

## DISERTAČNÍ PRÁCE

### Výzkum vybraných vlastností kompozitového podvozku a jeho komponent

Autor: Ing. Jan Chvojan

Školitel: doc. Ing. Miloslav Kepka, CSc.

---

PLZEŇ, KVĚTEN 2017

## **Prohlášení**

Předkládám k posouzení disertační práci, jejíž téma je „Výzkum vybraných vlastností kompozitového podvozku a jeho komponent“.

Tato práce je dle požadavků studijního a zkušebního řádu ZČU v Plzni, tj. obsahuje zejména vlastní výsledky výzkumu v rámci tvorby disertační práce včetně původních a uveřejněných výsledků.

Prohlašuji, že jsem tuto písemnou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne: 30. 05. 2017

.....

podpis

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat všem, kteří mne podporovali při práci a u kterých jsem našel podporu i cenné informace při zpracovávání této práce. Největší dík patří především mému školiteli doc. Ing. Miloslavu Kepkovi, CSc. a dále pak Ing. Jaroslavu Václavíkovi, Ing. Romanu Jozefy a prof. Ing. Stanislavu Hosnedlovi, CSc.

## **Upozornění**

Podle zákona o právu autorském č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR), § 17, zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb., je využití a společenské uplatnění výsledků práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků, nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora, autorů citovaných prací a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## ANOTACE

Doprovodným jevem současné světové globalizace je přesun osob, zboží a nákladu na malé, střední i velké vzdálenosti. Zvyšuje se důraz na dopravní logistiku, snižování nákladů na dopravu i efektivní využití infrastruktury. Významným druhem dopravy, splňující tyto základní požadavky, je přeprava po železnici. Na jedné straně moderní vysokorychlostní sofistikované železniční systémy pro přepravu osob, na druhé straně relativně zastaralé, hlučné podvozky nákladních vagónů pro převoz nákladu. Průlom do těchto protikladů může vnést sklolaminátový podvozek, který byl vyvinut a autorem disertační práce spoluřešen v rámci projektu Eurobogie E!1841 v rámci programu Eureka. Tato disertační práce má za cíl získání vybraných vlastností, popisujících dynamické chování sklolaminátového GFRP podvozku v laboratorních podmínkách. Práce popisuje vyvinuté metodiky ověřování vybraných vlastností podvozku a jejich výsledky. Ty byly v první fázi experimentálně získány při výzkumu pětinového modelu podvozku měřením na reálné trati. Následně byly experimentálně ověřovány vlastnosti klíčových komponent reálného podvozku, tj. podélník spodního rámu podvozku a jeho příčnick s integrovanými brzdovými rámy. V závěrečné fázi byl proveden výzkum dynamických vlastností prototypu GFRP podvozku v reálném měřítku pomocí shaker rig testů.

## ANOTATION

Accompanying phenomenon of the current world of the globalization is the movement of people, goods and cargo to small, medium and large distances. At the same time the emphasis on transport logistics, transport cost reducing and effectiveness of the infrastructure use are significantly increased. An important mode of the transport that meets these basic requirements is definitely the rail transport. On one side, there are modern sophisticated high-speed rail systems for the passenger transport, on the other hand there are relatively outdated, noisy and too stiff bogies for freight wagons for the cargo transport. Breakthrough in these opposites can bring a glass fibre reinforced plastic bogie that was developed and by the author of this dissertation co-solved within the Eurobogie E!1841 project in the frame of the Eureka framework. Aims of this thesis are to obtain selected properties describing the dynamic behaviour of this GFRP bogie under the laboratory conditions. This thesis describes a methodology developed by the verification of selected characteristics of this bogie and their results. At the first stage these characteristics were investigated by the experimental model of this bogie fifth scaled by the measurement on the real track. Subsequently, the properties of key bogie components, ie. the longitudinal beam of the bottom bogie frame and its crossbeam with integrated brake sub frames were experimentally verified. In the final phase of this research the dynamic properties were investigated on the full scale of the GFRP bogie prototype using the shaker rig.

## Obsah

1	Úvod.....	3
2	Cíle disertační práce .....	3
3	Použití kompozitů ve vybraných segmentech průmyslu .....	5
3.1	Větrná energetika.....	5
3.2	Motocyklový průmysl .....	7
3.3	Automobilový průmysl .....	7
3.4	Letecký průmysl .....	9
3.5	Železniční průmysl.....	12
3.5.1	Kolejová vozidla .....	15
4	Klasické konstrukční materiály kolejových vozidel.....	19
5	Vypružení kolejových vozidel.....	20
5.1	Vypružení pružnicemi.....	20
5.2	Vypružení šroubovitými pružinami .....	21
5.3	Vypružení s pryžo-kovovými bloky.....	21
5.4	Pneumatické vypružení.....	22
5.5	Netradiční formy vypružení .....	23
5.6	Kompozitové GFRP pružnice.....	24
6	Kompozitní materiály.....	24
6.1	Vlastnosti plastů a kompozitů .....	25
6.2	Dlouhovláknové kompozity.....	25
6.2.1	Materiály matric .....	26
6.2.2	Vyztužovací skelná vlákna .....	26
6.2.3	Technologie výroby.....	27
7	Zkoušky podvozků kolejových vozidel a jejich částí .....	28
7.1	Rám podvozku.....	29
7.1.1	Obvyklé metody experimentálního ověření – výzkumné činnosti.....	30
8	GFRP podvozek EB25.....	36
8.1	Konstrukce Ecobogie podvozku .....	37
9	Výzkum dynamického chování 1/5 GFRP podvozku.....	40
9.1	Instrumentace.....	40
9.2	Podmínky trati a ložení.....	44
9.3	Výsledky .....	46
9.3.1	Měření zrychlení .....	46
9.3.2	Měření pomocí snímačů posuvů .....	51
9.3.3	Detailní rozbor výsledků měření na trati.....	53
9.3.4	Analýza výsledků .....	58
10	Výzkum pevnostního dílu – podélník.....	59
10.1	Instrumentace zkoušky.....	60
10.2	Provedení testů.....	60
10.2.1	Static test .....	60
10.2.2	Sweep test.....	61
10.3	Vyhodnocení testů .....	61
10.3.1	Static test .....	61
10.3.2	Sweep test.....	63
11	Výzkum příčnicku s uchycením brzdového systému.....	67
11.1	Testovací sestava .....	67
11.1.1	Výzkum statické pevnosti .....	67



11.1.2	Výzkum únavových vlastností .....	71
12	Výzkum dynamického chování GFRP podvozku .....	74
12.1	Jednotlivé součásti speciálního zkušebního standu .....	75
12.1.1	Vagónové šasi .....	75
12.1.2	Popis speciálního zkušebního standu .....	76
12.1.3	Instrumentace .....	77
12.1.4	Metody testů .....	79
12.2	Výsledky výzkumu vybraných vlastností GFRP podvozku .....	83
12.2.1	Vertikální tuhost podvozku .....	83
12.2.2	Dynamické testy .....	86
12.2.3	Track profile tests .....	99
12.2.4	Diskuze výsledků dynamických testů .....	100
13	Splnění cílů disertační práce .....	101
14	Závěr .....	102
15	Literatura .....	105

# 1 Úvod

Použití plastů a kompozitů ve strojírenství vycházelo v minulosti zejména ze snahy (často i neopodstatněné) nahrazovat ocel a jiné kovové materiály. Hlavním argumentem bylo téměř ve všech případech snížení hmotnosti, v některých případech to byla i korozní odolnost, elektrické izolační vlastnosti nebo zřídka některé další důvody. S tímto přístupem byly v podstatě řešeny individuální případy strojírenských součástí a dílů. V posledních letech se ukazuje, že stále náročnější požadavky na strojírenské výrobky je možno splnit mnohem intenzivnějším využitím plastů a kompozitů a jejich dalším vývojem s cílem dosáhnout vlastností žádaných a očekávaných ve strojírenství. Má-li ovšem být tento vývojový směr v rámci relativně nové skupiny materiálů vysoce efektivní, je nutno do budoucna přijmout integrovanou strategii pro plasty a kompozity, na základě níž budou současně jednak inovovány stávající výrobky, jednak uváděny do praxe zcela nové výrobky využívající specifických vlastností plastů a kompozitů, bude systematicky rozvíjen trh, budou brány v úvahu ekonomické aspekty a v neposlední řadě budou přísně sledovány produktivita výroby a kvalita výrobků (technologické aspekty), bezpečnost zdraví a životní prostředí. Tato strategie bude vyžadovat zvládnutí materiálového vývoje v požadovaných směrech, principů konstruování s těmito materiály, modelování a predikčních metod pro materiály i celé součásti a díly a také nové výrobní technologie. Je zřejmé, že způsob vzdělávání bude v tomto směru hrát jednu z rozhodujících rolí.

V současné době materiály na bázi plastů a kompozitů a s nimi související technologie přesvědčivým způsobem pomáhají rozvíjet obor strojírenství jako celek. Dosud největší význam mají v leteckém průmyslu (sekundární i primární kompozitové konstrukce), automobilovém průmyslu (interiér, exteriér i pohonná jednotka) a výrobě plavidel všeho druhu. Ve stále větší míře se prosazují ve stavbě chemických a energetických strojů a zařízení (součásti čerpadel, odsiřovacích jednotek apod.) a v konstrukci výrobních strojů (např. vřetena obráběcích strojů). Polymerní a kompozitní materiály umožňují dosáhnout nejen základního požadavku společného pro téměř všechny aplikace, tj. snížení hmotnosti, ale umožňují i mnohem větší "svobodu konstruování" a tím i lepší podmínky pro inovace.

Cílem práce je především výzkum vybraných vlastností kompozitové GFRP konstrukce použité při stavbě podvozku nákladního kolejového vozidla. Klíčové získané vlastnosti z oblasti statického, dynamického a únavového chování GFRP podvozku budou porovnány s vlastnostmi podvozků z konvenčních materiálů, které by potenciálně mohly nahradit.

## 2 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je výzkum vybraných vlastností kompozitové konstrukce při stavbě podvozku kolejového vozidla. V kapitole č. 6 této práce jsou ukázány vybrané experimentální prostředky, které tento funkčně i pevnostně náročný konstrukční díl musí splňovat. Navíc, pokud není schválen a homologován, není možné ho na reálné trati provozovat ani ve zkušebním provozu, tj. není možné jeho pevnostní a dynamické vlastnosti, vzhledem k přísné regulaci železniční dopravy, ověřit na reálné trati.

V rámci mezinárodního projektu Eureka Eurobie E!1841 OE10017 – Pokroková vypružení železničních vozidel s použitím vlákniny vyztužených kompozitů, řešeného za spoluúčasti autora této práce, byl vyvinut kompozitní podvozek nákladního vagónu. Jedná se o

speciální konstrukci lehkého inovativního podvozku, který byl navržen tak, aby minimalizoval hluk a vibrace vznikající z interakce vozidla s kolejovým svrškem. Konstrukce podvozku redukuje statické i dynamické síly, akusticky izoluje skříň vozidla od podvozku a poskytuje vlastní řízení (self-steering) prostřednictvím rozdílných rozvorů kol při průjezdu zatáčkami. Vypružení a částečně tlumící funkce byly integrovány do sklolaminátového rámu podvozku. Zatížení se přenáší ze skříně vagónu na horní části každé z bočních rámu podvozku a dále do ložiskových domků. Podvozek byl navržen pro 22,5 t zatížení nápravy. Konstrukce využívá standardních komponent a je modulární konstrukce.

V první fázi se disertační práce bude věnovat výzkumu dynamického chování pětinového modelu kompozitového podvozku, který byl v rámci projektu Eurobie E!1841 navržen a vyroben se všemi detaily za účelem získání dynamických vlastností použitých sklolaminátových kompozitů. Tato část počítá s instalací snímačů na kritická místa konstrukce a provozním měřením na trati. Vyhodnocená měření a získané výsledky budou porovnány se stejným modelem ocelového podvozku.

Výzkum vybraných vlastností bude ve druhé etapě pokračovat na reálném kompozitovém podvozku a jeho dílčích prvcích. V této fázi se počítá s vývojem a zbudováním potřebných zkušebních standů pro ověření pevnostních, statických, dynamických a únavových vlastností této reálné konstrukce. Při absenci možnosti využít při získání typických vlastností kompozitového podvozku reálně tratě, jak bylo popsáno výše, klade si disertační práce za cíl vývoj metodik vedoucích ke stanovení statického i dynamického tlumení, určení vlastních frekvencí odpružených a neodpružených hmot podvozku a vagónu. Součástí práce bude také sledování typických vlastností v podmínkách laboratorní simulace jízdy po reálných úsecích tratí. Studovány budou zejména silové účinky podvozku na železniční infrastrukturu, torzní tuhost podvozku jako důležitý parametr klasifikace „track friendly“. Za účelem nalezení optimálních hodnot těchto vlastností budou výsledky výzkumu porovnány s vlastnostmi konvenčních podvozků, které jsou v současné době v nákladní železniční dopravě v Evropě nejvíce používány. Samostatnou kapitolou bude výzkum únavových vlastností klíčových prvků kompozitového podvozku, návrh metodik pro experimentální ověření a posouzení jejich únavové pevnosti.

Finálním úkolem celé práce bude zhodnocení výsledků jednotlivých etap výzkumu vybraných vlastností kompozitového podvozku a jeho klíčových částí a jejich porovnání s typickými vlastnostmi podvozků vyrobených z klasických materiálů. Výsledkem této etapy bude stanovení negativ, pozitiv a posouzení vhodnosti použití GFRP materiálu pro podvozky nákladních vagónů, případně jejich rozšíření na podvozky jiných železničních vozidel.

### 3 Použití kompozitů ve vybraných segmentech průmyslu

Použití kompozitových materiálů na bázi uhlíkových nebo skelných vláken zaznamenává v poslední době významný rozkvět ve všech předních odvětvích průmyslu. Děje se tak z mnoha důvodů, mezi nejhlavnější patří jejich vysoká pevnost při výrazně menší měrné hmotnosti, rozvoj celé řady výrobních technologií a v neposlední řadě i cenová dostupnost těchto materiálů v porovnání s neustále rostoucí cenou klasických konstrukčních materiálů. Navíc výrobky z kompozitů mají konečný tvar, žádné dodatečné náklady na obrábění.

**Kompozitní materiál (kompozit)** – Kompozity jsou tvořené spojením dvou a více chemicky a fyzikálně odlišných složek do jednoho celku. Tím vznikne nový materiál s unikátními vlastnostmi. Uhlíkové kompozity se vyznačují mimořádnou tuhostí spojenou s nízkou hmotností. Při stejné pevnosti je díl z uhlíkových kompozitů až o polovinu lehčí než ocelový.

**Plast vyztužený uhlíkovými vlákny**, neboli CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic), je uhlíkový kompozitní materiál tvořený výztuží z uhlíkových vláken, která jsou zalita ve speciální pryskyřici. Výztuže mohou být tvořené krátkými, ale častěji dlouhými vlákny. Uspořádání vláken má zásadní vliv na pevnost výsledného produktu. Podobně **Plast vyztužený skelnými**, neboli GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastic), je skelný kompozitní materiál tvořený výztuží ze skelných vláken, která jsou zalita speciálním pojivem.

#### 3.1 Větrná energetika

Větrná energie je v posledních letech stále populárnější, a to nejen v EU. Mnoho zemí investuje obrovské částky do budování větrných farem, které významně zvyšují podíl obnovitelných zdrojů při výrobě energie. V Evropě dochází k masivnímu rozvoji využití větrné energie zejména v severských přímořských zemích, jako je Dánsko, Švédsko, Německo a Velká Británie. Větrné elektrárny se staví i na moři, kde se využívají dlouhá a mělká pobřeží a stabilní větrné podmínky. Mezi evropské větrné velmoci se řadí také Rumunsko, kde společnost ČEZ provozuje větrnou farmu o výkonu 600MW.



Foto 3-1 Větrné farmy u pobřeží Velké Británie, zdroj: [Internet, [www.vattenfall.com](http://www.vattenfall.com)]

Jedním z nejvýznamnějších uživatelů větrné energie jsou USA, kde jsou provozovány jedny z největších větrných farem na světě. Největší větrnou elektrárnou je Roscoe ve státě Texas s instalovaným výkonem 781MW na rozloze 400 km<sup>2</sup>.



Foto 3-2 Větrná farma Roscoe, Texas, USA, zdroj: [Internet]

Deset největších větrných farem USA využívá instalovaný výkon téměř 7000MW a pokrývá spotřebu více než 8 milionů domácností USA, viz tab. 3-1.

Stát	Větrná farma	Instalovaný výkon
Texas	Roscoe	781 MW
Indiana	Fowler Ridge	750 MW
Texas	Sherbino	750 MW (1. Etapa 150 MW)
Texas	Horse Hollow	736 MW
Kalifornie	Tehachapi Pass	690 MW
Texas	Capricorn Ridge	662 MW
Kalifornie	San Gorgonio Pass	619 MW
Kalifornie	Altamont Pass	606 MW
Texas	Sweetwater	585 MW
Texas	Buffalo Gap	523 MW

Tab. 3-1 Deset největších větrných farem v USA

Současně USA plánují zbudovat větrné parky o instalovaném výkonu téměř 17GW, plánované instalované výkony jsou uvedeny v tab. 3-2.

Stát	Větrná farma	Instalovaný výkon
Jižní Dakota	Titan Wind Project	5 050 MW
Kalifornie	Tehachapi (Renewal Project)	4 500 MW
Texas	Pampa Wind Project	4 000 MW
Nebraska	Banner County	2 000 MW
Oregon	Shepherds Flat	909 MW

Tab. 3-2 Pět největších plánovaných větrných farem v USA

Samostatnou kapitolou větrné energetiky je Čína, která v roce 2009 zahájila stavbu gigantické větrné farmy v Jiunquam v provincii Kansu, instalovaný výkon převyšuje 13GW při

použití více než 7000 turbín. Současně plánuje výstavbu 6 větrných parků o celkovém instalovaném výkonu 60GW.

Takto výrazné využití větrné energie umožnil vývoj netradičních konstrukčních materiálů, v tomto případě převážně sklolaminátových kompozitů, které jsou lehké a svojí vysokou pevností umožní přenášet zatížení větrných poryvů a přeměňovat je na elektrickou energii. Masivní rozvoj umožnilo zvládnutí technologie výroby kompozitních materiálů a v poslední řadě i snižování nákladů v přímé úměrnosti k jejich rozšiřování. Důkazem je postupný rozmach domácích větrných elektráren montovaných na obytné domy či v jejich blízkosti.

### 3.2 Motocyklový průmysl

Dříve vysoká cena karbonu řadila tento materiál mezi luxusní položky a do motocyklového průmyslu zasahovala jen v oblasti závodních motorek. V současné době míří i mezi „normální motorky“. Důvodem jsou nové technologie hromadné výroby, které by po letadlech a automobilech mohly přinést revoluci i v konstrukci motocyklů. Rámy, kyvné vidlice, kola, podsedlové rámy, kapoty, to vše by mohlo být z karbonu díky novým technologiím. Až dosud byly karbonové díly příliš drahé, nové výrobní procesy sráží výrobní časy natolik, že karbon začíná být atraktivní alternativou hliníku – a to nejen z hlediska jeho pevnosti a hmotnosti, ale také cenou. Za uplynulých deset let se ceny karbonových vláken zřítily v přepočtu z 6000 na 400 Kč/kg a jejich producenti je chtějí stlačit až na dvě stovky za kilogram. To je sice ještě stále o dost víc než za ocel a hliník, ale karbon je lehčí a pevnější, takže ho je potřeba méně. Navíc karbon umožňuje díky své podstatě vyrábět velké, složité a komplexní díly, které výrazně zkracují montážní časy a tím i náklady.



