
R2A	-1.08 0%	-1.50 39%	4.00 -469%
R2B	0.88 0%	0.53 -40%	3.97 353%
R2C	1.59 0%	1.64 3%	-0.56 -135%

**Tab. 10 - Zatížení od V3**

Tenz.	MKP	Exp. stat.	Exp. dyn.
	[MPa/kN]	[MPa/kN]	[MPa/kN]
T3	-4.40 0%	-4.27 -3%	-4.11 -7%
T4	4.37 0%	4.22 -4%	5.72 31%
T5	-5.99 0%	--- ---	-5.54 -7%
T6	6.02 0%	--- ---	6.60 10%
R1A	-2.35 0%	-2.39 2%	--- ---
R1B	-4.34 0%	-4.22 -3%	-4.12 -5%
R1C	-0.75 0%	-0.53 -29%	--- ---
R2A	0.75 0%	0.57 -25%	0.92 23%
R2B	4.35 0%	4.28 -2%	4.95 14%
R2C	2.33 0%	2.41 3%	2.63 13%

## 10. Jednparametrické zjednodušení

Pro demonstraci navržené metodiky bylo použito jednparametrické zjednodušení (dále také dvouparametrické). Bude tedy hodnocena pouze jedna složka napětí a to napětí v kritickém místě ve směru pásnice. Podle přílohy 6 je vidět, že toto místo koreluje s hlavním napětím tenzometrické růžice (korelace Node[2763] primární kritické místo CP1 a Node[16764] – tenzometrická růžice R2). Na základě toho lze odhadovat napětí v kritickém místě. Pro demonstraci byly použity tři druhy zatížení označené jako: VZ2-1-000, VZ2-1-001 a VZ2-1-002 (přílohy 8, 9 a 10). K těmto byla navržena zatížení zjednodušená s označením: VZ2-1-010, VZ2-1-011 a VZ2-1-012 (přílohy 11, 12 a 13). U každého zatížení byla použita intenzita vždy 50%, 100% a 150%. V každé příloze jsou zobrazeny průběhy sil a napěťové odezvy. Předmětem zjednodušení je síla V2. Postup byl ve všech případech stejný:

- Byla vynechána nedominantní složka zatížení (síla F2).
- Pomocí výpočtu napětí v kritickém místě z měrné napěťové odezvy lze odhadovat napětí v kritickém místě na základě zadaných sil.
- Ostatní složky (F1 a F3) byly nastaveny tak, aby v primárním kritickém místě bylo dosaženo požadovaného napětí a zároveň v sekundárním kritickém místě bylo napětí výrazně nižší.

Výpočet napjatosti v kritickém místě podle měrné napěťové odezvy byl proveden podle následujících vztahů:

$$\sigma_{CP1} = 10,746 \cdot F_1 + 10,145 \cdot F_2 + 7,564 \cdot F_3 \quad (27a)$$

$$\sigma_{CP2} = 10,746 \cdot F_1 + 10,145 \cdot F_2 - 7,500 \cdot F_3 \quad (27b)$$

Výsledné hodnoty napětí jsou z pohledu únavy materiálu hodnoceny podle jedné únavové S-N křivky, proto pokud dojde ke shodě této jedné hodnocené složky napětí, pak je (dle zvoleného způsobu hodnocení!) zaručena stejná únavová pevnost v hodnoceném místě.

## 10.1. Zatížení VZ2-1-000 a VZ2-1-010

Toto zatížení vychází ze zatížení, které bylo navrženo v kapitole 8.4 a mělo by tak zjednodušenou formou charakterizovat zatížení KV. Dominantní složkou je síla F3 (představující svislé zatížení). V následujících tabulkách je uvedeno původní zatížení VZ2-1-000 a zjednodušené zatížení VZ2-1-010.

**Tab. 11 – Hodnoty zatěžujících sil.**

Intenzita	10.0 kN	( 100% )	Intenzita	10.0 kN	( 100% )
VZ2-1-000	stř.h.	ampl.	VZ2-1-010	stř.h.	ampl.
Svislá	1	0.25	Svislá	0.5	0.58
Příčná	0	0.5	Příčná	0	0.65
Krut	0	-0.15	Krut	0	0
F3	10.00 kN	2.50 kN	F3	5.00 kN	5.80 kN
F2	0.00 kN	-1.50 kN	F2	0.00 kN	0.00 kN
F1	0.00 kN	6.50 kN	F1	0.00 kN	6.50 kN

Pro dosažení požadovaných hodnot sil a jejich správné fáze však musely být nastaveny do řídicího SW dynamického standu následující hodnoty:

**Tab. 12 – Požadované hodnoty pro řídicí SW**

VZ2-1-000	stř.h.	ampl.	fáze	VZ2-1-010	stř.h.	ampl.	fáze
F3	10.00 kN	4.13 kN	20°	F3	4.70 kN	6.35 kN	15°
F2	0.00 kN	-2.48 kN	-6°	F2	0.00 kN	0.00 kN	0°
F1	0.00 kN	10.13 kN	0°	F1	0.00 kN	6.70 kN	0°

Předpokládaná napěťová odezva v obou kritických místech vypočtena na základě měrné napěťové odezvy získané z MKP výpočtů byla následující:

**Tab. 13 – Předpokládaná napěťová odezva (hodnoty v MPa).**

VZ2-1-000	CP1	CP2	VZ2-1-010	CP1	CP2
$\sigma_x$	83.3	-18.4	$\sigma_x$	83.2	-17.4
$\sigma_y$	71.0	-1.4	$\sigma_y$	73.4	-2.6
$\sigma_z$	1.0	-0.3	$\sigma_z$	0.9	-0.3
$\tau_{xy}$	72.8	-6.1	$\tau_{xy}$	73.9	-6.7
$\tau_{xz}$	4.3	2.9	$\tau_{xz}$	3.5	2.2
$\tau_{yz}$	3.5	1.9	$\tau_{yz}$	2.7	1.5
$\sigma_1$	150.2	0.5	$\sigma_1$	152.4	0.0
$\sigma_2$	4.1	-20.4	$\sigma_2$	4.2	-20.0

Experimentálně zjištěné napětí resp. napětí vypočtené z experimentálně zjištěných sil pomocí měrné napěťové odezvy:

**Tab. 14 – Experimentálně zjištěná napěťová odezva (hodnoty v MPa).**

VZ2-1-000	CP1	CP2	VZ2-1-010	CP1	CP2
$\sigma$	156	-31	$\sigma$	158	-5



## 10.2. Zatížení VZ2-1-001 a VZ2-1-011

Toto zatížení nemá žádný vztah k provoznímu zatížení, je to pouze obecné zatížení, kde je poměr intenzity složek F1 a F3 roven jedné. Zatížení od síly F2 zůstává stejné jako v předchozím zatížení. V následujících tabulkách je uvedeno původní zatížení VZ2-1-001 a zjednodušené zatížení VZ2-1-011.