Foto 3-3 Karbonová motocyklová nádř, zdroj: [Internet]

### 3.3 Automobilový průmysl

Podobný kompozitový boom zažívá v poslední době i automobilový průmysl zejména v oblasti elektromobilů. Například BMW u svých vozidel používá lehkou konstrukci a inovativní materiály, aby se kompenzovala zvýšená hmotnost elektrických komponentů. Skelet



prostoru pro cestující v budoucím modelu BMW i3 je vyroben především z plastů vyztužených uhlíkovými vlákny. Použití tohoto materiálu je v takovém rozsahu sériové výroby automobilů zatím ojedinělé. Používání uhlíkových kompozitů ve velkém měřítku bylo dosud považováno za příliš drahé a neefektivní. Zpracování a výroba byla navíc příliš složitá a nedostatečně flexibilní. Potenciál tohoto materiálu byl rozpoznán po letech intenzivního výzkumu a optimalizace procesů, materiálů, systémů a nástrojů. BMW Group je jediným výrobcem automobilů, který disponuje potřebným know-how pro sériovou průmyslovou výrobu uhlíkových kompozitů. Současná vyspělá úroveň je patrná především na dosažené bezpečnosti procesů, krátkých dobách výrobních cyklů a vysokém standardu kvality vyráběných komponentů. Prvním BMW s množstvím karbonových součástí bude elektrické BMW i3. Tento model nebude mít z karbonu jen povrchové panely, nýbrž i základ šasi. Následovat bude sportovní hybrid i8. I ten nabídne konstrukci z karbonových vláken.



Foto 3-4 Hybridní automobily BMWi3 a BMWi8 s velkým podílem karbonových vláken

Podobným směrem se ubírají i vývojové práce předních světových výrobců automobilů. Firma Mercedes představí svůj „lightweight“ automobil, u kterého vlivem použití uhlíkových vláken počítá se snížením hmotnosti o 350 kg oproti standardnímu modelu. Se snížením hmotnosti půjde ruku v ruce i lepší tuhost celé karoserie. Karbonová konstrukce má totiž ve výsledku vždy vyšší tuhost než v případě využití klasické oceli.

Automobilka General Motors a společnost Teijin Limited oznámily plány na společný vývoj pokročilé technologie zpracování uhlíkových vláken pro použití v budoucích osobních, ale i nákladních automobilech a crossovech. Zatímco použití uhlíkových vláken bylo nebo zatím stále ještě je tématem pro vysoce výkonné a drahé vozy, Teijin vyvinul způsob, jak zajistit masovou produkci uhlíkových částí. Našli způsob jak komponenty z termoplastu vyztuženého uhlíkovými vlákny vyrobit za krátký cyklus méně než jedné minuty. Tím se i výrazně snižují náklady a složitost výroby, která otevírá možnost nabízet lehký materiál i na zcela obyčejné levné vozy.

Nejnovější technologie zpracování uhlíkových vláken se nazývá „kovaný karbonový kompozit“ a nepoužívá obvyklá úhledně zarovnaná vlákna tkaniny, ale jen krátce nasekaná karbonová vlákna smíchaná s pryskyřicí. Tenhle materiál se dá zpracovávat ve vyhřívaných ocelových formách, kde se pryskyřice roztaví a karbon formu vyplní. Přesně a dokonale. Tak přesně, že finální výrobek může být vyrobený s přesností na 0,02 mm. Nejsou třeba žádné extrémní tlaky ani teploty, stačí 55 až 80 stupňů a pouhých 1,5 baru. Součástka je hotová během minut namísto hodin nebo dnů, navíc se tenhle typ karbonu může vrtat jako kov, bez nutnosti zesilovat místa vrtání, což je další z problémů konvenčních karbonových vláken. Tato

technologie se už dnes využívá při výrobě Lamborghini Aventador, odhaduje se, že po doladění této technologie bude možné šasi auta vyrobit za pouhých osm minut. Tím tato technologie pomůže kompenzovat vyšší náklady na materiál. Výsledek bude o 30 % lehčí šasi než celohliníkový zhruba za stejnou cenu. VW plánuje používat „kovaný“ karbon a další vysokorychlostní techniky výroby kompozitů i v normálních autech.

Aplikaci s použitím sklolaminátových kompozitů připravuje k sériovému použití automobilka Audi, konkrétně součást, která je nedílnou součástí automobilů a po desetiletí se vyrábí z oceli - pružiny. Hlavní přínos pružin z kompozitu spočívá jednoznačně z úspory hmotnosti. Zatímco ocelová pružina váží přibližně 2,7 kilogramu, pružina z kompozitu pro stejně velký automobil váží 1,6 kilogramu. Každá ze čtyř pružin tak uspoří 1,1 kilogramu. Ke snížení hmotnosti navíc dochází v rozhodujícím místě podvozku, zvyšuje se preciznost jízdy a komfort odpružení. Nový typ pružiny navíc nepodléhá korozi, nevádí mu dopady odletujících kamenů a je více odolný vůči chemikáliím.



Foto 3-5 Vlevo pružina z kompozitu vyztuženého skelnými vlákny, vpravo klasická ocelová

Jádrem pružiny jsou dlouhá vzájemně stočená skelná vlákna impregnovaná epoxidovou pryskyřicí. V dalším výrobním kroku jsou kolem této jen několik milimetrů tlusté „duše“ strojově navíjena další vlákna střídavě pod úhlem  $+45^\circ$  a  $-45^\circ$  k podélné ose. Jednotlivé vrstvy se při stlačování i roztahování vzájemně dokonale doplňují, takže mohou optimálně pohlcovat působící síly. V poslední fázi výroby je polotovár vytvrzen v peci při teplotách více než  $100^\circ\text{C}$ .

### 3.4 Letecký průmysl

Bezesporu k nejmasivnějšímu rozvoji použití kompozitů, zejména uhlíkových, došlo v leteckém průmyslu. Ten byl veden snahou o snížení hmotnosti se současným zvýšením pevnosti konstrukcí. Počátek využívání kompozitních materiálů v dopravním letectví se datuje ke konci sedmdesátých let minulého století u dopravních letadel McDonnell Douglas 80 a Boeing 757 a dosáhl jistého vrcholu, cca patnácti procentního podílu kompozitních materiálů, kolem roku 1995 vývojem velkokapacitních dálkových letadel Airbus 330, 340 nebo Boeing 777.



Ještě významnějšího podílu kompozitních materiálů bylo dosaženo při vývoji v současné době největšího dopravního letadla Airbus A380. Jedná se o širokotrupý letoun se dvěma palubami, jeho pohon je řešen čtyřmi dvouproudovými motory buď evropské (Rolls-Royce Trent 900) nebo americké (Engine Alliance GP7200) proveniencí. V závislosti na konfiguraci pojme od 525 cestujících do 855 při verzi „economy“ a rozpětí jeho křídel je 79,8 metru. Podíl kompozitních materiálů převážně CFRP je cca 22%.



**Foto 3-6 Dopravní letadlo Airbus A380 a podíl kompozitů na jeho konstrukci**

Také největší konkurent A380, modifikovaný Boeing 747-8. Pod tímto názvem se skrývají dvě nové verze letounu Boeing 747. Verze pro přepravu cestujících je označena jako 747-8 Intercontinental. Oproti stávajícímu letounu Boeing 747-400 bude delší o 3,6 metru a pojme tak o 34 cestujících více. Kapacita letounu v konfiguraci tří cestovních tříd tak bude 450 sedadel. Boeing 747-8 bude mít dolet 14 815 kilometrů, je sice o málo menší než jeho konkurent A380, díky zvýšenému podílu kompozitů na konstrukci spolu s novými úspornými motory GE je však mnohem úspornější. Druhou verzí je nákladní letoun, který je označován jako 747-8 Freighter. Letoun Boeing 747-8F bude o 5,6 metru delší než Boeing 747-400F. Díky tomu pojme na palubu navíc další čtyři kontejnery, přepraví tak o 16% více platícího nákladu než jeho předchůdce. Ve srovnání s nákladní verzí A380 nabídne 747-8F o 20% nižší náklady.



**Foto 3-7 Dopravní letadlo Boeing 747-8 Intercontinental a nákladní Boeing 747-8 Freighter**

Prvním letadlem, kde kompozitní materiály, plasty vyztužené uhlíkovými vlákny, nahradily hliník v konstrukci trupu a křídel je Boeing 787 Dreamliner. To hraje podstatnou roli nejen při snížení váhy letadla (více než o 18 tun oproti podobným letounům), ale také mu dodává větší pevnost a odolnost. Nízká hmotnost společně s aerodynamickým tvarem zapříčinila 20% úsporu paliva oproti jiným srovnatelným strojům. Vylepšení doznaly také motory. Ty jsou dva na každém modelu a pocházejí buďto od společnosti General Electric nebo Rolls-Royce. Motory jsou také méně hlučné a šetrnější k životnímu prostředí. Díky nekorodujícím kompozitům bude mít navíc vzduch uvnitř stroje přirozeně vysokou vlhkost. Podíl kompozitních materiálů převážně typu CFRP je téměř 50% na celkové konstrukci letadla.

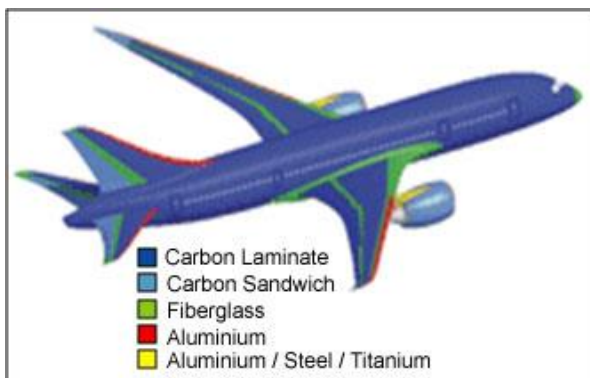


Foto 3-8 Dopravní letadlo Boeing 787 Dreamliner a podíl kompozitů na jeho konstrukci



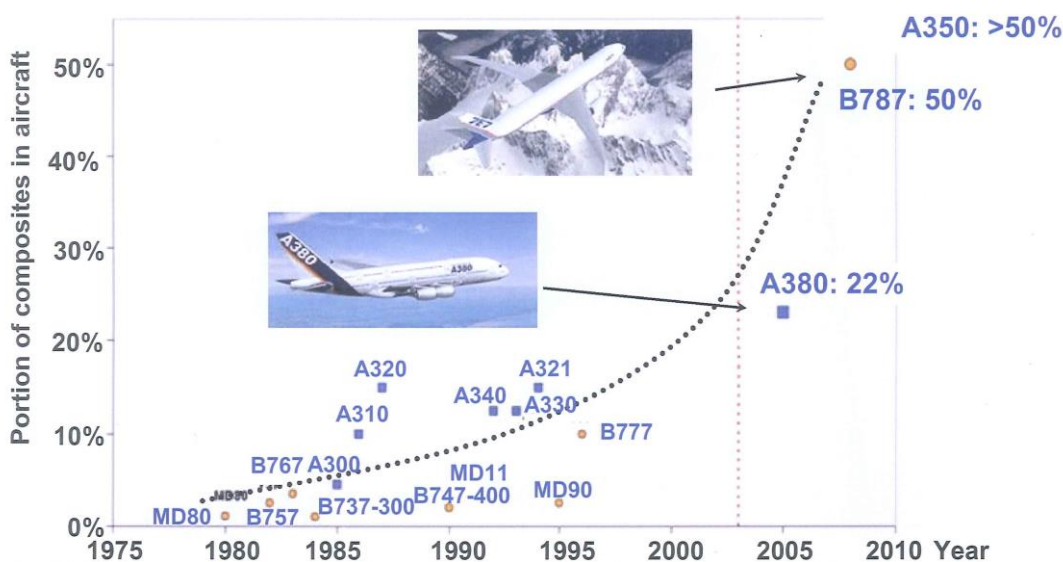
Foto 3-9 Dopravní letadlo Boeing 787 Dreamliner při výrobě a pevnostních testech

V současné době je jedničkou ve využití uhlíkových kompozitů Airbus A350, který vznikl jako odpověď Airbusu na Dreamliner. Airbus A350 XWB je širokotrupý dopravní letoun na dlouhé vzdálenosti vyvíjený společností Airbus. A350 je prvním Airbusem s trupem i křídly vyrobenými především z uhlíkových kompozitů tj. uhlíkových vláken pojených polymerem. Z těchto moderních materiálů, které kombinují uhlíkové kompozity, jich má A350 53%, spolu s titanem a pokročilými hliníkovými slitinami tvoří 70% draku letounu. To přispívá k významné úspoře paliva oproti stávajícím standardům.





Foto 3-10 Dopravní letadlo Airbus A350, - testovací systém



Obr. 3-1 Podíl kompozitních materiálů u dopravních letadel

### 3.5 Železniční průmysl

Odvětvím dopravního průmyslu, ve kterém je využívání kompozitových materiálů v současné době stále na velmi nízké úrovni, jsou železniční dopravní systémy. Tato kapitola je v disertační práci zpracována podrobněji, neboť je předmětem zájmu autora a práce sama je zaměřena na výzkum vybraných vlastností v oblasti kolejových vozidel. Podíl kompozitů je zde, i díky konzervativnosti železniční dopravy, zanedbatelný. Množství vyhlášek, regulačních předpisů, norem a závazných směrnic, jejichž splnění požadují autorizační a homologační národní orgány napříč celým světem, výrazně ztěžuje využití jiných konstrukčních materiálů, než jsou ověřené oceli a slitiny hliníků, technicky dobře probádané a směrnicemi určené minimální vlastnosti konstrukčních dílů a celků z nich vyrobených. Kromě plastů ve formě různých držáků, krytů a krytin se kompozitové materiály i v tomto odvětví ale již „prokousaly“ jako prvky využívané v ergonomii skříní železničních vozidel či jako aktivní části podílející se na snižování aerodynamického odporu železničního vozidla. Tvoří je tvarově velmi

komplikované čelní laminátové skelety, jejichž tvar může splňovat nejnáročnější požadavky na co nejmenší součinitel odporu vozidla.



Obr. 3-11 Čelníky železničního vozidla, dříve a nyní

V poslední době byly zaznamenány pokusy o výraznější využití kompozitových materiálů při konstrukci například hybridní skříň vozidla metra. Hybridní, neboli smíšenou stavbu, jak už sám název naznačuje, je možné definovat takto: každý stavební díl se skládá z jednotlivých stavebních prvků z různých materiálů. Dnešní nové materiály a technologické možnosti přinášejí nové myšlenky a koncepce, které využívají špičkových vlastností nových materiálů, pro jednotlivé prvky a konstrukční celky, aplikovaných v hybridní stavbě skříní. Využití příznivých vlastností různých materiálů pro jednotlivé prvky přináší významné hmotnostní úspory. Hybridní konstrukce skříně spočívá ve využití nových materiálů na konstrukci všech komponent. Pro nosnou konstrukci spodku vozu byl použit materiál o vysoké mezi kluzu 700 MPa.

Bočnicové moduly jsou vytvořeny jako sendvičové kompozitní panely, po obvodu vyztužené ocelovými, dutými, obdélníkovými profily. Ve spodní části byl místo obdélníku použit nerovnoramenný profil U, upravený pro spojení s podélníkem. Sendvič bočnicového kompozitního modulu má celkovou tloušťku 46 mm, vnější i vnitřní potahy ze skelného laminátu tvořené skelnou tkaninou a pojivem z fenolické pryskyřice, mají tloušťku 3 mm. Jádro sendviče je pěnové. Všechny použité materiály mají potřebnou odolnost proti hoření. Okenní otvor je upraven pro lepení okenního skla. Vnitřní plocha sendvičového bočnicového modulu bude mít konečnou povrchovou úpravu, takže odpadá vnitřní obložení a tepelná izolace bočnicového modulu. Pěnové jádro je dostatečnou tepelnou i hlukovou izolací. Kompozitní sendvič je využíván jako nosný prvek.

Střešní moduly jsou vytvořeny jako sendvičové kompozitní panely, které mají potahy ze skelné tkaniny vytvrzené pojivem z fenolické pryskyřice, jádro tvoří nomexová voština. Obvod sendviče byl tvarován s ohledem na vazbu s jednotlivými díly a vhodné spojení s vaznicí. Celková tloušťka sendvičového střešního modulu je 33 mm, vnější potah má tloušťku 2mm, vnitřní 1 mm, zbytek je jádro. Spoje střešních modulů navzájem jsou pouze lepené, také upevnění k vaznici je pouze lepeným spojem.

Na foto 3-12 je naznačen spodek skříně, s podélníkem 1, hlavním příčnicíkem 2 a vlnitou plechovou podlahou 3. Na podélník jsou kombinovaným spojem lepeným a šroubovaným upevněny velké bočnicové moduly 4 a malé bočnicové moduly 5. Na čelníku je upevněn jeden čelní modul z kompozitního sendviče 6, na druhém čelníku je přivařeno ocelové čelo 7.

Ocelová vaznice 8 tvoří základ pro střechu. Je spojena kombinovaným spojem s bočnicovými moduly 4 a 5. Mezi pravou a levou vaznicí se nachází střešní moduly 9. Střešní moduly jsou k vaznici upevněny pouze lepeným spojem. Na koncích střechy jsou střešní moduly 10 a 11, tvarované pro umístění větracího agregátu nebo klimatizace. Na výzkumu vybraných vlastností komponent této hybridní skříň vozidla metra se v rámci projektu FR-TI13/449 autor disertační práce, jako hlavní řešitel tohoto projektu za společnost VZU Plzeň, aktivně podílel.

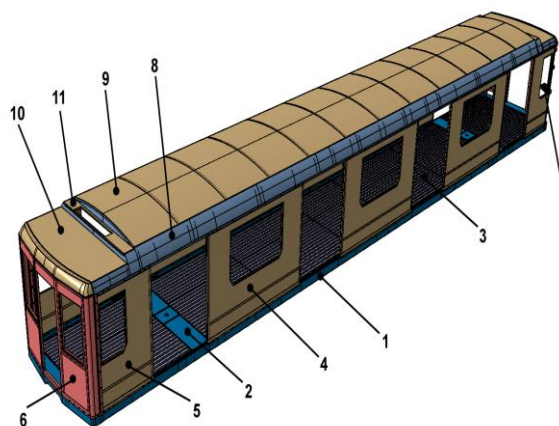


Foto 3-12 Hybridní skříň vozidla metra – složení, zdroj: [projekt MPO TIP: FR-TI3/449]

Další železniční aplikací s využitím GFRP kompozitu je dutý hřídel pro pohon lokomotivního dvojkolí, foto 3-13. Toto technické řešení nachází uplatnění u vozidel pro vysoké rychlosti. Cílem těchto pohonů je snížení velikosti neodpružených hmot. Je zde kladen důraz na co nejmenší měrnou hmotnost při zachování potřebné torzní tuhosti a pevnosti po přenos požadovaného krouticího momentu motoru při akceleraci i brždění na dvojkolí. Významný je i požadavek na minimální elektrickou vodivost. Všechny tyto vlastnosti jsou splněny při použití GFRP kompozitu vyrobené metodou navinování jednotlivých vrstev v různých úhlech. Rozsáhlé únavové testy prokázaly, že provozní namáhání lze spolehlivě přenést pomocí takto zkonstruovaných dutých hřídelů poměrně slabé vrstvy. Autor disertační se podílel na experimentálním výzkumu tohoto konstrukčního řešení pohonu lokomotivního dvojkolí.

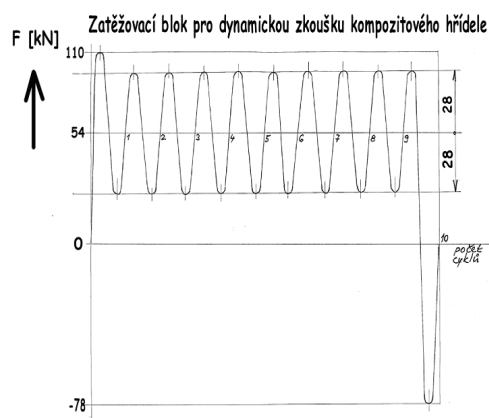


Foto 3-13 Dutý kompozitní GFRP hřídel – průběh zatížení



V souladu s moderními trendy i požadavky na provoz na železnicích vzniká významný tlak na konstrukci železničních vozidel hmotnostně optimalizovaných tak, aby železniční svršek nebyl nadměrně poškozován. Čím lehčí je železniční vozidlo, tím více může uvést nákladu či cestujících. K poškození tratí nedochází pouze vlastní hmotností vozidla, které se v Evropských zemích ustálilo na 22,5t na nápravu, ale zejména dynamickými účinky těchto hmotností. Ty následně nepoškozují pouze vlastní tratě, ale svoje negativní účinky uplatňují na životní prostředí jako celek – zvýšené generace vibrací, hluku, to má svůj dopad na pasažéry, snižuje se cestovní hygiena, pohodlí, v neposlední řadě se zvyšují náklady na provoz vlakových souprav a následně i železničních tratí. Největším zdrojem poškození železničního svršku jsou kromě vlastní hmotnosti vozidla také dynamické vlastnosti odpružených a neodpružených hmot jeho podvozku. Jízdní vlastnosti určuje zejména tuhost podvozkového rámu a jeho vypružení, dodnes vyráběných z klasických ocelových materiálů. Pro celkové zlepšení je tedy i na železnici třeba hledat účinná konstrukční řešení včetně použití moderních materiálů, které svými vlastnostmi přispějí k eliminaci negativních jevů vznikajících při provozu železničních vozidel.

### 3.5.1 Kolejová vozidla

Výhod malého valivého odporu při odvalování ocelového kola po ocelové kolejnici, a tedy i malých nákladů na pohon takto se pohybujícího vozidla, začali na prahu 19. století poprvé využívat majitelé důlních společností k dopravě uhlí ze svých dolů do přístavů k dalšímu převozu do cílových destinací. Koňské potahy byly nahrazeny prvními parovozy. Porodní bolesti tohoto převratného způsobu dopravy zahrnovaly počáteční velkou hmotnost parovozů, pod kterými se chatrné litinové koleje, konstruované na koňský potah, bortily. Na druhé straně překotná snaha o snížení hmotnosti parovozů vedla k malé adhezi a tedy prokluzům trakčních kol po kolejnici a tyto jednotky byly fakticky neschopné provozu. Výraznější rozvoj železnice byl odstartován stavbou železné dráhy se zvýšenou pevností kolejnic, které unesly i první těžší parní lokomotivy. Rozmachu nové, velice efektivní formy dopravy už nic nebránilo.

Současná železnice je střídavě vytlačována osobní a nákladní automobilovou dopravou, využívající vysokého rozvoje vozidlového parku i husté dálniční a silniční sítě. Jedná se o velmi pružný typ dopravy, který ale vlivem hustého provozu často končí jeho kolapsem, zejména v důsledku individuálních nehod. Naproti tomu pružnost železniční dopravy je brzděna vysokým podílem regulace, standardizace, specifických vyhlášek a podmínek, které musí být výrobcí kolejových vozidel i jejími provozovateli splněny. Pomalé a nepružné schvalování těchto „drážních“ předpisů vede také k velmi těžkému prosazování nových konstrukčních materiálů na vysoce namáhané funkční díly kolejových vozidel. Podobně silnou regulaci zažívá i letecký průmysl, tam je však snižování hmotnosti použitím lehčených vysoce pevných konstrukčních materiálů osudově nevyhnutné.

#### 3.5.1.1 Nákladní kolejová vozidla

Železniční nákladní doprava je využívána zejména pro přepravu velkých objemů nákladu na větší vzdálenosti, významný podíl mají sypké a kapalné látky a tomu jsou uzpůsobeny i konstrukce nákladních vagónů. K jejich výrobě je nejčastěji používána ocel případně hliníkové slitiny pro stavbu skříní vagónů. Zastoupení kompozitních materiálů pro tuto skupinu dopravních prostředků je minimální a to i v oblasti podvozků a vypružení. To bývá tvořeno

ocelovými pružnicemi případně šroubovými pružinami. Podle typu evropské nebo americké koncepce bývá vynecháno prvotní či druhotné vypružení. S přibývajícím provozními hodinami i přes údržbu dochází ke korozi pružnic a pružin a jejich pružící schopnost je snižována. Působí pak velmi nepřátelsky na kolejový svršek, který za vzniku nadměrného hluku poškozují. Při synergii s opotřebením kol má provoz takovýchto jednotek zásadní dopad na infrastrukturu a životní prostředí. Výjimku tvoří například podvozek s označením TF25, viz foto 3-14, jehož odlévané díly jsou propojeny pružnými spojovacími prvky, primární vypružení tvoří kyvná ramena s vinutými pružinami a sekundární vypružení je realizováno pryžo-kovovými bloky s velkou vertikální tuhostí a poddajností v příčném směru. Laboratorní testy prokázaly příznivé vlastnosti a nižší dynamické účinky na infrastrukturu. S ohledem na poměrně jednoduchou konstrukci má využití kompozitních materiálů pro tuto skupinu vozidel velký potenciál pro budoucnost. Autor disertační práce zajišťoval experimentální výzkum tohoto podvozku.



Foto 3-14 „Track friendly“ podvozek a jeho testování

### 3.5.1.4 Osobní vozy

Ani v oblasti osobních vozů pro dálkovou přepravu osob zatím nedošlo k výraznému rozšíření kompozitních materiálů. K jejich využití dochází pouze v interiérech vozidel při konstrukci WC, umývárén či zásobníků vody.



Foto 3-15 Osobní vozy, zdroj: [Internet]

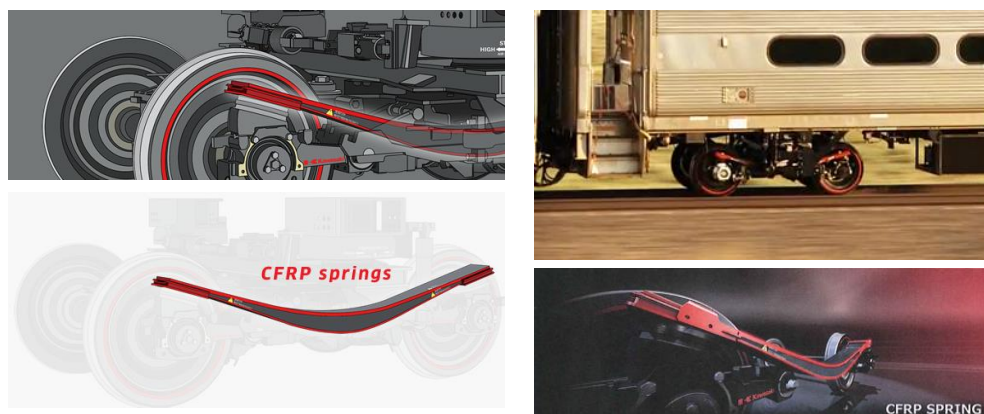


Foto 3-16 Využití CFRP u podvozku osobního vozu, zdroj: [Internet]

Jedním z prvních průkopníků významnějšího využití kompozitů v konstrukci osobních vozů je firma Kawasaki, která nahradila ocelové podélníky stávající koncepce klasického podvozku kompozitem typu CFRP s vysokou pevností a nízkou hmotností, foto 3-16. Využitím typických vlastností CFRP došlo u takto exponovaného dílu podvozku k významné redukci hmotnosti, zvýšení jízdního komfortu, úspoře provozních nákladů a výrazného snížení silových účinků vlaku na infrastrukturu, což prokázaly i jízdní testy na trati TTCI v Colorado, USA.

### 3.5.1.5 Tramvaje a lehká vozidla (metro)

Procento zastoupení kompozitových materiálů se zvyšuje také u lehkých kolejových vozidel typu tramvají a metra. Snaha po aerodynamickém a moderním tvaru karosérií při současném trendu na snižování hmotnosti vede k použití kompozitních materiálů pro díly, které by „normálním“ konvenčním technologickým způsobem nebyly vyrobitelné. K širokému použití kompozitních materiálů, zejména skelných laminátů, dochází u čelníků vozidel. Pokud nejsou spolunosnou součástí skříňe, jsou obvykle jednovrstvé, tloušťky kolem 4 mm laminované do formy, která vznikne stažením z modelu. Výroba například dřevěného modelu je poměrně drahá, výsledkem je však elegantní výrobek konečného tvaru bez nutnosti jeho další úpravy či obrábění. Na foto 3-17 jsou ukázány příklady lehkých kolejových vozidel – tramvaj 15T a metro Taipei. Fotografie dokumentují také experimentální výzkum podvozkových rámu těchto vozidel, které autor disertační práce v rámci komerčních zakázek zajišťoval.

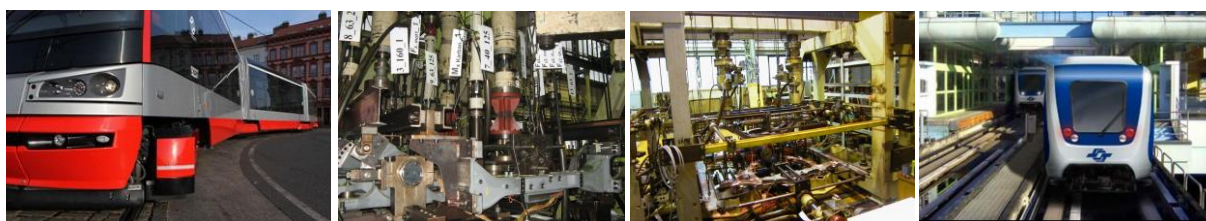


Foto 3-17 Lehká kolejová vozidla

### 3.5.1.5 Lokomotivy

Elektrické a Diesel lokomotivy jsou poslední době využívány převážně u nákladních vlaků za účelem převozu velkého množství materiálu typu uhlí, sypké látky, kapaliny, případně automobily a ostatní náklady. Rozvoj kompozitních materiálů typu GFRP a CFRP, při konstrukci těchto hnacích vozidel, není vynucován potřebou a zásadní redukcí hmotnosti s ohledem na potřebnou adhezi dvojkolí při tažení velkého počtu naložených vagonů.



Foto 3-18 Elektrické lokomotivy



Foto 3-19 Diesel lokomotivy



Pro některé vysoce namáhané lokomotivní prvky, jako například pohony kol, jsou i v téhle oblasti hledány vhodné kompozitní materiály schopné přenášet velké výkony motorů přes převodovky na dvojkolí. Příkladem je GFRP dutý hřídel pro přenos krouticího momentu tří-systémové lokomotivy ŠKODA 109E. Je vyroben ze skelného sklolaminátu metodou



navíjení skelných vláken za současného prosycování pryskyřicí. Při zachování vysoké pevnosti svojí nízkou hmotností snižuje velikost neodpružených hmot podvozku, což výrazně přispívá k jeho dynamickým vlastnostem. Použití skelného laminátu navíc zamezuje přenosu bludného elektrického proudu do dvojkolí a nedochází k elektro magnetickému rušení traťových zabezpečovacích systémů. Na foto 3-18 je uvedena tří-systémová čtyřnápravová lokomotiva ŠKODA 109E, na foto 3-19 šestnápravová diesel lokomotiva GE. Obě lokomotivy jsou zobrazeny i s fotografiemi rozsáhlého experimentálního výzkumu pevnostních vlastností při statickém i únavovém zatěžování jejich podvozkových rámu. Tento výzkum byl v rámci komerčních zakázek řešen autorem této disertační práce.

### 3.5.1.6 Příměstské jednotky a regionální vlaky

S rozvojem pohonných jednotek a možnostmi jejich účinné regulace je regionální a příměstská osobní železniční doprava převážně zabezpečována několika článkovými elektrickými nebo diesel jednotkami s jedním nebo více trakčními podvozky. Trakce těchto vozidel bývá rozložena na víc míst a svislé adhezni síly mohou být menší. Redukce hmotnosti využitím lehkých slitin a v poslední době zejména CFRP a GFRP kompozitů při stavbě těchto vozidel snižuje výrobní i provozní dopravní náklady. Využití těchto moderních konstrukčních materiálů pocítují jak interiér (podlahy, stropy, přepážky, nosiče zavazadel, obložení, kabinové přístrojové palubní desky, tak i exteriér vozidla (panelové stěny, okenní rámy, potahy sedvičů, čelníky vozidel). Tam, kde je kompozitní díl spolu nosnou součástí skříně vozidla, používá se obvykle kompozitový sendvič. Tato konstrukce vyniká zvýšením příčné tuhosti tenkých plechů nebo laminátů ve vzpěru a smyku. Plech nebo laminát malé tloušťky při stlačování silou vybočuje, stejně zatížený sendvič se dvěma potahy poloviční tloušťky ne. Potahy přitom přenášejí tahové a tlakové síly, jádro s nízkou hmotností přenáší smykové síly mezi potahy. Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině jeho tloušťky. Nárůst hmotnosti takového sendvičového panelu je přitom, vzhledem k nízké měrné hmotnosti jádra například z lehčeného polyuretanu (cca 80kg/m<sup>3</sup>), velmi malý. Smyková pevnost jádra roste s jeho hustotou, což je důležité při dimenzování sendviče. O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhodují pevnost jádra v tlaku a tloušťka potahů. Voštinové jádro má lepší mechanické vlastnosti než pěnové jádro stejné měrné hmotnosti.



Foto 3-20 DMU



Foto 3-21 EMU

### 3.5.1.7 Rychlovlaky

Podobný rozsah využití kompozitů mají i moderní dálkové rychlovlaky. Trakce je u nich přenášena hnacími podvozky, které jsou umístěny pod každým vagonem jednotky. Významná redukce hmotnosti vozidla tak nesnižuje zásadně adhezi mezi dvojkolím rychlovlaku a tratí. Při

provozu těchto jednotek dochází vlivem nižší hmotnosti k velké redukci provozních nákladů při stejném trakčním výkonu vozidla.



Foto 3-22 Rychlovlaky

### 3.5.1.8 Monorail, bezpilotní vlaky

Největší podíl kompozitních materiálů v oblasti kolejových vozidel je v současné době patrný na speciálních vozidlech typu monorailů a bezpilotních vlaků, viz foto 3-23, které zabezpečují osobní dopravu na letištích a bezdopravních zónách velkých měst s velkou hustou přesunu cestujících, obvykle turistů. Jejich lehká konstrukce, v důsledku požití vysocepevnostních, vláknou vyztužených kompozitů, umožňuje jejich provoz na vysutých tratích nad úroveň ostatních komunikací a nedochází k omezování ostatních pěších turistů.



Foto 3-23 Monoraily

## 4 Klasické konstrukční materiály kolejových vozidel

Železniční vozidlo je komplexní výrobek s celou řadou různých materiálů. Konstrukční materiál je zde použit na dvou hlavních komponentách, kterými jsou skříň vozidla a podvozkový rám.

Pro diferenciální ocelovou stavbu skříně jsou nejčastěji používány standardní ocele s mezí pevnosti 370-450 MPa RSt 37-2, případně St 52-3 podle ČSN EN 10025-2 s mezí pevnosti 480-620 MPa. Pro hliníkové integrální stavby skříně se nejčastěji používají integrované protlačované profily AlMgSi0.7, vnější oplechování AlMgSi0.5 a příčné střešní profily AlZn4.5Mg1. Nejčastější technologií spojování jednotlivých dílů konstrukce je svařování. Vlivem tohoto tepelného procesu dochází zejména u slitin hliníku k významné degradaci dovoleného napětí po svaření. Z nekovových materiálů se pro tvarově složité díly, jako jsou například čela skříně, používají skelné lamináty. Pokud nejsou spolunosnou součástí

skříně, jsou obvykle jednovrstvé, tloušťky kolem 4 mm, laminované do formy. Pokud je kompozitní díl spolu nosnou součástí skříně, používá se obvykle kompozitní sendvič.

Rám podvozku je dynamicky namáhaná konstrukce, u které je rozhodujícím kritériem odolnost proti únavovému porušování i při nízkých teplotách. V současné době se pro jejich konstrukci používá ocel 11 449, případně ocel typu S355J2G nebo S355J2G1W dle EN 10 025. Rámy podvozků jsou složité, dynamicky namáhané konstrukce. Podle způsobu výroby je lze rozdělit na odlévané a svařované.

Odlévané rámy podvozků se častěji užívají u podvozků nákladních vozů, zejména typu Diamond nebo TF25, případně u lokomotivních podvozků tam, kde není nutné dbát na nízkou hmotnost. Jsou s výhodou používány u velkosériové výroby, kdy je velký počet kusů optimální pro využití modelů pro odlévání. Předností tohoto typu výroby je nižší pracnost. Svařované rámy podvozků se využívají mnohem častěji. Ke svaření lze použít plechy různých tlouštěk tak, jak to vyžaduje pevnostní dimenzování. Tím se dosahuje optimálně nízké hmotnosti, což bývá u většiny vozidel důležité. Značnou nevýhodou je vnesení vnitřního pnutí do konstrukce při procesu svařování, což vyžaduje další přídatné výrobní operace v podobě žihání na odstranění vnitřního pnutí.

## 5 Vypružení kolejových vozidel

Vypružení spolu s tuhostí podvozkových rámu má významný podíl na výsledných dynamických účincích vozidla na traťový svršek a spolu definují jízdní komfort. U kolejových vozidel se vypružení aplikuje ve všech třech osách, tj. v podélné x, příčné y a svislé z. Cílem vypružení je:

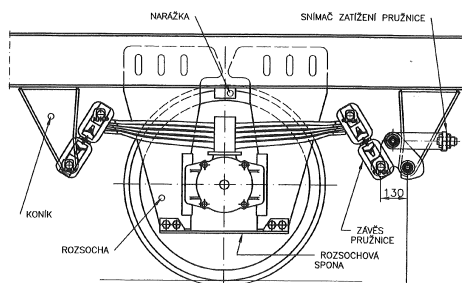
- zajistit rovnoměrné zatížení všech kol vozidla
- snižovat dynamické účinky ve stycích kol s kolejnicemi
- snižovat účinky nerovností koleje na cestující, náklad apod.
- snižovat dynamické účinky mezi vozidly při rozjezdech a brždění
- udržovat výšku nárazníků nebo automatických spřáhel ve stanovených hodnotách

Celou soustavu vypružení kolejového vozidla tvoří vedle hlavních prvků pružení (pružiny a tlumič) také závěsky a různé pružné prvky v uložení čepů apod. Kalkulovat je nutno také s třením ve vedeních pohybujících se vypružených dílů. Hlavními pružícími elementy mohou být pružnice, šroubové pružiny a pryžo-kovové elementy. Podvozky osobních, motorových a elektrických vozů i lokomotiv mají dvojitě vypružení. Primární vypružení se nachází mezi ložiskovou skříní a rámem podvozku, sekundární mezi rámem podvozku a skříní vozidla. Zde se často uplatňuje vzduchové vypružení.

### 5.1 Vypružení pružnicemi

V současné době se za účelem vypružení skříně vozu nebo podvozku používají ocelové pružnice parabolické obvykle pětistové. Jejich montáž do vozidla, tj. mezi dvojkolí a skříní případně podvozek, je provedena pomocí závěsů. Tlumení, potřebné pro zajištění dobrých jízdních vlastností vozidla, je realizováno třením mezi jednotlivými listy pružnice, viz obr. 5-1. Nevýhodou tohoto typu vypružení je zejména velká hmotnost pružnic, které přispívá ke zvýšení neodpružených hmot vozidla. Tlumení vozidla není stabilní, protože se vlivem koroze jednotlivých ocelových listů pružnice zvyšuje koeficient tření. V případě, že je zanedbána

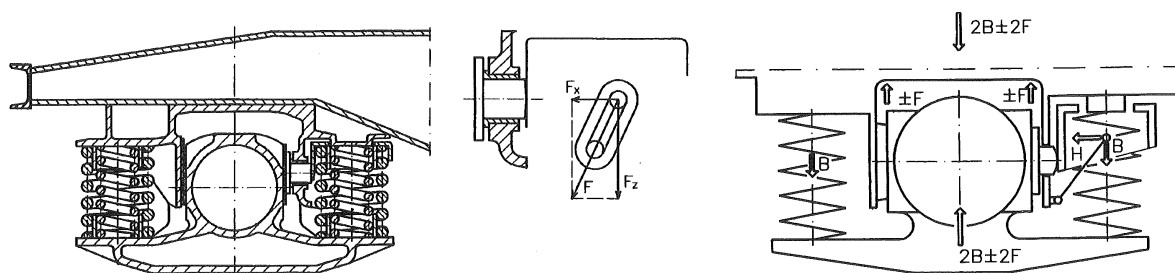
údržba, hrozí jejich úplné „zamrznutí“ a vypružení vozidla není efektivní. Vznikající dynamické rázy potom nadměrně opotřebovávají jednak prvky vozidla, tak i kolejový svršek. Řešením těchto problémů je v použití šroubových pružin, nebo pro železnici revoluční cesta při požití skelných kompozitů na bázi GFRP, které ke zlepšení jízdních vlastností mohou přispět i snížením neodpružených hmot.