**Tab. 15 – Hodnoty zatěžujících sil.**

Intenzita	10.0 kN	( 100% )	Intenzita	10.0 kN	( 100% )
VZ2-1-001	stř.h.	ampl.	VZ2-1-011	stř.h.	ampl.
Svislá	0	0.5	Svislá	0	0.34
Příčná	0	0.5	Příčná	0	0.64
Krut	0	-0.15	Krut	0	0
F3	0.00 kN	5.00 kN	F3	0.00 kN	3.40 kN
F2	0.00 kN	-1.50 kN	F2	0.00 kN	0.00 kN
F1	0.00 kN	6.50 kN	F1	0.00 kN	6.40 kN

Pro dosažení požadovaných hodnot sil a jejich správné fáze však musely být nastaveny do řídicího SW dynamického standu následující hodnoty:

**Tab. 16 – Požadované hodnoty pro řídicí SW**

VZ2-1-001	stř.h.	ampl.	fáze	VZ2-1-011	stř.h.	ampl.	fáze
F3	0.00 kN	5.55 kN	16°	F3	4.70 kN	6.35 kN	15°
F2	0.00 kN	-1.70 kN	1°	F2	0.00 kN	0.00 kN	0°
F1	0.00 kN	6.70 kN	0°	F1	0.00 kN	6.70 kN	0°

Předpokládaná napěťová odezva v obou kritických místech vypočtena na základě měrné napěťové odezvy získané z MKP výpočtů byla následující:

**Tab. 17 – Předpokládaná napěťová odezva (hodnoty v MPa).**

VZ2-1-001	CP1	CP2	VZ2-1-011	CP1	CP2
$\sigma_x$	50.6	26.8	$\sigma_x$	50.4	26.5
$\sigma_y$	44.9	15.3	$\sigma_y$	47.1	13.6
$\sigma_z$	0.5	0.0	$\sigma_z$	0.5	0.0
$\tau_{xy}$	45.1	20.0	$\tau_{xy}$	46.0	18.6
$\tau_{xz}$	2.1	1.7	$\tau_{xz}$	1.4	1.0
$\tau_{yz}$	1.6	1.1	$\tau_{yz}$	0.8	0.7
$\sigma_1$	92.9	41.9	$\sigma_1$	94.8	39.7
$\sigma_2$	2.6	0.2	$\sigma_2$	2.7	0.4

Experimentálně zjištěné napětí resp. napětí vypočtené z experimentálně zjištěných sil pomocí měrné napěťové odezvy:

**Tab. 18 – Experimentálně zjištěná napěťová odezva (hodnoty v MPa).**

VZ2-1-001	CP1	CP2	VZ2-1-011	CP1	CP2
$\sigma$	103	19	$\sigma$	100	51

### 10.3. Zatížení VZ2-1-002 a VZ2-1-012

Toto zatížení opět nemá žádný vztah k provoznímu zatížení, je to pouze obecné zatížení, kde je poměr intenzity složek F1 a F3 roven jedné. Zatížení od síly F2 je opačné polarity oproti předchozímu zatížení. V následujících tabulkách je uvedeno původní zatížení VZ2-1-002 a zjednodušené zatížení VZ2-1-012.

**Tab. 19 – Hodnoty zatěžujících sil.**

Intenzita	10.0 kN	( 100% )	Intenzita	10.0 kN	( 100% )
<b>VZ2-1-002</b>	stř.h.	ampl.	<b>VZ2-1-012</b>	stř.h.	ampl.
Svislá	0	0.5	Svislá	0	0.66
Příčná	0	0.5	Příčná	0	0.36
Krut	0	0.15	Krut	0	0
F3	0.00 kN	5.00 kN	F3	0.00 kN	6.60 kN
F2	0.00 kN	1.50 kN	F2	0.00 kN	0.00 kN
F1	0.00 kN	3.50 kN	F1	0.00 kN	3.60 kN

Pro dosažení požadovaných hodnot sil a jejich správné fáze však musely být nastaveny do řídicího SW dynamického standu následující hodnoty:

**Tab. 20 – Požadované hodnoty pro řídicí SW**

<b>VZ2-1-002</b>	stř.h.	ampl.	fáze	<b>VZ2-1-012</b>	stř.h.	ampl.	fáze
F3	-0.45 kN	5.55 kN	11°	F3	-0.70 kN	7.30 kN	15°
F2	-0.38 kN	1.65 kN	13°	F2	0.00 kN	0.00 kN	0°
F1	-0.38 kN	3.70 kN	0°	F1	-0.37 kN	3.77 kN	0°

Předpokládaná napěťová odezva v obou kritických místech vypočtena na základě měrné napěťové odezvy získané z MKP výpočtů byla následující:

**Tab. 21 – Předpokládaná napěťová odezva (hodnoty v MPa).**

<b>VZ2-1-002</b>	CP1	CP2	<b>VZ2-1-012</b>	CP1	CP2
$\sigma_x$	48.6	-13.7	$\sigma_x$	48.8	-13.4
$\sigma_y$	45.0	-4.5	$\sigma_y$	42.8	-2.8
$\sigma_z$	0.5	-0.2	$\sigma_z$	0.6	-0.2
$\tau_{xy}$	44.2	-7.3	$\tau_{xy}$	43.2	-5.9
$\tau_{xz}$	1.4	0.7	$\tau_{xz}$	2.1	1.3
$\tau_{yz}$	0.9	0.4	$\tau_{yz}$	1.7	0.9
$\sigma_1$	91.0	-0.5	$\sigma_1$	89.1	-0.2
$\sigma_2$	2.6	-17.7	$\sigma_2$	2.5	-16.0

Experimentálně zjištěné napětí resp. napětí vypočtené z experimentálně zjištěných sil pomocí měrné napěťové odezvy:

**Tab. 22 – Experimentálně zjištěná napěťová odezva (hodnoty v MPa).**

<b>VZ2-1-002</b>	CP1	CP2	<b>VZ2-1-012</b>	CP1	CP2
$\sigma$	91	14	$\sigma$	94	19

## 11. Dvouparametrické zjednodušení

Pro demonstraci použitelnosti metodiky je naznačen postup dvouparametrického zjednodušení pro hodnotu prvního hlavního napětí a hodnotu maximálního smykového napětí. Z měrné napěťové odezvy byly odhadnuty tyto hodnoty v kritickém místě dle zvolených zatěžujících sil.

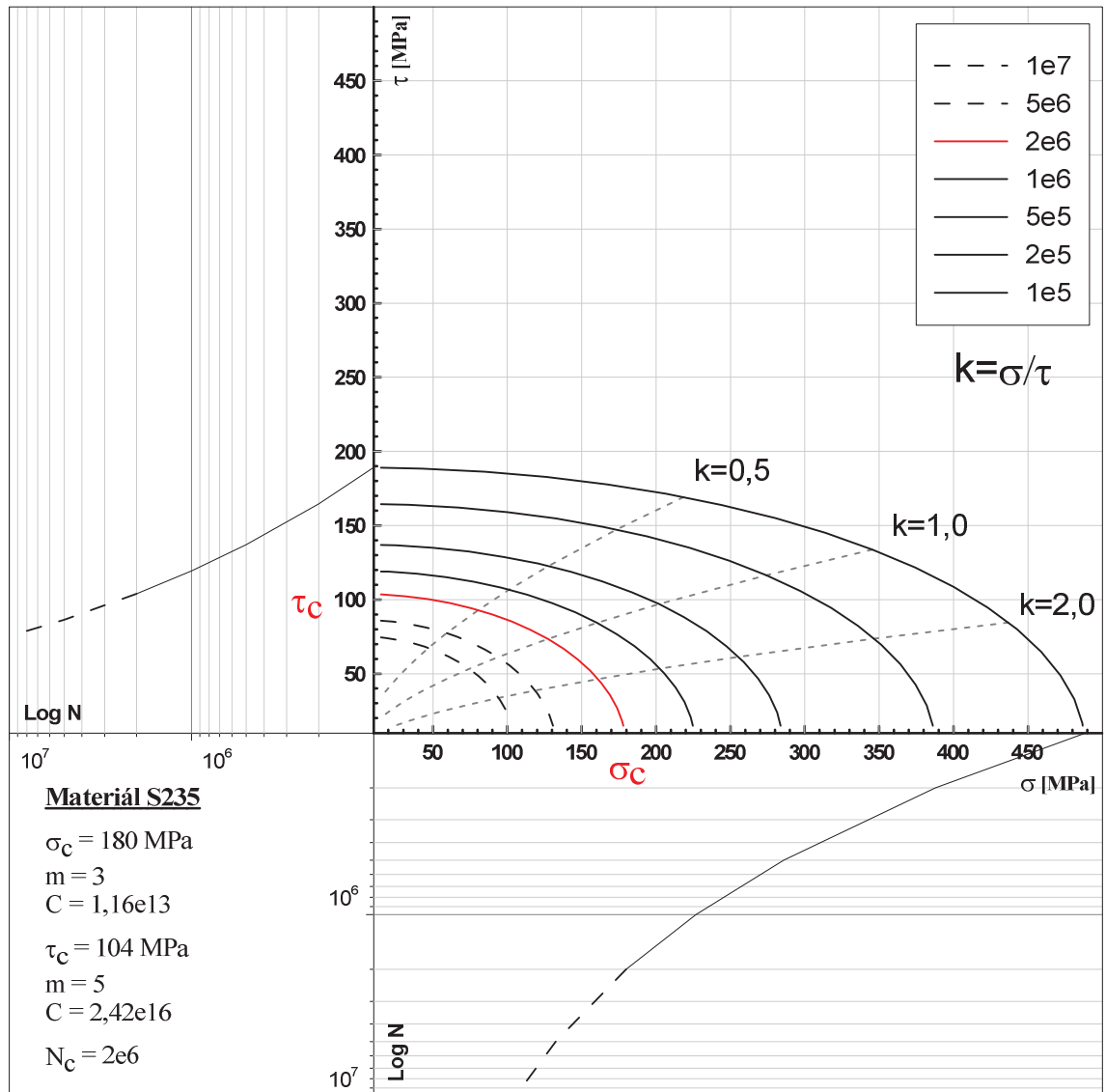
Postupy jsou demonstrovány na původní zatížení, které je popsáno v kapitole 8.4. Je nutné připomenout, že s ohledem na způsob zatěžování mohou na vzorku vzniknout dvě kritická místa (levá a pravá pásnice), proto jsou zde uvedeny hodnoty pro obě kritická místa (CP1 – primární kritické místo a CP2 – sekundární kritické místo).

Hodnocení únavového účinku obou složek, jak smykové tak tahové, je provedeno pomocí rozšířeného  $\sigma - \tau$  diagramu (obr. 26), který zohledňuje zvolený tvar únavových křivek obou složek. Aby bylo dosaženo stejného účinku a stejného počtu cyklů do porušení, musí být splněny následující podmínky:

1. Poměr  $\sigma/\tau$  musí mít velmi malou odchylku mezi původním a novým zatížením.
2. Stejný počet cyklů do poruchy nastane, pokud budou oba body kombinací  $\sigma - \tau$  původního i nového zatížení ležet na stejné elipse konstantní únavy.
3. Druhé kritické místo nebude vykazovat obdobné nebo vyšší únavové namáhání.