Obr. 5-1 Ocelová pětistavová parabolická pružnice

## 5.2 Vypružení šroubovitými pružinami

Při použití ocelových šroubovitých pružin v primárním vypružení kolejového vozidla se snižují neodpružené hmoty, neboť hmotnost šroubových pružin je nižší než pružnic. Vypružení bývá realizováno pomocí dvojic šroubovitých pružin, umístěných po stranách ložiskové skříně, viz obr. 5-2. Tlumení může být zabezpečeno například tak, že u jedné z dvojitých šroubovitých pružin, bližší středu podvozku, je vytvořeno třecí tlumení, a to mezi stykovou plochou ložiskové skříně a rozsochy. Potřebný přítlak obstarává volný opěrný talíř, který působí na přítlačný kotouč třecí plochy přilehlé rozsochy. Vodorovný přítlak  $H$  tohoto opěrného talíře je vyvolán svislým zatížením rámu podvozku, který je na zmíněném volném talíři zavěšen pomocí skloněných závěsek. Pro osobní vozy a vyšší provozní rychlosti se k zabezpečení potřebných jízdních vlastností častěji používá dvojice doprovodných hydraulických tlumičů, svislý a příčný. Rovněž tento typ vypružení vybízí k náhradě sklolaminátovými kompozitními GFRP pružinami.

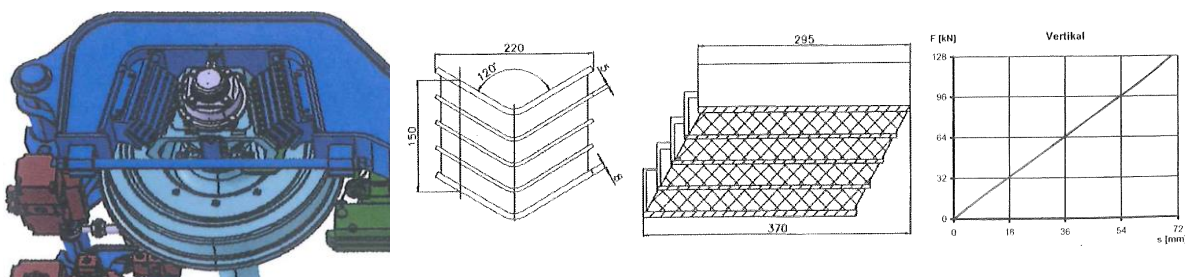


Obr. 5-2 Ocelové šroubovitě pružiny

## 5.3 Vypružení s pryžo-kovovými bloky

Předností toho řešení vypružení je jednoduchá konstrukce, která spojuje do jednoho prvku vedení dvojkolí i pružení, viz obr 5-3. Využívá se opačných vlastností gumy, tj. dobré

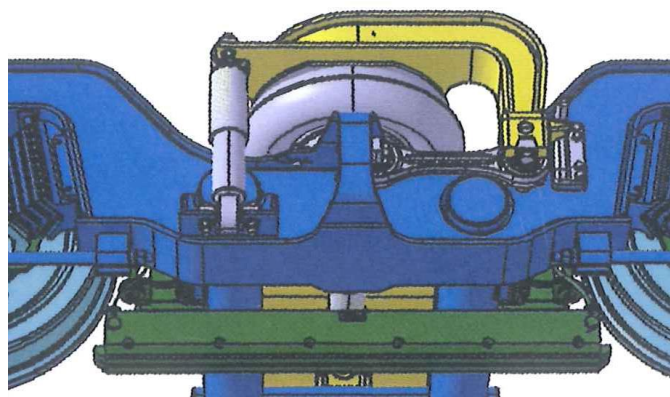
tlumení ale nedostatečná tuhost, v kombinaci s ocelovými prvky vzniklá vypružení přijatelných vlastností. Tyto pružiny jsou ve svislém i příčném směru namáhány kombinací smyk + tlak. Tvrdostí, tloušťkou pryže a zejména sklonem bloků a „střechy“ lze dimenzovat tuhosti ve všech směrech zatěžování, podobně jako lze dynamické vlastnosti optimalizovat při použití sklolaminátového GFRP kompozitu. Nevýhodou vypružení s pryž-kovovými bloky je stárnutí a postupné sedání pryže, které má za následek postupnou ztrátu pružnosti a její tvrdnutí. Toto nepříznivé vlastnosti u GFRP kompozitů nejsou pozorovány.



Obr. 5-3 Vypružení pryžo-kovovými bloky a jeho charakteristika

## 5.4 Pneumatické vypružení

Vzduchové pružiny jsou využívány zejména u sekundárního vypružení, obr. 5-4. Tam, kde je mezi rámem a skříní vozidla použita kolébka, jsou pro sekundární vypružení používány převážně šroubovitě pružiny. Předností sekundárního vypružení s kolébkou je jednoduchá konstrukce rámu podvozku s podélníky, které mají jednu z pásnic rovnou, příčníky jsou také rovné a prismatické, což usnadňuje výrobu. Použití kolébkou vede ke kvalitě chodu při vyšších rychlostech. Nevýhodou je složitější konstrukce zavěšení nosiče vypružení a kolébkou a také vyšší hmotnost celého sekundární vypružení. Tyto nedostatky odstraňuje koncepce podvozku bez kolébkou, má nižší hmotnost ale tvarově komplikovanější rám, zejména prohnuté podélníky rámu podvozku, což přináší vyšší nároky na opracování jednotlivých dílů rámu i na kvalitu svařování. Pro sekundární vypružení této koncepce jsou využívány pryžové bloky nebo pneumatické pružiny. Pneumatické pružiny umožňují natačení podvozku v obloucích, změnou tlaku v měchu zajišťují konstantní výšku podlahy od temene kolejnice.



Obr. 5-4 Pneumatické vypružení



## 5.5 Netradiční formy vypružení

Za účelem snížení hmotnosti neodpružených hmot a zvýšením jízdního komfortu osobních vozů pro kolejovou dopravu začínají výrobci využívat pružně tlumící prvky, například slisované pružné dráty tvořící zónu mezi ocelovou obrouč dvojkolí a jeho nábojem, viz foto 5-1.

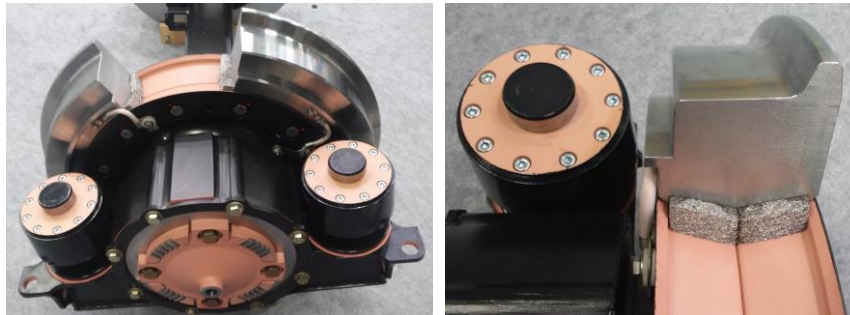


Foto 5-1 Netradiční formy vypružení

Jednou z možností snižování neodpružených hmot je nahrazení ocelového vnějšího ložiskového kroužku lehčím kompozitovým. Ložisková skříň je rozdělena a mezi vnější a vnitřní ložiskový kroužek je vložena tlumící guma, foto 5-2.

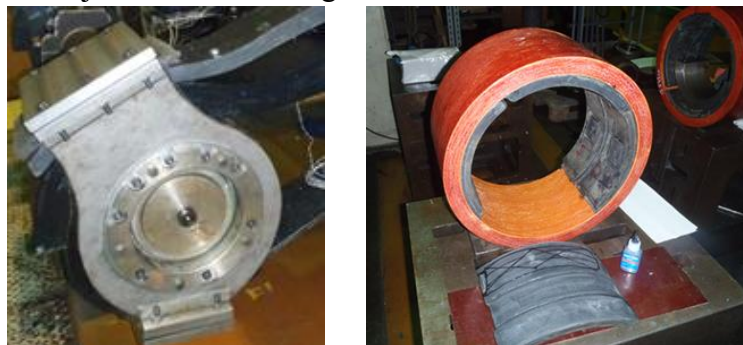


Foto 5-2 Kompozitový vnější ložiskový kroužek

Lisované drátěné materiály začínají být používány pro také primární vypružení podvozků, viz foto 5-3.



Foto 5-3 Nekonvenční primární vypružení

## 5.6 Kompozitové GFRP pružnice

Sklem vyztužené plasty kombinují vysokou pevnost, vnitřní tlumení a deformaci do selhání s malou hmotností a dobrou odolností proti korozi, foto 5-4. Jejich anizotropní elastické vlastnosti umožňují tomuto vypružení, aby bylo navrženo jako tuhé pro vertikální směr, ale torzně měkké. Mají vysoký potenciál pro budoucí využití.



Foto 5-4 Kompozitové pružnice

## 6 Kompozitní materiály

Kompozity se skládají z jedné nebo více nespojitých fází (obvykle tvrdších a pevnějších) a fáze spojitě. Nespojitá fáze se nazývá vyztužení, spojitá fáze se označuje jako matrice. Výsledné vlastnosti kompozitního materiálu závisí na vlastnostech rozložení a vzájemném ovlivňování jeho složek. Některé vlastnosti jsou dány objemovým podílem složek a vycházejí přímo z vlastností fází, kompozit má však i vlastnosti, které nelze vysvětlit pouhým součtem vlastností složek, ale závisí na vzájemné interakci fází a jejich geometrickém rozložení.

Nejvýznamnějším ukazatelem, od něhož se derivují vlastnosti kompozitu, patří koncentrace. Udává se v hmotnostním nebo objemovém podílu. Ovlivňuje podíl jednotlivých složek na výsledných vlastnostech kompozitu. Pomocí koncentrace, lze snadno určovat vlastnosti materiálu při jeho výrobě. Mezi důležité faktory ovlivňující chování kompozitu patří také tvar nespojitě fáze. Nejčastěji jde o kouli nebo válec, vyskytuje se však i tvar hranolu případně destičky. Tvar nespojitě fáze má značný vliv na velikost stykové plochy mezi matricí a vyztužovacím materiálem. U kompozitů dále sledujeme například homogenitu, která má vliv na vytváření slabých míst v materiálu. Nehomogenita je v materiálu nežádoucí, protože jeho celkové parametry jsou pak určeny vždy podle nejnevýhodnějšího místa v kompozitu. Dalším parametrem kompozitních materiálů je orientace vyztužení. Má vliv na izotropii materiálu. Jde-li o kompozit vyztužený rovnoosými (nejčastěji kulovými) částicemi, můžeme jej považovat za izotropní stejně jako kompozit vyztužený krátkými vlákny s náhodnou orientací. Jeho vlastnosti jsou pak nezávislé na směru. V ostatních případech vzniká v materiálu anizotropie a jeho vlastnosti jsou v různých směrech značně rozdílné. Anizotropie může být způsobena buď velkou délkou vláken, nebo např. směrem tečení při odlévání. Záleží na požadavcích na kompozit, zda je vhodnější materiál izotropní nebo anizotropní.

## 6.1 Vlastnosti plastů a kompozitů

Plasty a kompozity splňují následující soubor vlastností:

- pevnost a modul pružnosti přibližující se kovovým materiálům
- odolnost proti únavě lepší než u kovů
- vysokou rázovou a vrubovou houževnatost a odolnost proti šíření trhlin
- vysokou teplotní odolnost (vysokou teplotu skelného přechodu nebo tání)
- schopnost tlumení vibrací
- balistické vlastnosti
- nehořlavost
- bariérové vlastnosti
- kvalitu povrchu třídy A, výrobu komponent, které nevyžadují lakování
- nízkou, případně nulovou teplotní roztažnost
- korozní odolnost proti vysoce agresivnímu prostředí
- recyklovatelnost

U moderních strojírenských výrobků jsou často požadovány takové kombinace vlastností, kterých nelze pomocí kovových materiálů vůbec dosáhnout. K těmto požadavkům přistupují nároky na zpracovatelské technologie, např. rychlost výroby, kombinace materiálů (plasty, kompozity a kovy, možnost výroby integrovaných modulů s kovovými základy apod.).

## 6.2 Dlouhovláknové kompozity

Špičkových hodnot mechanických vlastností lze dosáhnout pouze u struktur s dlouhovláknovou výztuží v různé formě (rovingy, rohože, tkaniny). Největším přínosem pro oblast kompozitů jsou z mechanického hlediska uhlíková vlákna (mají nejširší spektrum mechanických vlastností), kromě toho jejich cena stále klesá a po technicko-ekonomické stránce se tak stávají vedle skleněných vláken stále žádanějším vyztužujícím materiálem. Strojírenské aplikace s mimořádnými požadavky na mechanické vlastnosti při nízké hustotě jsou ovšem založeny výhradně na uhlíkových kompozitech (letecké aplikace, chassi automobilů, hnací hřídele apod.). Z matric jsou nejpoužívanější nenasyčené polyesterové pryskyřice, vinylesterové pryskyřice pro antikorozi aplikace (oboje v kombinaci se skleněnými vlákny) a epoxidy (s uhlíkovými vlákny). Ačkoliv náročnější aplikace jsou většinou řešeny z mechanického hlediska použitím kompozitu na bázi epoxy-uhlík, z kompozitu polyester-sklo jsou vyvíjeny rovněž vysoce namáhané díly, jako např. pružnice železničních vagonů a těžkých nákladních automobilů. Jedním z novějších vývojových směrů jsou kompozity s trojrozměrnou výztuží. Při mechanickém namáhání se tím zabráňuje delaminačním procesům, ke kterým může docházet u běžně používaných výztuží plošných. U reaktoplastových matric je nutno řešit řadu problémů souvisejících se smáčivostí vláken pryskyřicí, reakční rychlostí vytvrzování, skladovatelností prepregů, smrštěním při reakci, vedlejšími reakčními produkty apod. V oblasti dlouhovláknových kompozitů byla vyvinuta a dále je vyvíjena řada nových technologií. Jako perspektivní se např. ukazují metody SMC (sheet moulding compound) a RTM (resin transfer moulding).



## 6.2.1 Materiály matric

### 6.2.1.1 Polyestery

Nenasycené polyestery jsou nejčastěji používanou matricí pro vyztužené plasty zvláště v kombinaci se skelnou výztuží. Polyesterové pryskyřice mají dobré mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Polyestery jsou dobré do slabě kyselého prostředí.

### 6.2.1.2 Methyl-methakryláty

Modifikované methyl-methakrylátové pryskyřice mají vynikající vlastnosti a jsou nejčastěji používány v kombinaci s vysoce kvalitní výztuží, jako jsou karbonová vlákna. Tyto pryskyřice je možné naplnit retardéry hoření, čímž přináší vynikající řešení pro aplikace, kde je požadována ohnivzdornost výrobku.

### 6.2.1.3 Epoxidy

Epoxidy mají vynikající mechanické a elektrické vlastnosti a jsou běžně používány s kvalitními výztužemi, např. s uhlíkovými nebo skelnými vlákny, pokud je podíl výztuže velmi vysoký. Mají dobré elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot, cenná je i jejich značná odolnost proti vodě, roztokům alkálií i kyselin a některým rozpouštědlům.

### 6.2.1.4 Vinylestery

Vinylesterové pryskyřice kombinují nejlepší charakteristiky polyesterových a epoxidových pryskyřic. Vinylestery mají dobrou odolnost v kyselém i alkalickém prostředí, zvláště ve vysokých teplotách. Skelným vláknem vyztužené vinylesterové profily mají dobrou elektrickou a tepelnou izolaci. Na epoxidech založené vinylesterové pryskyřice mají dobrou chemickou odolnost ve zvýšených teplotách. Maximální doporučená provozní teplota je 90-150°C.

## 6.2.2 Vyztužovací skelná vlákna

Mezi hlavní vlastnosti skelných vláken, která jsou v poslední době využívána pro konstrukce železniční aplikace, patří zejména:

- lehké (o 75 % lehčí než ocel, a o 30 % lehčí než hliník)
- vynikající měrná pevnost
- vynikající specifická tuhost
- nízký koeficient tepelné expanze
- tepelný izolátor
- nemagnetické
- chemicky odolné
- nízké náklady na údržbu
- odolné proti počasí

## 6.2.3 Technologie výroby

### 6.2.3.1 Ruční laminace – spray up

Nejběžnějším postupem výroby krátko-vláknových kompozitů je otevřená laminace, prováděná buď metodou spray up nebo jako ruční laminace. Dále se při výrobě používá technologie RTM (Resin Transfer Moulding – přenos pryskyřice hnětením), tlakové tváření, vstřikování nebo například odstředivkové lití. Otevřená laminace se provádí v otevřených formách. Proces staruje navoskováním formy, do které se potom nanese gelcoat (pryskyřice sloužící k ochraně povrchu). Gelcoat se poté vytvrzuje ve vyhřívané peci. Při výrobě laminátů ruční laminací se do formy ručně aplikuje skelná rohož, na níž se pomocí štětců nanáší pryskyřice. Vrstvy je nutno vyválet, aby došlo k prosycení a spojení laminátu. Při požití metody spray up se do formy po vytvrzení gelcoatu stříká pryskyřice a zároveň sekané skelné vlákno. Nástřik se provádí speciální pistolí, která současně naseká skelné vlákno, smíchá ho s pryskyřicí a vhání vzniklou směs do formy. Při použití technologie spray up se dosahuje objemový podíl vláken přibližně 15%, při použití ruční laminace je tato hodnota vyšší, až 35%. Velkou výhodou metod otevřené laminace je jejich nízká cena, typickými výrobky této technologie jsou vany, sprchy nebo součásti rekreačních vozidel.

### 6.2.3.2 RTM

Při výrobě kompozitů metodou RTM (Resin Transfer Moulding – formování pryskyřice přetlakem) se do obou polovin formy nanese gelcoat a pokládají se sekané rohože, případně i jádro. Potom se do formy začne pod tlakem vhánět pryskyřice, viz foto 6-1. Když je forma pryskyřicí zcela naplněna, je třeba ji vytvrdit. Výhodou této technologie je například použití sklolaminátových nebo galvanizovaných forem, v nichž je možné vyrobit až několik desítek tisíc kusů, což pořizovací cenu formy významně snižuje. Vytvrzovací proces je vhodné regulovat vhodnými systémy ochlazování, aby se při exotermické reakci předešlo vzniku bublin vzniklých vysokou teplotou při vypařování složek matrice. Dále je výhodné, že lze regulovat tok pryskyřice a proces vytvrzování.

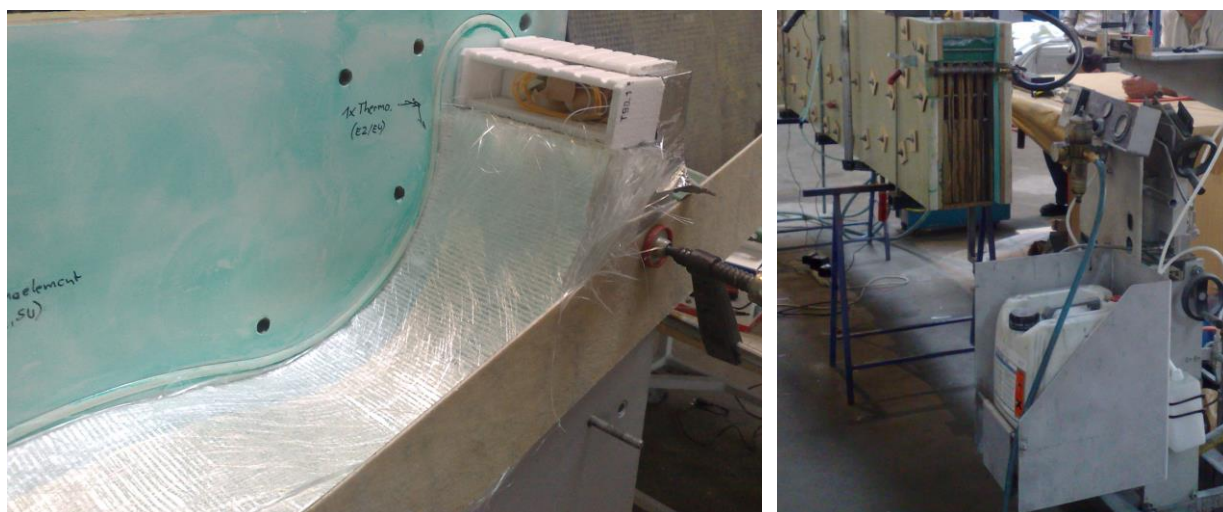


Foto 6-1 a) Forma – b) plnění formy pryskyřicí

### 6.2.3.3 Tlakové tváření

Při výrobě kompozitů technologií tlakového tváření se používá směs SMC (Sheet Moulded Compould – směs pro plošné tváření). Objemový podíl sekaných vláken bývá v této směsi 25%, stejně jako podíl pryskyřice. Směs dále obsahuje 45% plniv a 5% aditiv. SMC se používá ve formě vrstveného „sendviče“, v němž je mezi dvěma vrstvami pryskyřičné pasty vrstva sekaných skelných vláken. Po nanesení pryskyřice a nasypání vláken je třeba směs válcováním spojit a vymáčknout z ní vzduchové bubliny. Směs pak postupně houstne od konzistence sirupu, z níž po třech až pěti dnech přechází do konzistence podobné kůži. Když SMC dosáhne této podoby, nařeže se na pláty, vloží se do forem a v peci se vytvrzuje. Jedná se o poměrně rychlou technologii s krátkými výrobními časy a nízkými výrobními náklady.