Postup pro návrh nového zatížení může být následující:

1. Ze zatížení se odebere jedna z nedominantních složek (F2).
2. Změní se poměr účinků mezi ostatními válci tak, aby vykazovaly stejný poměr  $\sigma/\tau$  jako původní zatížení.
3. Intenzita zatížení všech zbylých válců se upraví tak, aby byla hladina napjatosti stejná jako u původního zatížení.
4. Velikost odchylky  $\sigma/\tau$  oproti původnímu zatížení představuje parametr, kterým lze vyjádřit nepřesnost navrženého zatížení. To samozřejmě za předpokladu, že alespoň jedna ze složek napjatosti byla dosažena přesně.



Obr. 26 – Rozšířený  $\sigma - \tau$  diagram

Rozšířený  $\sigma - \tau$  diagram umožňuje nejen posoudit, zda je zachován poměr (to je patrné již při výpočtu), ale umožňuje také řádově stanovit počet cyklů do poruchy. To je ale závislé od použitých únavových křivek, které se pro hodnocení použijí. Na obr. 26 jsou pro ukázkou zakresleny únavové křivky pro základní materiál.

### 11.1. Nově navržené varianty zatížení

Při návrhu nového zatížení lze obvykle dojít k několika výsledkům. Může ale nastat také situace, kdy řešení nelze nalézt vůbec. Počet nalezených řešení závisí na tom, s jak velkou chybou se spokojíme. K demonstraci navržené metodiky byl záměrně použit vzorek, který mohl vykazovat s ohledem na způsob zatížení vznik sekundárního kritického místa. Pokud je zde tento předpoklad, pak je potřeba toto místo také zahrnout do analýzy a sledovat. Při aplikaci zjednodušení je ale žádoucí, aby k takovému stavu nedošlo. V tomto druhém místě nemusí být po zjednodušení přesně zachována hodnota napjatosti, neměla by však nastat situace, aby toto místo bylo namáháno více než primární kritické místo. V následujících tabulkách jsou uvedeny jednotlivé varianty. Hodnoty maximálních a minimálních hodnot složek napětí jsou vypočteny z měrné napěťové odezvy. Dále je z těchto hodnot stanovena střední hodnota a amplituda. Dále je vypočteno ekvivalentní napětí jako:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_f}} \quad (28)$$

Ekvivalentní napětí je amplituda průběhu napětí, která má vzhledem k únavovému poškození stejný účinek jako vypočtený průběh s nenulovou střední hodnotou. [16]

#### a) Původní varianta (hladina zatížení 8,5 kN, poměr $\sigma/\tau = 2,12$ )

Tato varianta je výchozí variantou pro porovnání. Je zde vidět, že smyková složka u obou kritických míst je stejná, takže pokud by byla pro hodnocení zvolena varianta hodnotící pouze smykové napětí, nebyl by výsledek použitelný. Tahová složka primárního kritického místa má dostatečný odstup od složky sekundárního kritického místa.

**Tab. 23 - Původní nezjednodušené zatížení**

Původní (8,5 kN)	F1	F2	F3	
$F_h$	4.3 kN	-1.3 kN	10.6 kN	
$F_d$	-4.3 kN	1.3 kN	6.4 kN	
	CP1		CP2	
[Mpa]	$\sigma$	$\tau$	$\sigma$	$\tau$
$\sigma_d, \tau_d$	13.3	6.5	-51.7	6.3
$\sigma_h, \tau_h$	119.3	58.1	48.3	58.3
$\sigma_m, \tau_m$	66.3	32.3	-1.7	32.3
$\sigma_a, \tau_a$	53.0	25.8	50.0	26.0
$\sigma_e, \tau_e$	64.9	28.4	49.7	28.6
$\sigma/\tau$	2.12 ( 0% )		1.61 ( 0% )	

**b) Varianta A (hladina zatížení 7,0 kN, poměr  $\sigma/\tau = 2,11$ )**

U této varianty byl vynechán účinek síly  $F_2$  a účinek byl kompenzován ostatními silami. Výsledná tahová složka pro sekundární kritické místo se dokonce snížila. Smyková složka zůstala u všech hodnot obdobná.

**Tab. 24 - Nové zatížení – varianta A**

Varianta A (7.0 kN)	F1	F2	F3	
$F_h$	3.5 kN	0.0 kN	8.8 kN	
$F_d$	-3.5 kN	0.0 kN	5.3 kN	
	CP1		CP2	
[Mpa]	$\sigma$	$\tau$	$\sigma$	$\tau$
$\sigma_d, \tau_d$	-0.4	-0.2	-42.4	-0.4
$\sigma_h, \tau_h$	109.6	53.4	39.6	53.6
$\sigma_m, \tau_m$	54.6	26.6	-1.4	26.6
$\sigma_a, \tau_a$	55.0	26.8	41.0	27.0
$\sigma_e, \tau_e$	64.8	30.7	<b>40.8</b>	30.9
$\sigma/\tau$	2.11 ( -0.65% )		1.32 ( -18.22% )	

**c) Varianta B (hladina zatížení 5,8 kN, poměr  $\sigma/\tau = 2,10$ )**

U této varianty byl opět vynechán účinek síly  $F_2$  a účinek byl kompenzován ostatními válci. Výsledná tahová složka pro sekundární kritické místo se opět snížila. Smyková složka zůstala u všech hodnot opět obdobná. Hlavním rozdílem oproti variantě A je jiný poměr sil  $F_1$  a  $F_2$ .