### 6.2.3.4 Vstřikování

Při výrobě kompozitů metodou vstřikování se jako surovina používá tzv. BMC (Bulk Moulding Compould - objemová směs pro tváření). Jedná se o směs pryskyřice a sekaných skelných vláken (objemový podíl mezi 15 a 20%). Má velmi hustou konzistenci, která lze přirovnat ke chlebovému těstu, ale po zahřátí na teplotu vytvrzování zkapalňuje. Směs se dávkuje a pak je pístem tlačena do formy. Ta je vyhřívána, takže zde směs dosahuje teploty vytvrzování a kapalní, tzn. je schopná zatékat do všech dutin formy, což je výhodné zejména při výrobě drobných výrobků. Podobně jako u technologie tlakového tváření je i tato technologie rychlá a efektivní. Výrobky produkované touto technologií bývají náhrady odlitků z kovů a termoplastů, např. v elektrotechnickém průmyslu jako opláštění spotřebičů nebo kryty motorů při výrobě automobilů.

Společným znakem všech zmíněných výrobních technologií kompozitů je finální tvar výrobků bez nutnosti dalšího třískového obrábění, což významně snižuje výrobní náklady.

## 7 Zkoušky podvozků kolejových vozidel a jejich částí

Podvozky jsou pohyblivé systémy vložené mezi infrastrukturu a skříň vozidla. Svoji konstrukcí mohou být dvou nebo vícenápravové rozmanitých konstrukcí tak, aby zabezpečovaly dostatečnou funkci s ohledem zejména na hmotnost a rychlost transportu. Ke stejnému účelu mohou sloužit nepodvozkové pojezdy, tj. zařízení, které je zabudováno mezi kolejí a skříní vozidla sloužící k nesení a vedení vozidlové skříně v koleji. Tento typ je či býval využíván převážně pro krátké nákladní vagóny případně malá regionální vozidla.

Podvozky nákladních vozů jsou na základě historického vývoje tvořeny dvěma základními skupinami. Podvozky evropského typu s realizovaným prvotním vypružením a s chybějícím druhotným vypružením. U starších typů se ve vypružení objevovaly výhradně pružnice, nově se prosazují i šroubové pružiny. Výhodou těchto podvozků je nižší neodpružená hmota. Významným představitelem této skupiny podvozků je zejména v Evropě používán podvozek francouzské konstrukce Y25. Naproti tomu u podvozků amerického typu je realizováno druhotné vypružení, prvotní vypružení chybí. K sekundárnímu vypružení jsou v poslední době výhradně používány šroubovitě pružiny. Významným představitelem této skupiny podvozků je na americkém kontinentu velmi rozšířená podvozek Diamont.

S postupně rostoucím požadavkům na využití železnice k převozu nákladu vzniká potřeba pro vývoj nových nákladních podvozků, které by byly způsobilé pro vyšší přepravní rychlosti a

nápravová zatížení, ohleduplnější k nákladu i koleji, emitující menší provozní hlučnost a svoji menší hmotností umožnili převoz většího množství nákladu. Povozy typu Track Friendly by měly svými parametry kopírovat moderní podvozy osobních vozů.

Podvozy osobních vozů prošly dlouhodobým vývojem. Jejich konstrukci ovlivňovaly existující technologické možnosti. Listové pružiny, jako jediný v minulosti dostupný pružící prvek, ovlivňovaly významně jejich koncepci. Tyto pružiny, s nekontrolovatelným a silně proměnným koeficientem tření, byly postupně nahrazovány šroubovými pružinami. Nejnovější pružiny typu flexi-coil dále zjednodušily, stejně jako vypružení pneumatické, celou konstrukci podvozků. Ta se ustálila na dvounápravovém provedení. Na rozdíl od podvozků nákladní mají dvojitě vypružení: primární mezi ložiskovou skříní a rámem podvozku je tvořeno převážně šroubovitými pružinami nebo pryžo-kovovými bloky a s paralelním tlumičem a dále sekundární vypružení mezi rámem podvozku a skříní vozidla, které bývá obvykle se šroubovitými pružinami s kolébkou nebo pneumatické vypružení bez kolébkou. Vývoj dvounápravových podvozků pro osobní vozidla demonstruje jak mnohočetnost řešení jednotlivých komponent podvozku, tak i pestrost řešení jednotlivých výrobců. Specifickým přístupem lze dosáhnout vysokou technickou úroveň různými cestami vedoucí k nízké vlastní hmotnosti, dobrým chodovým vlastnostem v celém spektru rychlostí, nízkému opotřebení a malým nákladům na provoz a údržbu. Pro tvarovou jednoduchost jsou nákladní i podvozy pro osobní vozy předurčeny k dosažení zmíněných vlastností využitím nových pokrokových materiálů na bázi CFRP nebo GFRP.

Elektrické jednotky mají pod trakčním vozem trakční podvozy, pod vloženým vozem podvozy běžné různých koncepčních řešeních, podobně podvozy motorových vozů, jejich součástí bývají power packy zavěšené na skříní vozidla zabezpečující elektrickou energii pro trakční tlapové motory podvozků.

Rovněž podvozy elektrických a motorových jednotek prošly dlouholetým vývojem, v současné době je lze charakterizovat jako trakční, dvou nebo třínápravové převážně s individuálním pohonem dvojkolí, v případě hydrodynamického přenosu obvykle s pohonem skupinovým. U individuálních pohonů pro nižší rychlosti je obvyklý pohon tlapovým motorem, pro střední rychlosti pohon kloubovou hřídelí v dutině trakčního motoru a pro nejvyšší rychlosti dutou, v dnešní době často kompozitovou GFRP kloubovou hřídelí kolem nápravy.

Společným prvkem všech dvou a více nápravových podvozků je rám podvozku, uzavřený nebo tvaru písmene H, odlévaný, svařovaný nebo kombinovaný. Moderním stavebním materiálem pro podvozkové se jeví CFRP nebo GFRP kompozity.

## 7.1 Rám podvozku

Rám podvozku je vysoce namáhanou součástí železničního vozidla, od které je požadována bezchybná funkce. Podvozek je v provozu vystaven značnému namáhání statickými, kvazi-statickými a dynamickými silami. Představuje složitou, tvarově velmi členitou konstrukci s celou řadou geometrických a technologických vrubů.

Většina, v současné době v provozu používaných rámců podvozků, je vyráběna s využitím technologie svařování, případně kombinací svařované konstrukce a odlitků. Obě tyto výrobní technologie jsou úzce propojeny s teplotními a strukturálními vlivy.

Oblast svařování s sebou nese problematiku vnitřních pnutí, konstrukční a hlavně technologické koncentrátoři napětí, problémy tepelně ovlivněného pásma mezi základním materiálem a svařovým kovem, výskytu defektů ve svarech apod.

Odlévané části rámu jsou navíc zatíženy vlivy konstrukce odlévacích forem, rychlosti tuhnutí, vadami, ředinami, stavy napjatosti v důsledku tuhnutí apod.

Provozní selhání této části vozidla může mít za následek ohrožení životů mnoha lidí a značné materiální ztráty. Jeho vývoji, výrobě a ověření je proto třeba věnovat maximální pozornost. Kvalitní návrh konstrukce podvozkového rámu železničního vozidla se stává vysoce komplexní úlohou, ve které je nutnou prolínat vědomosti a zkušenosti mnoha oborů technické praxe, od vlastního návrhu, pevnostního výpočtu, optimalizace konstrukce až po její experimentální ověření.

### 7.1.1 Obvyklé metody experimentálního ověření – výzkumné činnosti

Vzhledem k závažným důsledkům případné havárie železničního vozidla je pro jeho povolení do provozu nutné splnění celé řady technických podmínek a předpisů. Ověření konstrukce rámu podvozku je předmětem rozsáhlých experimentálních postupů, jejichž cílem je minimalizace provozních poruch a selhání. Pro zkoušky podvozkových rámu existuje v rámci společenství UIC ( Union Internationale des Chemins de fer – založené za účelem standardizace a zlepšení podmínek železnic v oblasti mezinárodního provozu v roce 1922) několik směrnic [UIC Kodex], které určují závazná pravidla pro pevnostní ověření rámu podvozků jednotlivých typů kolejových vozidel. Podobně evropská norma [ČSN EN 13749] a Technical Specification for Interoperability TSI [KOMISE EU]. Cílem těchto postupů je prokázat, že na konstrukci nevzniknou trvalé deformace při statickém mimořádném nebo provozním zatěžování a že nevzniknou trhliny při únavové zkoušce. Splnění podmínek zkušebních postupů dává předpoklad 30-ti letého bezpečného provozu při ročním průjezdu vozidla 200 000 km. Těmto v Evropě závazným předpisům předcházela důkladná analýza charakteru a kvality tratí, resp. jejich silových účinků na železniční vozidlo. V průběhu únavové zkoušky jsou simulovány všechny hlavní síly vyskytující se provozu železničního vozidla způsobených hmotností vozidla, nerovnostmi tratí, projíždění oblouků, akcelerací, brzděním apod. S rozšiřováním Evropské unie a se silícím tlakem sjednotit direktivy v jednotlivých členských zemích unie byla koncem roku 2005 přijata závazná evropská norma zabývající se železničními aplikacemi, dvojkolími a podvozky a metodami specifikování požadavků na rámy podvozků. Tato norma je postavena na základech dílčích předpisů [UIC Kodex] a pokrývá širokou paletu různých typů podvozků. Ty jsou v normě rozděleny do sedmi kategorií B-I až B-VII a pokrývají zkoušení rámu podvozků celého spektra kolejových vozidel. Jak vyhlášky UIC tak i tato evropská norma dávají výrobcům kolejových vozidel dobrý návod pro tvorbu zkušební specifikace, která je základem pro provádění zkoušek. Principem zkoušení jsou postupně statické simulace mimořádných, provozních a dílčích zatěžovacích stavů předepsaných směrnicemi, normami apod., které by měly být, spolu s akceptačními kritérii pro statické i únavové zkoušky, obsaženy ve zkušební specifikaci výrobce drážního vozidla. Splnění kritérií při statických zkouškách, jak je uvedeno i v [ŠKODA2007], je podmínkou pro realizaci únavové zkoušky, při které se simuluje specifikací určené provozní zatížení s cílem zjistit odolnost konstrukce proti únavovému poškozování.

#### 7.1.1.1 Statické zkoušky

Nezbytnou podmínkou pro provedení statických zkoušek je pevnostní výpočet konstrukce metodou konečných prvků a zmapování rozložení napětí na rámu a odhalení jeho kritických míst, tj. míst, ve kterých vlivem namáhání vznikají největší napětí. Pokud je znám směr

hlavního napětí, jsou do těchto míst instalovány jednosměrné tenzometrické snímače, viz obr. 35. Tenzometry s dvěma navzájem kolmými mřížkami jsou do kritických míst instalovány v případě, kdy jsou známy dva směry hlavních napětí. V ostatních případech se instalují tenzometrické rozety, viz obr. 7-1. Aktivní délka tenzometrických mřížek nesmí být větší než 6 mm.

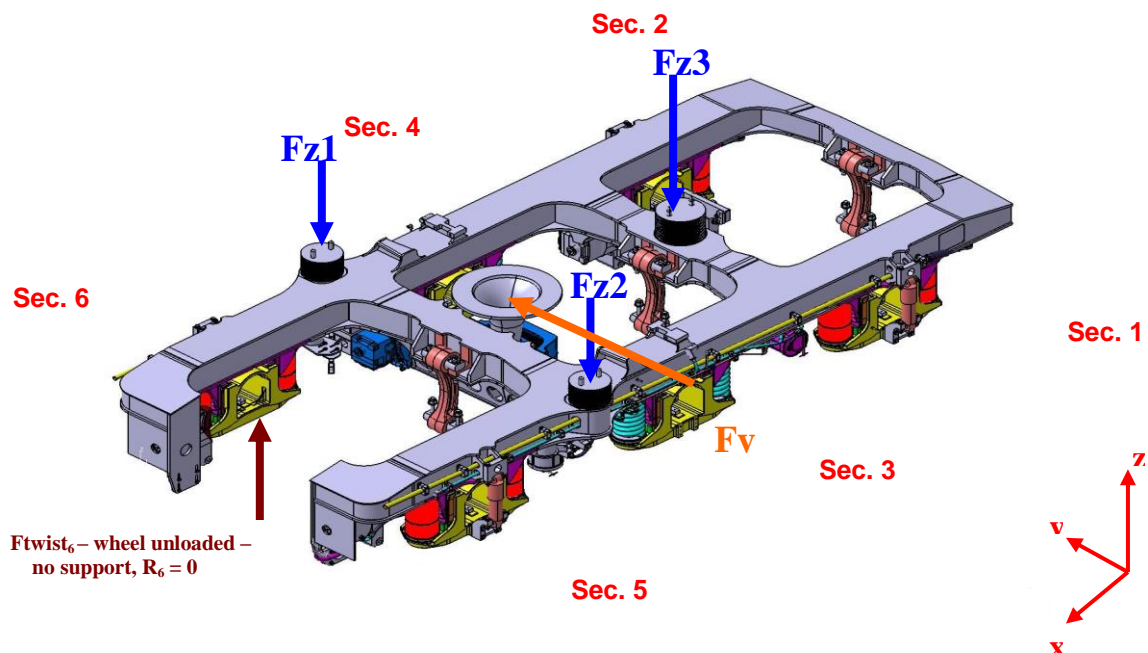


Obr. 7-1 a) Jednosměrný tenzometr b) tenzometrická růžice

Způsob výpočtu velikosti působících sil pro jednotlivé směry je uveden v příslušných normativních. Základem pro jejich stanovení je hmotnost podvozku, hmotnost prázdného vozu připraveného k provozu, případně užitková hmotnost vozidla, hodnoty uvažovaných zrychlení v jednotlivých ortogonálních směrech, počet a hmotnost cestujících na sedadlo,  $m^2$  v chodbičkách, plošinách apod. Uspořádání zkoušek musí co nejvěrněji reprodukovat deformace vznikající v provozu. Samozřejmostí je měření svislých reakcí pod koly nebo jejich náhradami při jednotlivých zatěžovacích stavech tak, aby mohlo být v průběhu experimentu kontrolováno správné rozložení akčních sil. Síly jsou aplikovány prostřednictvím elektrohydraulického zatěžovacího stavu. Samozřejmostí jsou sofistikované řídicí systémy.

#### 7.1.1.1 Statická simulace mimořádného zatížení

Účelem zkoušek je ověřit, zda na rámu nedochází k trvalým deformacím v důsledku superpozice maximálních namáhání, které mohou nastat v provozu. Napětí, jako odezva na vnější výjimečné zatížení, viz obr. 7-2, je v průběhu zkoušek měřeno tenzometrickými snímači, které jsou nainstalovány v předem vybraných místech konstrukce.



Obr. 7-2 Síly působící při simulaci mimořádného zatížení

### 7.1.1.1.2 Statická simulace provozního zatížení

Uspořádání zkušební sestavy musí umožnit aplikaci zatížení v místech, kde se vyskytují v provozu. Ve snaze vyhnout se jakýmkoliv parazitním vlivům v průběhu zatěžování je třeba brát v úvahu relativní pohyby jednotlivých částí zkušebních přípravků a rámu, stupně volnosti sdružené s vypružením a spojovací prvky mezi podvozkem a skříní vozu. Rám podvozku je podroben různým zatěžovacím konfiguracím za účelem simulovat:

- dynamické variace svislých sil v důsledku vertikálního pohybu – svislého kmitání skříně vozidla reprezentovaném procentuálním podílem koeficientu kmitání  $\beta$  svislých sil
- dynamické variace svislých sil v důsledku vertikálního pohybu – houpání skříně vozidla reprezentovaném procentuálním podílem koeficientu kmitání  $\alpha$  svislých sil

Hodnoty koeficientů kmitání  $\alpha$  a  $\beta$  jsou pro provozní podmínky brány  $\alpha = 0,1$  a  $\beta = 0,2$ . Vyšší hodnoty je možno použít pro velmi špatnou kvalitu tratí nebo v případě nasazení vozidla na tratě s velkým převýšením. Předepsané konfigurace zatěžovacích stavů, při kterých se opět zaznamenávají hodnoty napětí nebo deformací všech instalovaných tenzometrů, jsou uvedeny v tab. 7-1.

Load case	$F_{z1}$	$F_{z2}$	$F_y$
1	$F_z/2$	$F_z/2$	0
2	$(1 + \alpha - \beta) F_z/2$	$(1 - \alpha - \beta) F_z/2$	0
3	$(1 + \alpha - \beta) F_z/2$	$(1 - \alpha - \beta) F_z/2$	$+F_y$
4	$(1 + \alpha + \beta) F_z/2$	$(1 - \alpha + \beta) F_z/2$	0
5	$(1 + \alpha + \beta) F_z/2$	$(1 - \alpha + \beta) F_z/2$	$+F_y$
6	$(1 - \alpha - \beta) F_z/2$	$(1 + \alpha - \beta) F_z/2$	0
7	$(1 - \alpha - \beta) F_z/2$	$(1 + \alpha - \beta) F_z/2$	$-F_y$
8	$(1 - \alpha + \beta) F_z/2$	$(1 + \alpha + \beta) F_z/2$	0
9	$(1 - \alpha + \beta) F_z/2$	$(1 + \alpha + \beta) F_z/2$	$-F_y$

Tab. 7-1 Zatěžovací stavy pro statické zkoušky s vertikálními a příčnými silami

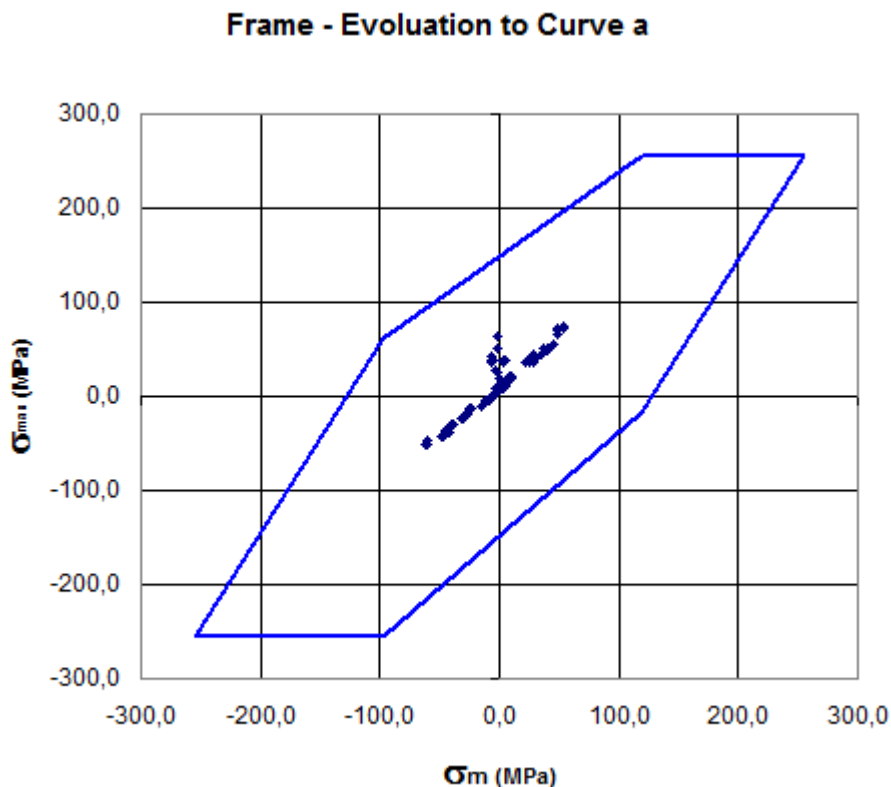
Po provedení testů uvedených v tab. 3 se zopakují zatěžovací stavy 3, 5, 7 a 9 s superpozicí kroucení rámu, tzv. křížového propadu. Zatěžovací stavy 2, 4, 6 a 8 slouží k vyhodnocení vlivu příčných sil. V každém měřeném místě se pro všechny zatěžovací stavy zaznamenávají hodnoty napětí. Z těchto hodnot se vybere minimální hodnota  $\sigma_{\min}$  a maximální hodnota  $\sigma_{\max}$  pro každé měřené místo, z kterých jsou vypočteny hodnoty:

$$\begin{array}{ll} \text{střední napětí} & \sigma_{\text{ave}} = (\sigma_{\min} + \sigma_{\max})/2 \end{array} \quad (1)$$

$$\begin{array}{ll} \text{amplituda} & \sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2 \end{array} \quad (2)$$

Mezní hodnoty, které musí být respektovány, jsou uvedeny v dokumentech, které korespondují se současným stavem poznání v této oblasti, jako jsou Goodman-Smith diagramy v ERRI Report B12 RP17, případně aktuální mezní diagramy pro použité materiály a svarové spoje konkrétních výrobců drážního vozidla apod, viz obr. 7-3.





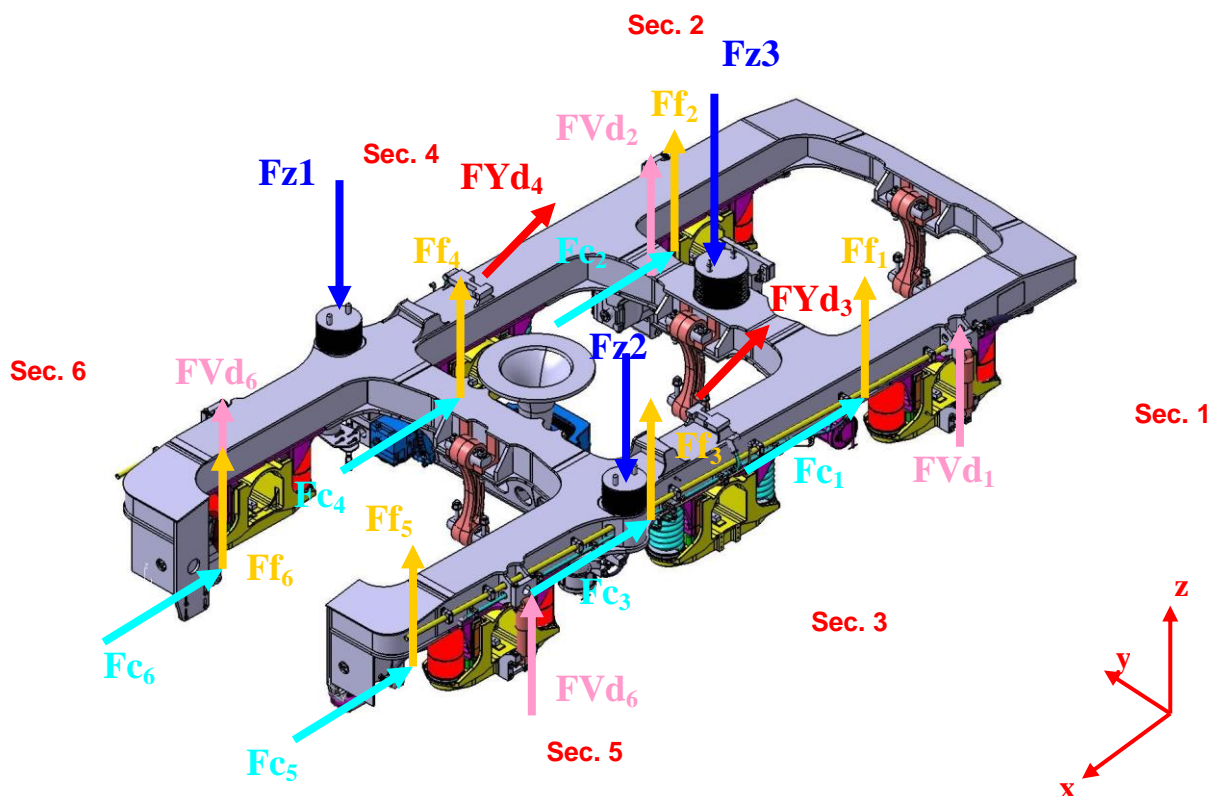
Obr. 7-3 Mezní křivky Goodman diagramu

Pro vyhodnocení hodnot napětí, získaných při simulaci statických provozních stavů, je nutno provést klasifikaci jednotlivých měřených míst s ohledem na jejich umístění na rámu, zejména z pohledu přítomnosti různých typů svarových spojů (koutové, V svary, bradavkové apod.). Umístění vypočtených hodnot napětí, viz (1) a (2), musí být provedeno do příslušných mezních diagramů pro daný typ svaru, v blízkosti kterého je daný tenzometr umístěn. Obecně lze říci, že střední napětí a amplitudy všech tenzometrů by měly ležet uvnitř příslušných mezních čar. Omezené množství měřených míst smí překročit povolené napětí, avšak maximálně o 20%. V takovém případě lze přistoupit k provedení únavové zkoušky. Postup pro vyhodnocení získaných napětí se může lišit podle použité metody vyhodnocení. V poslední době se posouzení evropských výrobců ustálilo na použití postupů VDV 1612.

### 7.1.1.1.3 Statická simulace dílčích provozních zatížení

V této etapě statických zkoušek se simulují síly, které na podvozku vznikají jako dynamické efekty setrvačných sil motorů, dále síly simulující pohon vozidla, pneumatické i elektrické brždění, síly svislých, příčných případně podélných tlumičů, torzních stabilizátorů, podélných sil vznikajících z otáčivého pohybu kolem svislé osy vozidla nebo tzv. kosení, kterým je rám namáhán při průjezdu vozidla velmi malými oblouky. Příklady těchto dílčích zatěžovacích stavů jsou schematicky ukázány na obr. 7-4. Síly se simulují v místech uchycení příslušných zařízení. Před aplikací těchto jednotlivých partikulárních sil se rám podvozku zatíží vertikálními silami na každý podélník a změří se reakce pod každým kolem či jeho náhradou. Stejně jako u aplikace mimořádných sil nesmí být při simulaci dílčích zatížení překročena mez elasticity a po odlehčení nesmí vzniknout žádná trvalá deformace v měřených místech konstrukce.





Obr. 7-4 Dílčí provozní simulace

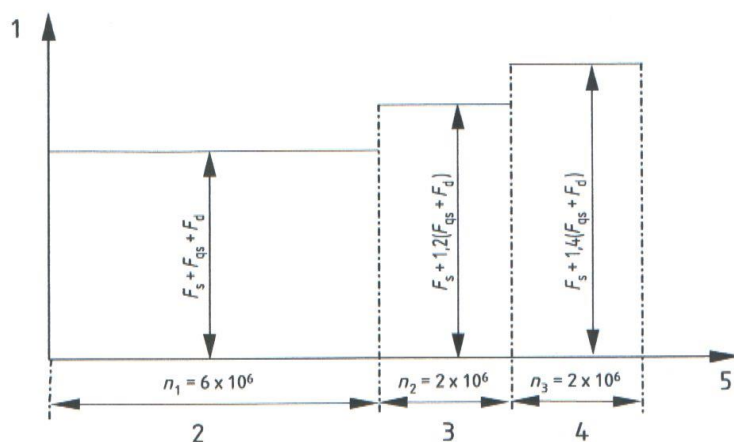
### 7.1.1.2 Únavová zkouška

Vzhledem k tomu, že v průběhu únavové zkoušky je reálně simulován 30-ti letý provoz vozidla, stává se tato zkouška významným nástrojem pro objektivní a průkazné posouzení únavové pevnosti rámu podvozku vozidla. Jak již bylo zmíněno, k únavové zkoušce lze přistoupit za předpokladu, že většina měřených míst konstrukce nepřekračuje mezní čáry Goodman-Smith diagramu o více než 20%.

Provedení zkoušky je nutno zvolit tak, aby aplikované síly působily přesně v místech, ve kterých vznikají v provozu. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat relativním pohybům jednotlivých částí zkušebních přípravků a rámu, stupňům volnosti sdružených s vypružením a spojovacím prvkům mezi podvozkem a skříní vozu.

Kvazistatická a dynamická namáhání, která vznikají při průjezdech levými a pravými oblouky se při únavové zkoušce simulují po sobě následujícími zkušebními cykly. V každém intervalu, odpovídajícímu levému nebo pravému oblouku je počet dynamických zatěžovacích cyklů ve svislém a příčném směru 20. Tento počet lze snížit až na 10 nebo méně pokud se předpokládá nasazení vozidla na tratích s četným výskytem oblouků. Frekvence zatěžování vertikálních a příčných sil musí být stejná a bez fázového posuvu. Počet simulací průjezdu levými a pravými oblouky musí být stejný. Zkouška se provádí ve třech etapách, viz obr. 8. V prvním stupni zatěžování jsou aplikovány základní síly vypočtené podle normativů podobným způsobem jako pro statické simulace. Z celkového počtu cyklů  $6 \cdot 10^6$  příčných a svislých sil je při tomto stupni zatěžování aplikováno  $6 \cdot 10^5$  cyklů propadů (kroucení). Ve druhém stupni o celkovém počtu svislých a příčných cyklů  $2 \cdot 10^6$  je ponechána velikost sil simulujících statické zatížení. Velikost kvazistatických a dynamických sil (včetně krutu) je

zvětšena o 20 % a počet cyklů propadů (kroucení)  $2 \cdot 10^5$ . Ve třetím stupni je průběh a počet cyklů stejný jako u 2. stupně, ale velikost kvazistatických a dynamických sil je zvětšena o 40 % oproti základnímu nastavení sil. Průběh únavové zkoušky je schematicky zobrazen na obr. 7-5.



**Legenda:**

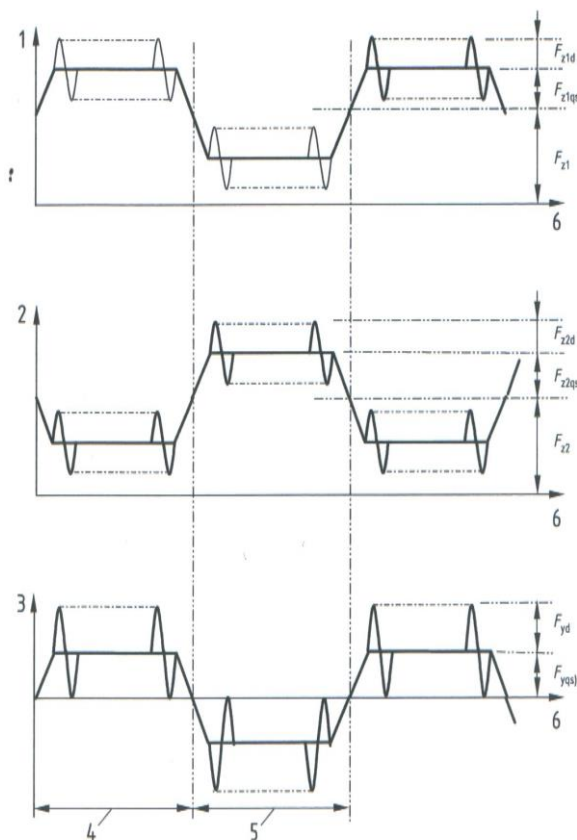
- 1 - velikost sil
- 2 - 1. stupeň
- 3 - 2. stupeň
- 4 - 3. stupeň
- 5 - cykly

Obr. 7-5 Sekvence únavové zkoušky

Příklad průběhu základních zatěžovacích sil je uveden na obr. 7-6. Tuto základní část lze doplnit dynamickými simulacemi trakčních sil, případně dalšími stavy podle uvážení výrobce vozidla.

**Legenda:**

- 1 Síla působící na podélník 1  $F_{z1}$
- 2 Síla působící na podélník 2  $F_{z2}$
- 3 Příčná síla  $F_y$
- 4 Pravý oblouk  $n$  cyklů
- 5 Levý oblouk  $n$  cyklů
- 6 Počet cyklů
- $F_{z1d}$  Dynamická síla působící na podélník 1
- $F_{z2d}$  Dynamická síla působící na podélník 2
- $F_{z1gs}$  Kvazi statická síla podélník 1
- $F_{z2gs}$  Kvazi statická síla podélník 2
- $F_{y1gs}$  Příčná kvazi statická síla na nárazku
- $F_{yd}$  Příčná dynamická síla na nárazku



Obr. 7-6 Průběh sil při únavové zkoušce

Po obou prvních stupních únavové zkoušky nesmí být zjištěny žádné trhliny. Tuto skutečnost je nutno prokázat nedestruktivní zkouškou magnetoskopickou nebo kapilární. Nedestruktivní zkoušky je třeba provést vždy po  $4 \times 10^6$  zatěžovacích cyklech a také po ukončení všech stupňů únavové zkoušky. Během třetího stupně zatěžování jsou přípustné malé trhlinky za předpokladu, že nevyžadují okamžitou opravu, pokud by vznikly v provozu.

Zvýšenou pozornost je třeba věnovat místům, kde byly zjištěny největší hodnoty napětí v průběhu statických zkoušek. Tato místa se doporučuje při únavové zkoušce monitorovat pomocí tenzometrů. Důležitým parametrem zkoušky je zatěžovací frekvence, resp. nalezení její optimální hodnoty se zřetelem na zachování velikosti deformace odpovídající zatěžovacím silám při statickém zatěžování.

### 7.1.1.3 Jízdní zkoušky

Neméně důležitým parametrem prokázání životnosti, spolehlivosti a dynamického chování podvozkového rámu a celého podvozku je jeho ověření na zkušební nebo reálné trati. Do relace se přitom dostávají výpočtové, experimentální a provozní hodnoty sil a napětí v kritických místech konstrukce. Na základě těchto komplexních informací lze posoudit silové účinky podvozku a vozidla na kolejový svršek. Za tímto účelem se používají speciální měřicí dvojkolí schopné sílu mezi kolem a kolejnicí změřit. Procedury nutné ke zdárné homologaci celého kolejového vozidla jsou předmětem evropských norem, TSI směrnic a UIC vyhlášek.

### 7.1.1.4 Ostatní zkoušky

K prokázání způsobilosti podvozku i celého kolejového vozidla je zapotřebí provést, evropskými normativy, TSI směrnicemi a vyhláškami UIC předepsanými, další rozsáhlou škálu mechanických zkoušek a měření. Příkladem jsou statické pevnostní zkoušky hrubých staveb skříní, částí vozidel, nárazové zkoušky vozidel a dynamické zkoušky nárazníků, měření průjezdu obloukem, nájezdu na trajekt a na přesuvnu, měření odporů proti natáčení simulací na měrné točně, stanovení bezpečnosti proti vykolejení na zborcené koleji, zjišťování bezpečnosti jízdy, účinků vozidel na kolej, chodové zkoušky a měření vibrací, zkouška brzd vozidel, měření interního i externího hluku a podobně. Parametrem, který významným způsobem určuje dynamické chování podvozku i celého vozidla zejména jeho silových účinků na infrastrukturu, je měření torzní tuhosti podvozku.

Předchozí kapitoly měly za cíl popsat souhrn parametrů a činností, které je nutno uvažovat při vývoji konstrukce, která má v provozu spolehlivě plnit svoji funkci. Další kapitoly jsou zaměřeny na výzkumné činnosti autora disertační práce při vývoji kompozitového GFRP rámu podvozku pro vysokorychlostní nákladní železniční dopravu.

## 8 GFRP podvozek EB25

Ocel byla, jako konstrukční materiál pro výrobu podvozků, používána od té doby, kdy byl první podvozek železničního vozidla zkonstruován. Základní koncept, který musí zůstat neměnný, je fakt, že podvozkový rám musí být pevný, aby odolal provoznímu namáhání, které má únavový charakter. Výsledkem je relativně tuhá konstrukce. S použitím skelnými vlákny vyztužených plastů (Glass fibre reinforced plastic GFRP) je možné získat potřebnou pevnost,

aniž by rám musel být tak tuhý s velkým negativním dopadem na traťovou infrastrukturu. To je možné proto, že GFRP kompozitní materiál a konstrukce z něj, má příznivou kombinaci materiálových vlastností jako jsou:

- nízká hmotnost odpružených hmot
- dlouhá životnost komponent
- nízké síly působící mezi kolem a kolejí s příznivým dopadem na redukci opotřebení kola v důsledku samořiditelnosti dvojkolí vozidla
- snížení účinků valivé kontaktní únavy v důsledku nízké boční tuhosti
- nízké nároky na údržbu vyplývající z funkční integrace komponent
- vysoká provozní rychlost – až do 200 km za hodinu při nápravovém zatížení 16t na nápravu
- redukce hluku a vibrací

Tyto funkční výhody povedou k obchodním benefitům. V důsledku nízké hmotnosti GFRP materiálů mohou operátoři provozovat vlaky s vyšší užitečnou hmotností, případně platit nižší poplatky za použití infrastruktury. Důležitým parametrem je samo říditelné natáčení dvojkolí podvozku v obloucích, které umožňuje pružný GFRP rám a které významně redukuje fenomén kontaktní únavy ve styku kola a kolejnice. Použití kotoučových brzd umožňuje vysokorychlostní provoz, což dovoluje nákladní kolejové dopravě integrovat se do osobní přepravy a zvýšit tak kapacitu tratí a intenzivnější využívání kolejových vozidel. To vše snižuje náklady na životní cyklus podvozku.

Eurobie je inovativní koncepce podvozku, ve které je tuhý ocelový rám podvozku nahrazen skelnými vlákny vyztuženým plastem, který se při zatížení ohybově deformuje a díky svým vlastnostem zabezpečuje potřebné pružení a tlumení. Toto tlumení je poskytováno prostřednictvím vnitřního tlumení použitého GFRP kompozitu, pryžových tlumících prvků a polyuretanových podložek. Podvozek byl navržen v rámci projektu Eureka E! 1841 Eurobie.

## 8.1 Konstrukce Ecobie podvozku

Podvozek Ecobie se skládá z horního a spodního rámu podvozku, které jsou vyrobeny ze skelnými vlákny vyztužených kompozitů. Tyto rámy jsou tvarované přímo do konečného tvaru, pod zatížením se vychylují a zabezpečují tak vypružení podvozku. Při jejich průhybu se zvětšuje rozvor náprav podvozku, což mimo jiné zabezpečuje jeho samořiditelnost. Dvou rámová koncepce podvozku resultuje do dvojité tuhostní charakteristiky, viz obr. 8-2. Maximální zvětšení rozvoru je limitováno kompozitovou kravatou, která je umístěna do ložiskové skříně. Tato kravata přebírá část tahového zatížení, obr. 8-1.

Ložiskové domky jsou konvenční konstrukce s dvojitým válečkovým ložiskem na koncích nápravy. Boční desky ložiskové skříně jsou prodlouženy nad a pod vnější ložiskový domek tak, že zatížení může být přenášeno z GFRP prvků prostřednictvím ložiskové skříně na dvojkolí. Svislé zatížení působí z vagónu na kompozitové podélníky přes polyuretanové podložky a pryžové prvky, které poskytují tlumení a boční tuhost. V případě rozdílných zatížení na obou podélnících, jak je tomu při průjezdu oblouky, rozvor náprav se bude rozdílný mezi vnitřními a vnějšími koly, nápravy se samy začnou natáčet a umožní snadný průjezd obloukem. Toto konstrukční řešení zaručuje samořiditelnost dvojkolí při průjezdu oblouky. Centrální bod otáčení – pivot je upevněn na horní straně spodního rámu otočného podvozku a umožňuje natáčení vagónu vzhledem k podvozku. Pivot rovněž přenáší příčné a podélné zatížení skrz příčník na ložiskové domky. Podvozek využívá kotoučové brzdy, jejich brzdové

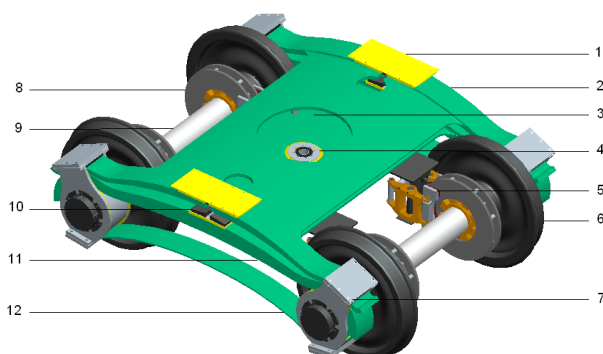
třmeny jsou umístěny na horní části spodního rámu podvozku. Brzdový systém podvozku využívá 2 brzdových kotoučů o průměru 640 mm na jedné nápravě. Účinné brždění je tímto brzdovým systémem zabezpečeno do rychlosti 200 km/hodinu.