**Tab. 25 - Nové zatížení – varianta B**

Varianta B (5.8 kN)	F1	F2	F3	
$F_h$	2.9 kN	0.0 kN	8.7 kN	
$F_d$	-2.9 kN	0.0 kN	2.9 kN	
	CP1		CP2	
[Mpa]	$\sigma$	$\tau$	$\sigma$	$\tau$
$\sigma_d, \tau_d$	-11.6	-5.7	-34.8	-5.8
$\sigma_h, \tau_h$	102.1	49.7	32.5	49.9
$\sigma_m, \tau_m$	45.2	22.0	-1.2	22.0
$\sigma_a, \tau_a$	56.8	27.7	33.6	27.8
$\sigma_e, \tau_e$	65.0	31.0	33.5	31.1
$\sigma/\tau$	2.1 ( -1.17% )		1.08 ( -33.29% )	

**d) Varianta C (hladina zatížení 19,3 kN, poměr  $\sigma/\tau = 2,28$ )**

U této varianty byly vynechány účinky sil  $F_1$  a  $F_2$  a byly kompenzovány pouze silou  $F_3$ . Tahová složka byla dodržena, poměr tahové a smykové složky nikoli (odchylka 7,5 % od původní hodnoty). U této varianty lze měnit pouze hodnotu intenzity zatížení v případě, že nechceme měnit poměr střední hodnoty a amplitudy signálu síly  $F_3$ .

**Tab. 26 - Nové zatížení – varianta C**

Varianta C (19.3 kN)	F1	F2	F3	
$F_h$	0.0 kN	0.0 kN	24.1 kN	
$F_d$	0.0 kN	0.0 kN	14.5 kN	
	CP1		CP2	
[Mpa]	$\sigma$	$\tau$	$\sigma$	$\tau$
$\sigma_d, \tau_d$	112.9	55.0	-2.9	55.0
$\sigma_h, \tau_h$	188.2	91.7	-4.8	91.7
$\sigma_m, \tau_m$	150.5	73.3	-3.9	73.3
$\sigma_a, \tau_a$	37.6	18.3	-1.0	18.3
$\sigma_e, \tau_e$	64.7	28.3	-1.0	28.3
$\sigma/\tau$	2.28 ( 7.52% )		-0.03 ( -102.09% )	

**e) Varianta C1 (hladina zatížení 10,6 kN, poměr  $\sigma/\tau = 2,15$ )**

Tato varianta je stejná jako varianta C pouze s tím rozdílem, že pro docílení vhodného zatížení byla měněna nejen intenzita zatížení ale i poměr amplitudy a střední hodnoty průběhu síly. Poměr byl z původního poměru 1 : 0,25 změněn na 1 : 0,6.

**Tab. 27 - Nové zatížení – varianta C1**

Varianta C1 (10.6 kN)	F1	F2	F3	
$F_h$	0.0 kN	0.0 kN	17.0 kN	
$F_d$	0.0 kN	0.0 kN	4.2 kN	
	CP1		CP2	
$\sigma_d, \tau_d$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma$	$\tau$
$\sigma_h, \tau_h$	33.1	16.1	-0.8	16.1
$\sigma_m, \tau_m$	132.3	64.4	-3.4	64.4
$\sigma_a, \tau_a$	82.7	40.3	-2.1	40.3
$\sigma_e, \tau_e$	49.6	24.2	-1.3	24.2
$\sigma_d, \tau_d$	64.4	30.0	-1.3	30.0
$\sigma/\tau$	2.15 ( 1.17% )		-0.04 ( -102.61% )	

**f) Varianta D (hladina zatížení 11,0 kN, poměr  $\sigma/\tau = 2,05$ )**

U této varianty byly vynechány účinky válců  $F2$  a  $F3$  a byly kompenzovány pouze silou  $F1$ . Tahová složka byla dodržena, poměr tahové a smykové složky je uspokojivý. I když tato varianta na první pohled vykazuje dobré výsledky z pohledu primárního kritického místa, není celkový výsledek vyhovující. Zde totiž dochází k situaci, která již byla uvedena v předešlém textu. Napjatost v sekundárním kritickém místě je stejná jako napjatost v primárním kritickém místě. To způsobí, že pravděpodobnost únavového porušení primárního kritického místa je stejná jako u sekundárního kritického místa, což neodpovídá původnímu charakteru zatížení. I když z pohledu pouhého porovnání počtu cyklů do poruchy by zřejmě bylo toto zatížení vyhovující, nemuselo by dojít k porušení v předpokládaném primárním kritickém místě!

**Tab. 28 - Nové zatížení – varianta D**

Varianta D (11.0 kN)	F1	F2	F3	
$F_h$	5.5 kN	0.0 kN	0.0 kN	
$F_d$	-5.5 kN	0.0 kN	0.0 kN	
	CP1		CP2	
[Mpa]	$\sigma$	$\tau$	$\sigma$	$\tau$
$\sigma_d, \tau_d$	-64.9	-31.6	-64.9	-31.9
$\sigma_h, \tau_h$	64.9	31.6	64.9	31.9
$\sigma_m, \tau_m$	0.0	0.0	0.0	0.0
$\sigma_a, \tau_a$	64.9	31.6	64.9	31.9
$\sigma_e, \tau_e$	64.9	31.6	64.9	31.9
$\sigma/\tau$	2.05 ( -3.35% )		2.03 ( 26.05% )	



## 12. Závěr k navržené metodice

V práci uvedené teoretické a experimentální ověření navržené metodiky zjednodušení způsobu zatěžování konstrukčního uzlu KV bylo provedeno na jednom konkrétním vzorku. Z pohledu obecného zhodnocení této metody je potřeba uvést následující fakta:

- Pro ověření bylo použito pouze soufázové zatížení o jednom bloku. Při použití zatížení složeného z více různých bloků, je nutné nahradit tato zatížení v každém bloku zvlášť, protože každý blok zatížení může např. vykazovat jiný poměr normálové a smykové složky napětí. Mohlo by dojít i k situaci, že navržená sestava nemusí vyhovovat oběma blokům najednou.
- Geometrie sestavy byla po celou dobu neměnná, pouze účinek zvoleného EH válce byl vyloučen mechanickým odpojením EH válce od sestavy. Nebyla tak zkoumána možnost např. aplikovat některý ze silových účinků pod jiným úhlem než u původní sestavy.
- Při zatěžování bylo použito pouze harmonické zatížení. Není však vyloučeno použít jakéhokoli jiného zatížení (dokonce i stochastického) avšak před aplikaci metody zjednodušení je vhodné signál zpracovat vhodnou třídící metodou. Nebo použít pouze lokální extrémy (výkmity) průběhů a to řazené ve stejné časové následnosti nebo transformované na vhodné zátěžové bloky. Výpočet zejména korelačních koeficientů pro všechny extrémy pak může být poměrně náročný.
- Pro prvotní ověření funkčnosti metodiky nebylo přistoupeno k nesoufázovému zatížení. Samozřejmě pro praktické použití uvedené metodiky je nutné toto předem ověřit – což bude předmětem dalšího výzkumu. Je to však oblast, kterou již s ohledem na její objem nebylo možné zařadit do této práce.
- Použitý vzorek byl z několika pohledů specifický. Kritické místo bylo tvořeno speciálním tvarem zaoblení u plechu s konstantní tloušťkou. Směr hlavního napětí zde směřuje až na malé odchylky pouze v rovině plechu. Odchylka směru hlavního napětí není tak výrazná, jako by mohla být u jiné konstrukce. Avšak právě tento charakter vzorku je typický pro konstrukce kolejových vozidel (svařence z plechů).
- Při experimentálním ověření se objevila nelinearita v závislosti síly a napětí u válce V2. Tento jev byl způsoben vlastnostmi kulového kloubu a lze je odstranit pouze použitím jiného typu kloubu v silovém řetězci. Bohužel v čase realizace experimentu nebyl jiný typ kloubu k dispozici.

- Při zjednodušení byl vyloučen účinek síly  $V_2$ , který z pohledu konstrukčního uzlu není dominantní. Z pohledu celé konstrukce však dominantní být může, i když účinek na zvolené kritické místo dominantní být nemusí.
- Výsledek aplikace navržené metody je velmi závislý na způsobu hodnocení napjatosti v kritickém místě. V práci bylo navrženo několik způsobů, avšak použít lze i jiné. Měl by být ale použit takový způsob (kritérium) hodnocení, jehož výsledkem je jeden nebo maximálně dva parametry.
- U experimentálního ověření jednoparametrického zjednodušení bylo provedeno zatížení vždy ve třech stupních zatížení (50%, 100%, 150%). Intenzita zatížení neměla zásadní vliv na dosažené výsledky, avšak nelze opomenout fakt, že při nejnižším stupni zatížení lze pozorovat odchylky způsobené malým poměrem velikosti měřené veličiny vůči měřicímu rozsahu.

### **12.1. Možnosti dalšího vývoje navržené metodiky**

Nejobtížnější a nejhůře obecně popsatelnou částí metodiky je návrh nového zatížení. Tato část je totiž vždy závislá od konkrétní zjednodušované sestavy. Teoreticky by bylo možné tento postup algoritmizovat na základě použití vhodné iterační metody. To by ale obnášelo vždy vytvořit matematický model vzorku (např. za použití měrné napěťové odezvy) tak, aby hodnocené napětí v kritickém místě bylo funkcí vnějších sil. Zjištěná napjatost by byla vyhodnocena pomocí zvoleného kritéria a výsledná hodnota by byla porovnána s hodnotou stanovenou pro původní zatížení. Cílem iteračního výpočtu by bylo snížit tuto odchylku na přípustnou mez pomocí vstupních hodnot – vnějších zatěžujících sil. Tento postup by však z pohledu matematického nemusel být řešitelný u všech kritérií hodnocení.

Dále pro výpočet korelačních koeficientů by bylo možné použít metodu podobnou metodě Monte Carlo, kdy by se dle generátoru náhodné veličiny generovaly hodnoty sil podle zvoleného histogramu ve zvoleném intervalu nebo dle zvolené vzájemné závislosti všech složek zatížení. Vzniklo by tak mnohem více bodů a vypočtená hodnota by měla obecnější platnost.

Zatím největším omezením metodiky (tak jak byla prezentována) je nemožnost použít nesoufázové zatížení. Z pohledu odhadu napětí v konstrukci to není omezující faktor, protože vhodným vzorkováním signálů zatěžujících sil lze odezvy vypočítat v každém kroku zvlášť. Problematický je ale návrh nového zatížení, protože více nesoufázových složek zatížení lze nahradit menším počtem jen ve výjimečných případech. Zde bude muset být zřejmě přistoupeno k hodnocení napětí v kritickém místě pomocí vhodných statistických charakteristik a nový způsob zatížení bude navržen tak, aby byly tyto charakteristiky dosaženy.

## **12.2. Možnosti dalšího vývoje vytvořeného SW**

Byl vytvořen SW pro vyhodnocení a vizualizaci výsledků MKP analýz. Tento SW nástroj byl vytvořen zejména pro účely, které byly v práci popsány, avšak jeho obecné použití pro simulaci napjatosti v konstrukci na základě vnějšího zatížení a měrné napěťové odezvy není vyloučeno. Dále jej lze využít pro vizualizaci a korelační analýzu výsledků MKP analýz.

### 13. Přínos práce

V práci bylo popsáno několik netradičních postupů, které byly použity při aplikaci navržené metodiky zjednodušení. Jedná se zejména o následující postupy:

- Odhad napjatosti konstrukce na základě měrné napěťové odezvy.
- Využití korelační analýzy při vyhodnocení výsledků MKP analýz.
- Porovnání výsledků MKP analýz s tenzometrickým měřením na základě odečtu posunutí MKP uzlů.

Tyto postupy jsou použitelné nejen při aplikaci navržené metodiky, ale i v jiných oblastech. Popsaný postup odhadu napětí v konstrukci má samozřejmě jistá omezení, ale pro prvotní odhad ušetří čas potřebný k realizaci mnoha variant MKP výpočtů, které lze zredukovat v nejjednodušším postupu na počet rovnající se počtu vnějších složek zatížení. Pouhým zadáním seznamu zatěžovacích stavů (průběhů) pak lze získat soubor vizualizací nebo datových souborů výsledného napětí pro zadané stavy. Další možností je provést korelační analýzu mezi zvolenými MKP uzly a to pro zvolené složky napětí (popř. posuvů) nebo hodnoty vypočtené z těchto složek uživatelsky definovaným vztahem.

Hlavním přínosem je navržená metodika zjednodušení způsobu zatěžování konstrukčního uzlu KV k účelu simulace jeho provozního zatěžování na dynamickém zkušebním stavu, kterou je ale potřeba v této fázi chápat pouze jako počátek dalšího výzkumu, protože má zatím několik omezení. Pro jednodušší konstrukční uzly zatížené vnějšími složkami zatížení se stejnou fází je však použitelná.

## Literatura

- [1] *ERRI B12/RP17: Wagons*. Utrecht: European Rail Research Institute, 1997.
- [2] *ERRI B12/RP60: Versuche zum Festigkeitsnachweis an Schienenfahrzeugen*. 2. Ausgabe. Utrecht: European Rail Research Institute, 2001. ISBN 2-7461-0480-6.
- [3] *UIC 510-3: Güterwagen*. 1. Ausgabe. Paris: Internationaler Eisenbahnverband, 1995. ISBN 2-901585-31-0.
- [4] *UIC 510-3. Güterwagen: Prüfstandversuche an Rahmen von Güterwagendrehgestellen mit 2 und 3 Radsätzen*. Paris: Internationaler Eisenbahnverband, 1. 7.1994, 33 s. Nr. 2-901585-31-0.
- [5] *UIC 515-4. Passenger rolling stock - Trailer bogies - Running gear - Bogie frame structure strength tests*. Paris: International Union of Railways, 1. 1. 1993.
- [6] *UIC 615-0: Tractive units - Bogies and running gear - General provisions*. 2ed. Paris: International Union of Railways, 2003. ISBN 2-7461-0486-5.
- [7] *UIC 615-1: Tractive units - Bogies and running gear - General conditions applicable to component parts*. 2ed. Paris: International Union of Railways, 2003. ISBN 2-7461-0483-0.
- [8] *UIC 615-4: Motive power units - Bogies and running gear - Bogie frame structure strength tests*. 2ed. Paris: International Union of Railways, 2003. ISBN 2-7461-0480-6.
- [9] *ČSN EN 1993-1-9. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí: Část 1-9: Únava*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [10] Hobbacher, A.: *Directive IIW: Doc. XIII-1965\_03/XV-1127-03 Recommendation for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Wilhelmshaven, 2005.
- [11] *ČSN EN 13749. Železniční aplikace - Dvojkolí a podvozky: Metody specifikování požadavků na rámy podvozků*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 52 s.
- [12] PAPUGA, J.; RŮŽIČKA, M.: *Analýza existujících kritérií pro popis poškozování při víceosém zatěžování*. [Zpráva č. 2051/01/4]. ČVUT v Praze, Praha 2001, 71 str.

- [13] CABRNOCH, B., J. PAPUGA a M. RŮŽIČKA. *Metody a programy pro hodnocení únavové životnosti*. Praha: ČVUT v Praze, 1998.
- [14] WEIBULL, W. *A Statistical Theory of the Strength of Materials*. Stockholm, 1939.
- [15] PŮST, Ladislav. *Experimentální metody v dynamice*. Praha: ČVUT v Praze, 1981. 207 s.
- [16] RŮŽIČKA, M., M. HANKE a M. ROST. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: ČVUT v Praze, 1989.
- [17] VÁGNER, J., CULEK ml., B., CULEK B.: *Simulace rozhodujících složek provozního namáhání částí kolejových vozidel na multiaxiálních zatěžovacích standech: Přehledová zpráva VCKV č. B8-01-2011-UPa*. Pardubice, 2011.
- [18] VÁGNER, J., CULEK ml., B., CULEK B.: *Simulace rozhodujících složek provozního namáhání částí kolejových vozidel na multiaxiálních zatěžovacích standech: Přehledová zpráva VCKV č. B8-01-2010-UPa*. Pardubice, 2010.
- [19] VÁGNER, J., CULEK ml., B., CULEK B.: *Simulace rozhodujících složek provozního namáhání částí kolejových vozidel na multiaxiálních zatěžovacích standech: Přehledová zpráva VCKV B5-01-2009-UPa*. Pardubice, 2009.
- [20] VÁGNER, J., CULEK ml., B., CULEK B.: *Simulace rozhodujících složek provozního namáhání částí kolejových vozidel na multiaxiálních zatěžovacích standech: Přehledová zpráva VCKV B5-01-2008*. Pardubice, 2008.
- [21] VÁGNER, J., CULEK ml., B., CULEK B.: *Teoretický postup zjednodušení multi-axiální zkoušky životnosti rámu podvozku kolejového vozidla*. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech 2009*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2009. s. 273. ISBN 9788073951993.
- [22] VÁGNER, J., CULEK jr., B., CULEK B.: Possibility of load simplification for multiaxial fatigue test. In *26th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*. Leoben: Montanuniversität, 2009. s. 235. ISBN 9783902544025.
- [23] VÁGNER, J., CULEK jr., B., CULEK, B.: Method of load simplification for multiaxial fatigue tests. In *27th Danubia – Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*. Wrocław: Wrocław University of Technology, 2010, s. 227-228. ISBN 978-83-87982-59-1.