Podvozek používá průměr dvojkolí 840 mm, který zabezpečuje světlou výšku 840 mm při vlastní hmotnosti vagónu. Tato nízká světlá výška je dosažena tím, že podvozek nepotřebuje další pružící elementy. Pro zajištění ještě nižší světlé výšky může být použito dvojkolí o menším průměru.

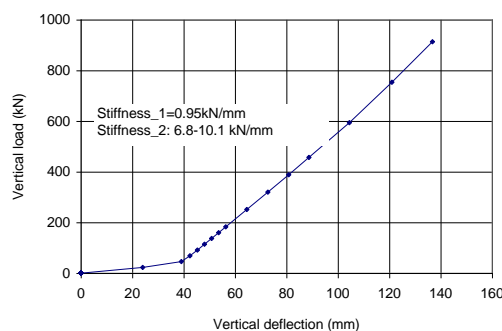
Při testování GFRP podvozku bylo svislé zatížení přenášeno přes podélníky prostřednictvím polyuretanových podložek a pryžových elementů. Originální dvojkolí bylo nahrazeno tuhými náhradami náprav i kol. Vnitřní a vnější ložiskové kroužky ložiskové skříně byly na zadní nápravě vyrobeny z oceli. Za účelem zvýšení tření mezi kompozitovou „kravatou“ a vnějším ložiskovým kroužkem byl tento na přední nápravě vyroben ze skelného kompozitu. Toto opatření mělo za důsledek i snížení neodpružené hmoty podvozku.

Centrální čep - pivot byl připojen ke spodnímu rámu podvozku. K této části podvozku byly rovněž připevněny dílčí rámy pro uchycení brzdového systému. Podvozek byl následně smontován s použitím všech nutných komponent včetně ložiskových komor tak, aby tvořil ucelený celek schopný plnit svoji funkci a přenášet zatížení.

Použité materiály pro výrobu podvozku jsou uvedeny v tab. 8-1.



Obr. 8-1 Podvozek Ecobogie



Obr. 8-2 Dvojitá tuhostní charakteristika

Pozice	Položka	Materiál
1	Stranová podložka	Polyuretan, nylon a pryž
2	Horní rám podvozku	GFRP
3	Spodní příčník rámu podvozku	GFRP
4	Centralní pivot	Ocel, pryž, polyuretan
5	Brzdový třmen	Ocel, pryž a brzdové obložení
6	Dvojkolí	Ocel
7	Ložiskový domek	Ocel, pryž, polyuretan
8	Brzdový kotouč	Ocel
9	Náprava	Ocel
10	Podložka rámu podvozku	Pryž, polyuretan
11	Spodní rám podvozku	GFRP
12	Nápravová kravatka	GFRP

Tab. 8-1 Použité materiály



Tlumení podvozku vychází z různých prvků, rozložených v celém rámu, ale i mezi jednotlivými GFRP komponentů konstrukce, například:

- pryžový obal mezi vnitřním a vnějším ložiskovým kroužkem
- pryžový tlumič v ložiskovém domku mezi horním podélníkem a uzavírací deskou ložiskového domku a mezi nápravovou „kravatou“ a spodní uzavírací deskou ložiskového domku
- polyuretanové podložky mezi všemi GRP a ocelovými prvky v podélných i příčných směrech

Tlumení je odvozeno z pěti samostatných zdrojů: GRP komponentů konstrukce, pryžového opásání náprav, tlumících prvků mezi horním a spodním rámem podvozku, tlumících prvků mezi podélníky a horní částí ložiskové skříně a dále mezi nápravovou kravatou a spodní částí ložiskové skříně. Tyto formy tlumení jsou spolehlivé, reprodukovatelné a schopné reagovat i na malé amplitudy vibrací, které jsou charakteristické pro kompletně svařovaný kolejový svršek. Pro podvozek je požadována konstrukční hodnota 20% kritického tlumení, aby se minimalizovala excitace frekvencí odpružených hmot při nerovnostech tratí.

Významnou funkční výhodou GFRP podvozku je značné snížení hluku a vibrací při jeho provozu. Výraznou redukcí hluku a vibrací v porovnání s konvenčními podvozky může být dosaženo pomocí následujících konstrukčních vlastností:

- přenos svislého zatížení přes postranní podložky, které lze naladit do anti vibračního módu
- optimální úhel nájezdu dvojkolí do oblouků vlivem samořídící schopnosti podvozku
- tlumení hluku a vibrací ze styku kolo/kolejnice v důsledku menších kontaktních sil a kompozitních materiálů podvozku
- redukce neodpružených hmot v důsledku použití kompozitových materiálů pro stavbu podvozku
- nízké dynamické zatížení

Podvozek byl navržen tak, aby se minimalizovala kontaktní únava vznikající v důsledku odvalování dvojkolí po kolejnici. Podvozky s nízkým footprintem a nízkou valivou kontaktní únavou podléhají například ve Velké Británii nižším poplatkům za použití infrastruktury. K podobným úvahám dochází také v kontinentální Evropě. Porovnání základních konstrukčních parametrů s v Evropě nejrozšířenějším podvozkiem Y25 francouzské konstrukce, největším potencionálním konkurentem GFRP podvozku, jsou uvedeny v tab. 8-2.

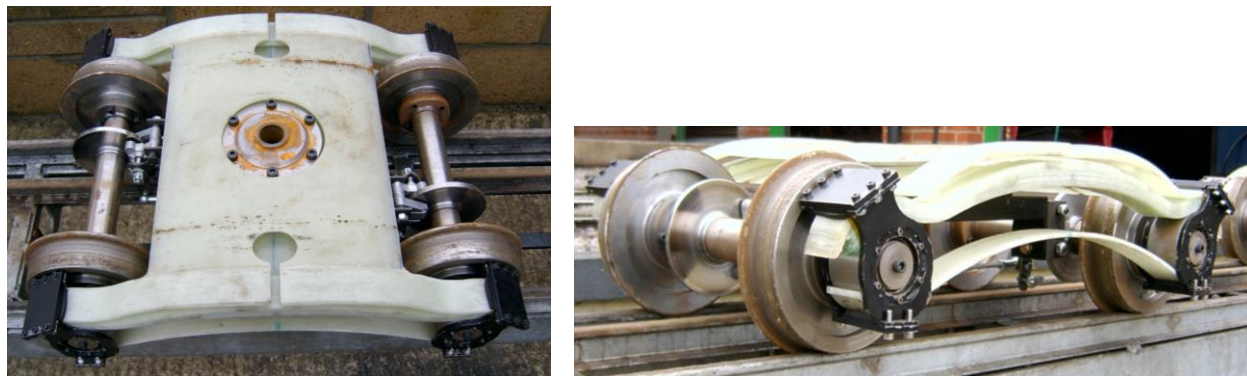
	EB 2004 reference design	Y25
Maximum length (mm)	2820	3250
Maximum width (mm)	2280	2356
Axle spacing (mm)	1800-2200	1800
Wheel diameter (mm)	840; other sizes possible	920
Maximum speed (km/h)	140 (200)	120 (140)
Axle load (kN)	225 (160)	225 (180)
Primary spring rate (kN/mm)	2.2 (3.3)	4.0
Knee point (kN)	60	na
Secondary spring rate (kN/mm)	9 (10)	11
Ride height 100m without wheels	410	415
Primary suspension	Glass reinforced plastic	Steel coil
Secondary suspension	Glass reinforced plastic	Steel coil
Axle wrap around inner bearing housing	Rubber	nil
Damping	Reproducible and consistent; intrinsic damping of GRP frame; rubber axle wrap and damper elements.	Sliding friction
Braking system	Braking on wheels (discs)	Tread (discs)
Mass (standard design, disc brakes, kg)	3500	4500 5700

Tab. 8-2 Porovnání konst. parametrů podvozků GFRP a Y25

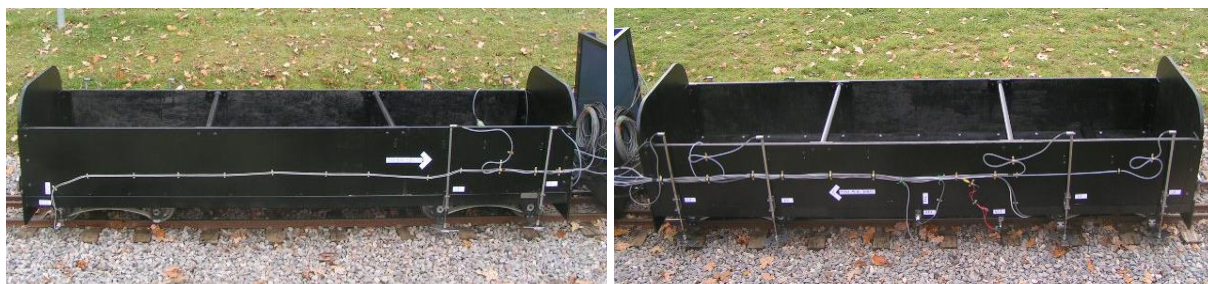
V další části práce je věnována pozornost výzkumu dynamického chování pětinového modelu kompozitového podvozku s cílem predikovat na jeho výsledcích chování podvozku v měřítku 1:1.

## 9 Výzkum dynamického chování 1/5 GFRP podvozku

Prvotním ověřením konstrukce sklolaminátového podvozku a jeho klíčových funkčních a provozních vlastností byl model tohoto podvozku vyrobený v poměru 1/5. Všechny charakteristické rysy podvozku byly vyrobeny v tomto poměru včetně kotoučových brzd, viz obr. 9-1. Za účelem provedení měření na trati byl vyroben také dřevěný vagón, který byl osazen dvěma GFRP podvozky, viz obr. 9-2, originální vagón byl, z důvodu možnosti porovnání vlastností, vybaven dvěma klasickými konvenčními ocelovými podvozky.



Obr. 9-1 Pětinový model GFRP podvozku



Obr. 9-2 Instrumentovaný vagón s GFRP podvozkem – výletní železnice v Eastleigh

### 9.1 Instrumentace

Aby bylo možné získat údaje nezbytné pro porovnávání dynamického modelu podvozku a vagónu byly oba vagóny a jejich podvozky instrumentovány snímači zrychlení, posuvu-dráhy, provozní rychlosti a také video kamerou pro sledování chování obou typů podvozků.

Celkem bylo použito sedm snímačů zdvihu. Šest z nich bylo namontováno vertikálně tak, aby umožňovaly monitorovat vzájemný pohyb mezi vagónem a podvozkem v důsledku jak přidání užitečného zatížení, tak i jeho pohybů vlivem vertikálních traťových nerovností. Mezi tyto nerovnosti patří mezery mezi jednotlivými kolejemi, sklon koleje a také kroucení a naklápění podvozku. Další snímač posuvu byl instalován horizontálně a použit pro měření úhlu vychýlení jednoho z podvozků vzhledem k vagónu tak, aby monitoroval jeho chování při jízdě v obloucích.

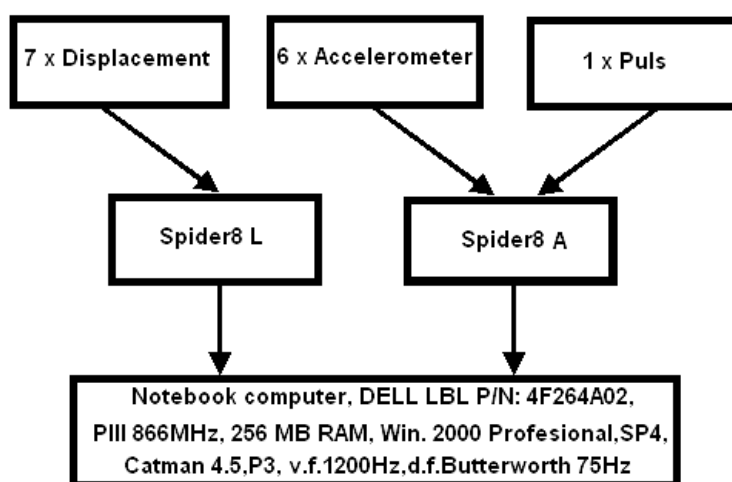
Dále bylo použito šest snímačů zrychlení - akcelerometrů. Ty byly umístěny ve třech párech, orientované v bočním a svislém směru. Jeden pár byl namontován na ložiskovém domku podvozku za účelem měření zrychlení působící na trať, další byl umístěn ve středu

vagónu GFRP podvozku pro sledování zrychlení skříně vagónu. Pro porovnání byl poslední pár snímačů zrychlení namontován obdobně do středu originálního Eastleigh First Class carriage vagónu. Snímač rychlosti byl umístěn na jednom z kol GFRP podvozku. To umožnilo synchronizovat měřené veličiny a jejich podstatné události s úseky na trati, tzn. zajímavé odezvy měřených veličin, jako jsou zejména sekvence s vysokým zrychlením, mohou být zkoumány z pohledu té části dráhy, kde k nim došlo.

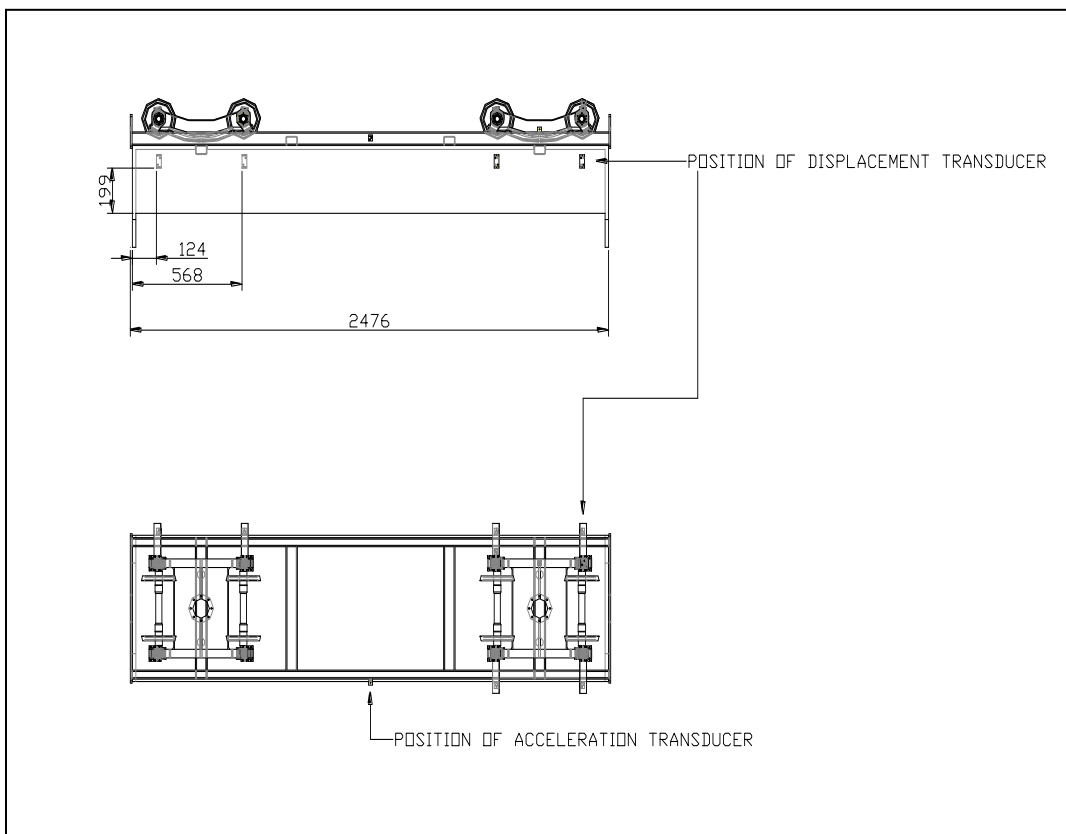
Označení	Druh snímače	Výrobce	Typ	ID	Foto
A1V	Akcelerometr - GFRP	HBM	B12/500	031210131	P1010120
A1H	Akcelerometr - GFRP	HBM	B12/500	F.Nr.6897	P1010120
A2V	Akcelerometr - GFRP	HBM	B12/500	03121021	P1010123
A2H	Akcelerometr - GFRP	HBM	B12/500	074510699	P1010123
A3V	Akcelerometr - GFRP	HBM	B12/500	F.Nr.44884	P1010127
A3H	Akcelerometr - GFRP	HBM	B12/500	F.Nr.3076	P1010127
A3V	Akcelerometr - Ocel	HBM	B12/500	F.Nr.44884	P1010127
A3H	Akcelerometr - Ocel	HBM	B12/500	F.Nr.3076	P1010127
L1	Zdvih-dráha - GFRP	HBM	WA/300mm	080810248	P1010124
L2	Zdvih -dráha - GFRP	HBM	WA/300mm	061610267	P1010119
L3	Zdvih -dráha - GFRP	HBM	WA/300mm	060610052	P1010124
L4	Zdvih -dráha - GFRP	HBM	WA/300mm	080810241	P1010119
L5	Zdvih -dráha - GFRP	HBM	WA/300mm	060610056	P1010121
L6	Zdvih -dráha - GFRP	HBM	WA/300mm	065116187	P1010121
L7	Zdvih -dráha - GFRP	HBM	W10TS	F.Nr.407	P1010130
V1	Snímač pulsů - GFRP	HBM	AK1-AP-2A	LOT.0348	P1010131
VC1	Video kamera - GFRP				P1010132

Tab. 9-1 Použité snímače

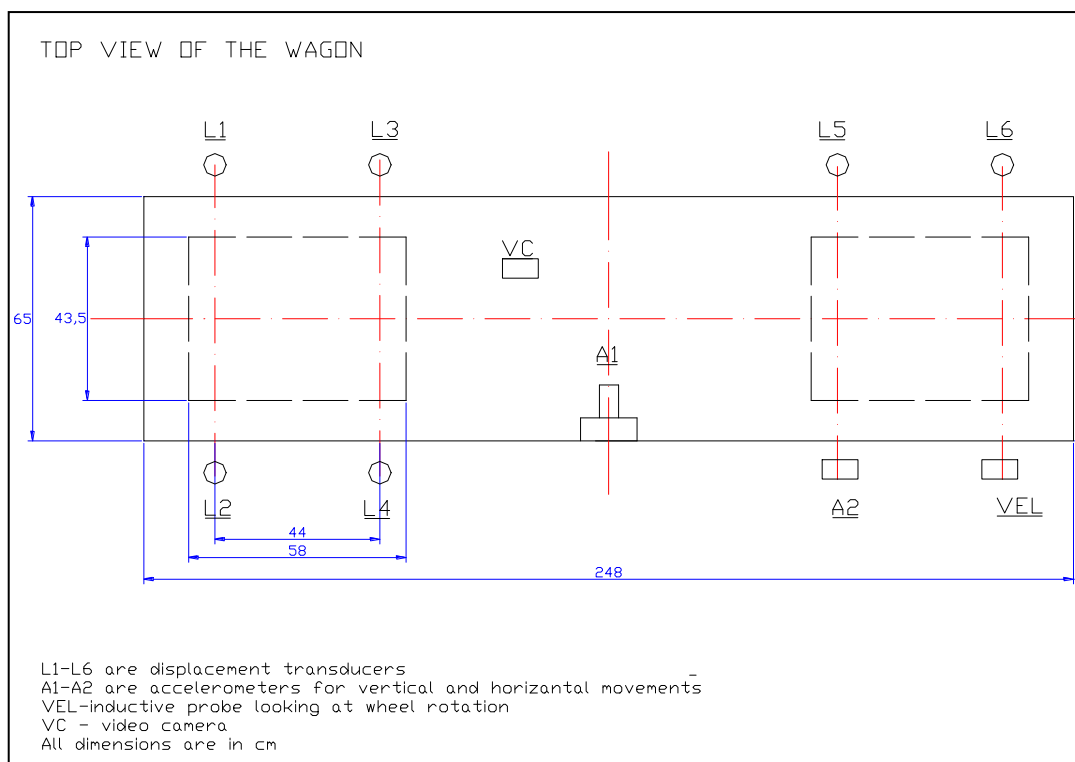
Měřicí řetězec a použité přístroje při měření jsou patrné z obr. 9-3. Rozmístění použitých snímačů je schématicky znázorněno na obr. 9-4, 9-5 a 9-6 a dále na fotografiích 9-1, 9-2 a 9-3.