- [24] VÁGNER, J., CULEK jr., B., CULEK, B.: Possibility of multiaxial test simplification of rail vehicle bogie frames. In *Scientific papers of the University of Pardubice. Series B The Jan Perner Transport Faculty 14 (2008)*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2009. s. 17. ISBN 9788073952334. ISSN 12116610.
- [25] BALDA, M., SVOBODA, J., FRŐHLICH, V.: Odhadování únavové životnosti částí při kombinovaném náhodném zatěžování. In *Inženýrská mechanika*. 2003(5), s. 387 - 398.
- [26] BALDA, M.: Vícekanálové sledování kumulace poškození v reálném čase. In *Dynamika strojů 96: Kolokvium ÚT AVČR*. Praha, 1996.
- [27] CHVOJAN, J., KEPKA, M., MALKOVSKÝ, Z.: Strength and Fatigue Life of Bogies: Experience from Calculations and Tests. In *Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading*. Darmstadt: Deutscher Verband für Materialforschung und-prüfung e.V., 2009. ISBN 978-3-00-027049-9.
- [28] ŠVĚD, S., MALKOVSKÝ, Z.: Pevnost vozidel - druhy, požadavky a vývoj předpisů. In *18. Medzinárodná konferencia "Súčasný problémy v kol'ajových vozidlách - PRORAIL 2007" : 19. - 21. septembra 2007, Žilina, Slovensko*. Žilina: VTS při Žilinskej univerzite v Žilini, 2007. s. 434. ISBN 978-80-89276-07-3.
- [29] ROMÁN, J., ÁLVAREZ-CALDAS, C, QUESADA, A.: Structural validation of railway bogies and wagons using finite elements tools. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers : Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. [s.l.] : Professional Engineering Publishing, 2006. s. 139-150. ISSN 0954-4097.
- [30] PARK, B. H., LEE, K. Y.: Bogie frame design in consideration of fatigue strength and weight reduction. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers : Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* . [s.l.] : Professional Engineering Publishing, 2006. s. 201-206. ISSN 0954-4097.
- [31] AMZALLAG, C.: *Automation in fatigue and fracture: testing and analysis*. Philadelphia: ASTM International, 1994. 665 s. ISBN 9780803119857, STP / ASTM – Volume 1231.
- [32] SVOBODA, J., FRŐHLICH V., KRAUS, V.: Únavová pevnost a životnost reálných konstrukcí při kombinovaném náhodném zatěžování. In: *Experimental stress analysis 2005*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. ISBN 80-214-2941-0.
- [33] JIANG, Y. A fatigue criterion for general multiaxial loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2000, s. 19 - 32.

- [34] LI, B., J. L.T. SANTOS a M. D. FREITAS. *A computerized procedure for long-life fatigue assessment under complex multiaxial loading: Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2000. s. 165 - 177.
- [35] STICHEL, S., KNOTHE, K.: Fatigue Life Prediction form an S-Train Bogie. In *Vehicle System Dynamics Supplement*. 1998. s. 390 - 403.
- [36] SUSMEL, L., TOVO, R.: On the use of nominal stresses to predict the fatigue strength of welded joints under biaxial cyclic loading. In: *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2004, 1005 - 1024. 27. doi: 10.1111/j.1460-2695.2004.00814.x.
- [37] ČULÍK, J.: Lineární teorie pružnosti. [online]. [cit. 2011-01-20]. Dostupné z: [www.fbmi.cvut.cz/e/pruznost/175.doc](http://www.fbmi.cvut.cz/e/pruznost/175.doc)
- [38] *OpenGL Software Development Kit: Documentation, Sample Code, Libraries, and Tools for creating OpenGL-based Applications* [online]. [cit. 2011-01-03]. Dostupné z: <http://www.opengl.org/sdk/>
- [39] Univerzální tenzometry pro napěťovou analýzu serie Y. *HBM měřící technika* [online]. [cit. 2011-01-03]. Dostupné z: [http://www.hbm.cz/Prospekty/Tenzometry/SG\\_Y/cat\\_sg\\_y\\_e.pdf](http://www.hbm.cz/Prospekty/Tenzometry/SG_Y/cat_sg_y_e.pdf)
- [40] INOVA PRAHA. *LabExpert: Programový systém pro řízení servohydraulických testů*. Praha, 2005.
- [41] INOVA PRAHA. *RED03: Digitální regulátory hydraulických a elektromechanických pohonů*. Praha, 2005.
- [42] INOVA PRAHA. *EU 2000D – CU14: Řídící elektronika*. Praha, 2005.
- [43] INOVA PRAHA. *Řídící elektronika CU14-M11* [Elektrické schéma]. Praha, 2005.
- [44] ZELENKA, J., VÁGNER, J., HÁBA, A.: Experimentální ověření možností stanovení příčné tuhosti flexi-coil pružin. In *Vědeckotechnický sborník ČD č. 31/2011* [online]. Praha: Generální ředitelství Českých drah [cit. 2011-09-26].
- [45] VÁGNER, J., HÁBA, A.: Možnosti stanovení příčné tuhosti flexi-coil pružin. In *Vědeckotechnický sborník ČD č. 30/2010* [online]. Praha: Generální ředitelství Českých drah [cit. 2011-09-26].



- [46] HÁBA, A., ZELENKA, J., VÁGNER, J.: Podmínky výpočtu příčné tuhosti válcové šroubovitě pružiny metodou konečných prvků. In *XX. medzinárodná konferencia SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLAJOVÝCH VOZIDLÁCH - PRORAIL 2011*. Žilina: EDIS, 2011, s. 279-288. ISBN 978-80-89276-30-1.
- [47] VÁGNER, J., ZELENKA, J., CULEK ml., B.: Experimentální výzkum příčné tuhosti flexi-coil pružin na Dopravní fakultě Jana Pernera. In *XX. medzinárodná konferencia SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLAJOVÝCH VOZIDLÁCH - PRORAIL 2011*. Žilina: EDIS, 2011, s. 225-235. ISBN 978-80-89276-32-5.
- [48] CULEK jr., B, CULEK, B, VÁGNER, J.: Weld influence on fatigue behavior of the simple steel specimen. In *27th Danubia – Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*. Wroclaw: Wroclaw University of Technology, 2010, s. 37-38. ISBN 978-83-87982-59-1.
- [49] KERMES, J., OBOROVÝ PODNIK ŠKODA PLZEŇ.: *Wöhlerovy křivky československých ocelí*. Plzeň, 1967.
- [50] KERMES, J., ČESKÁ VĚDECKÁ SPOLEČNOST, DŮM TECHNIKY, PLZEŇ.: *Wöhlerovy křivky československých ocelí II*. Plzeň, 1973.