Obr. 9-3 Použité přístroje



Obr. 9-4 Pozice LVDT snímačů a akcelerometrů na vagónu



Obr. 9-5 Pozice všech snímačů při měřeních





Foto 9-1 Snímače zdvihů L1, L3, L7, L2 a L3



Foto 9-2 Snímače zdvihů L5, L6, akcelerometr A1H, A1V, A2H a A2V

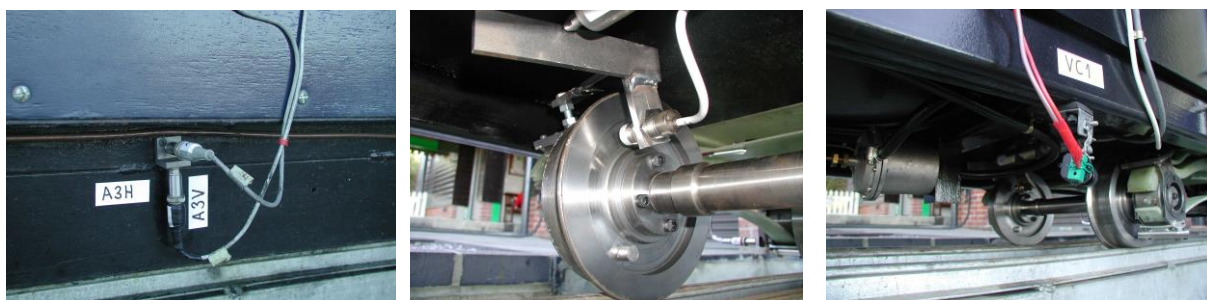
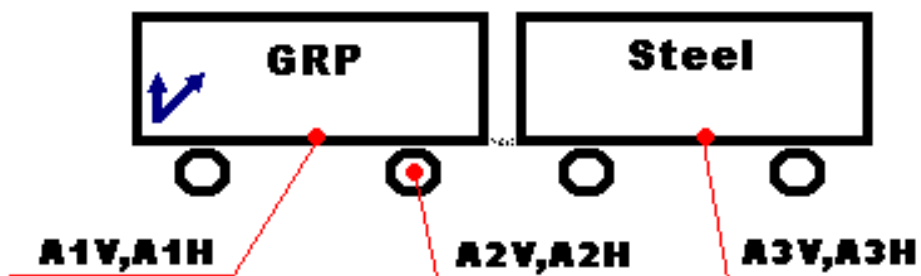


Foto 9-3 Akcelerometr A3H, A3V, rychlost v1 a videokamera

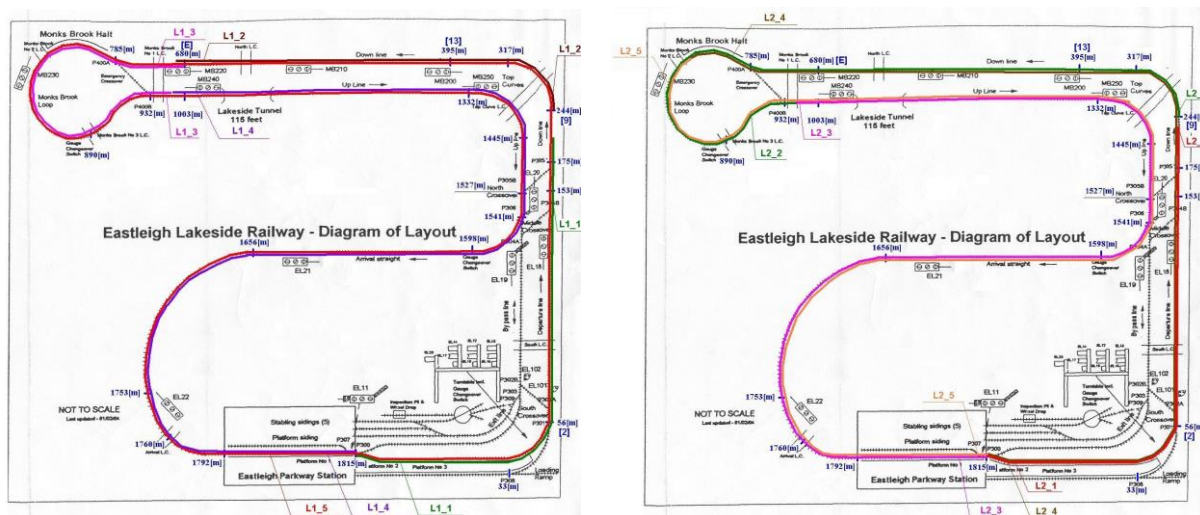


Obr. 9-6 Schéma rozmístění akcelerometrů na vagónech



## 9.2 Podmínky trati a ložení

Měření bylo prováděno na trati výletní železnice v Eastleigh nedaleko Southamptonu v Anglii. Celá trať je dlouhá 1815 metrů. Pro kontrolu opakovatelnosti dat bylo nutno celou trať rozdělit do jednotlivých sekvencí, které byly charakteristické svými typickými vlastnostmi, jako jsou oblouky, rovné úseky, výhybky apod. Jednotlivé sekvence trati jsou patrné z obr. 9-7.



Obr. 9-7 Jednotlivé sekvence tratě v Eastleigh

Opakovatelnost dat na každém křížení a nastavení výhybek bylo analyzováno a každý bod křížení a výhybka byly očíslovány. Název, typ oblouku a jejich umístění na trati spolu s počty přechodů a výhybek a jejich umístění na trati je možné vidět v tab. 9-2.

Měření bylo prováděno při třech úrovních naložení vagonů s GFRP podvozky (prázdný, označený jako E - empty, loading level 1 označený jako L1 – přídavná hmotnost 380kg, a loading level 2 – L2 – přídavná hmotnost 600kg) na různých úsecích trati. Naložení vagonů pro úroveň L1 a L2 ukazují foto 9-4, resp. 9-5. K zatížení vagonů byl použit kamenný štěrk.



Foto 9-4 Úroveň zatížení L1



Foto 9-5 Úroveň zatížení L2

Test number	Channels measured	Distance on track (m)	Type of track
E1	17	0 - 210	Straight, Curve A Crossings 1 - 4 Points 1 - 4
E2	17	244 - 950	Straight, Curves B, C, D Crossings 5 - 18 Point 5
E4	17	680 - 1003	Curves C, D Crossings 9 - 18 Points 5 - 6
E6	17	932 - 1003	Straight, Curves E, F, G, H, I Crossings 17 - 18 Points 5 - 6
L1_1	17	0 - 210	Straight, Curve A Crossings 1 - 4 Points 1 - 4
L1_2	17	244 - 690	Straight, Curve B Crossings 5 - 8
L1_3	17	680 - 950	Curves C, D Crossings 9 - 18 Points 5
L1_4	17	950 - 1815	Straight, Curves E, F, G, H, I Crossings 19 - 22 Points 6 - 9
L1_5	17	0 - 1815	Full track
L2_1	17	0 - 230	Straight, Curve A Crossings 1 - 4 Points 1 - 4
L2_2	17	244 - 950	Straight, Curves B, C, D Crossings 5 - 18 Points 5
L2_3	17	950 - 1815	Straight, Curves E, F, G, H, I Crossings 19 - 22 Points 6 - 9
L2_4	16	0 - 840	Straight, Curves A, B Crossings 1 - 13 Points 1 - 4
L2_5	16	840 - 1815	Straight, Curves D, E, F, G, H, I Crossings 14 - 22 Points 5 - 9
L2_6	16	0 - 230	Straight, Curve A Crossings 1 - 4 Points 1 - 4
L2_8	16	680 - 950	Curves C, D Crossings 9 - 18 Points 5
L2_10	16	317 - 690	Straight Crossings 7 - 8
L2_12	16	0 - 280	Straight, Curves A, B Crossings 1 - 6 Points 1 - 4
L2_13	16	395 - 1815	Straight, Curves C, D, E, F, G, H, I Crossings 7 - 22 Points 5 - 9

Tab. 9-2 Struktura tratí

## 9.3 Výsledky

### 9.3.1 Měření zrychlení

#### 9.3.1.1 Maximální amplituda zrychlení z „drop“ testů

Drop testy představují velmi jednoduchý snadno proveditelný typ zkoušky, při kterém se dvojkolí podvozku pohybuje na kolejnicích, které jsou vzájemně posunuty o určitou výšku. Při přejezdu dvojkolí z výše umístěné kolejnice na nižší je toto dvojkolí vystaveno skokové změně, která je dána rozdílem výšek obou kolejí, viz foto 9-6. Celý systém vagón, podvozek, dvojkolí na tuto skokovou změnu reagují, při použití snímačů zrychlení a zdvihů lze snadno identifikovat maximální dosažené zrychlení či vzájemný pohyb mezi vagónem a podvozkem. Z časových charakteristik těchto veličin lze usuzovat na útlum celé této soustavy. Zkoušky byly provedeny opakovaně pouze pro úroveň zatížení L2 (600 kg) pro různé pádové výšky, tj. offset obou kolejnic, viz tab. 9-3. Za účelem vyloučení vlivu druhého vozu byly pro tento typ výzkumu dynamických vlastností pro všechny dropy oba vagóny, tj. GFRP a standardní vagón s ocelovými podvozky, rozpojeny.

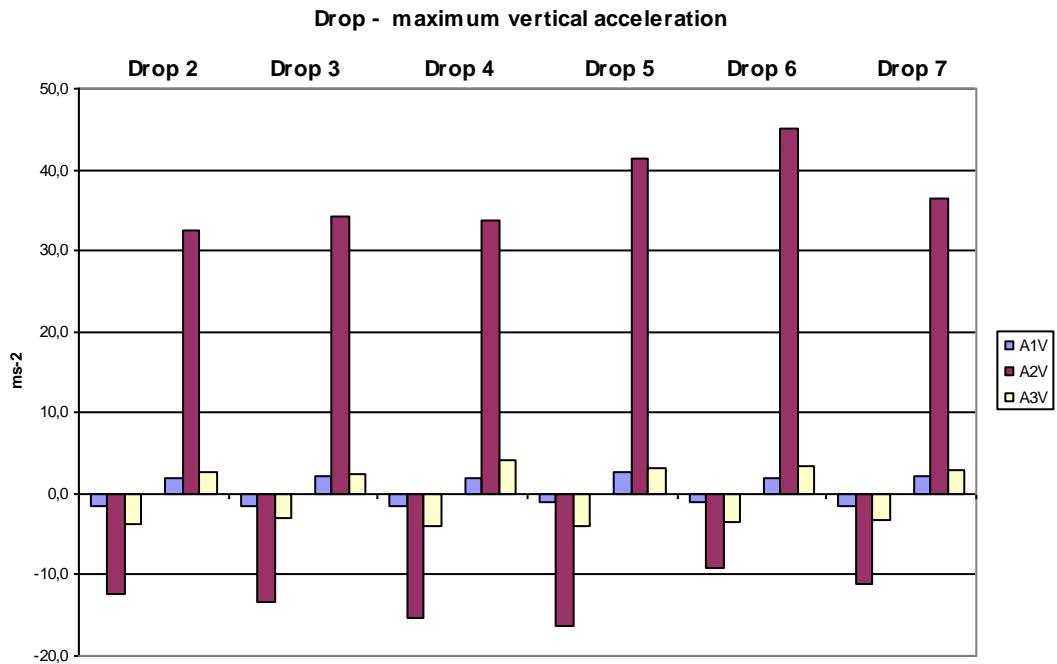


Foto 9-6 Rozdílná výška kolejnic při drop testu

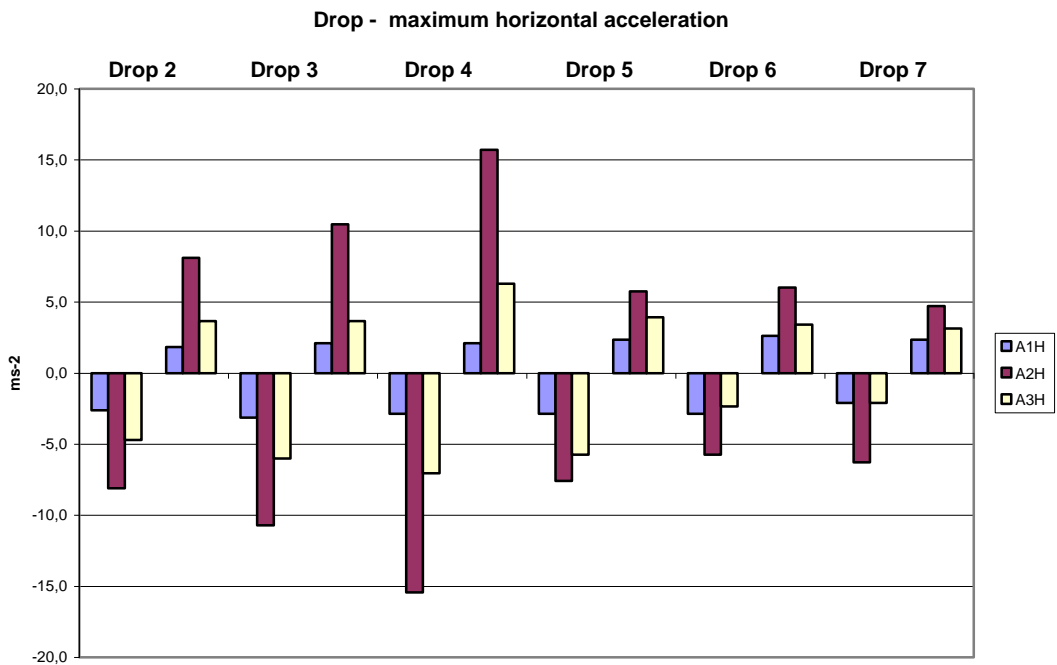
Označení	Velikost
Drop1	6,5 [mm]
Drop2	6,5 [mm]
Drop3	6,5 [mm]
Drop4	6,5 [mm]
Drop5	10 [mm]
Drop6	10 [mm]
Drop7	10 [mm]

Tab. 9-3 Výšky pádu

Jak je vidět na obr. 9-8, velikosti amplitud před tlumením jsou větší než velikost amplitud, které jsou po tlumení. Tyto velikosti amplitud standardního podvozku jsou větší, než velikosti amplitud GFRP podvozku. Velkou schopnost obou materiálů tlumit první ráz lze pozorovat na následujících grafech. Pozitivní hodnoty amplitud jsou vždy vyšší než u druhého rázu při záporných hodnotách změřených amplitud. Velikosti amplitud horizontálního zrychlení jsou menší než velikosti amplitud vertikálních zrychlení, viz obr 9-9.



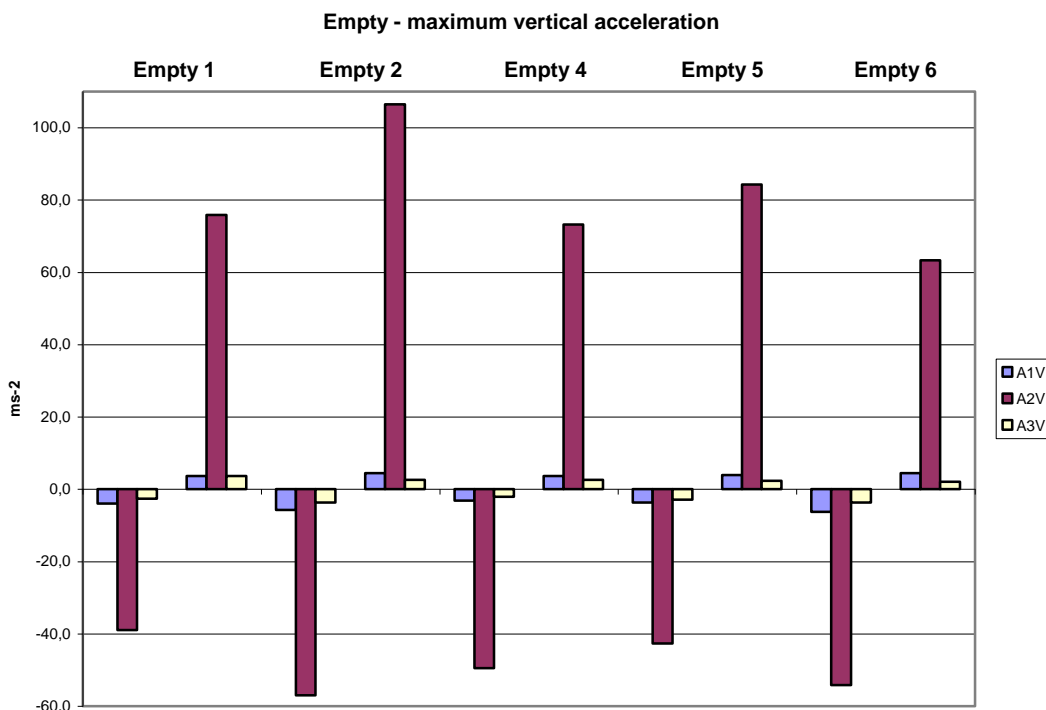
Obr. 9-8 Maximální vertikální zrychlení při drop testech



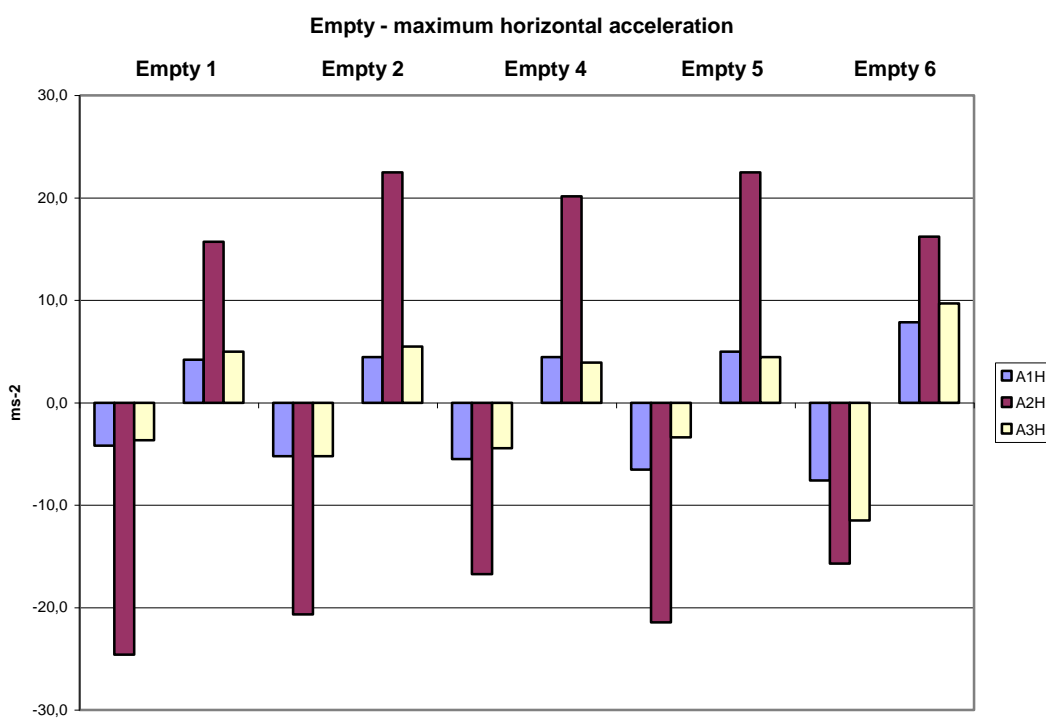
Obr. 9-9 Maximální horizontální zrychlení při drop testech

### 9.3.1.2 Maximální amplitudy zrychlení při prázdném vagónu - Empty

Maximální amplitudy zrychlení v důsledku vlivu tratě pro prázdný vagón zatížený pouze svojí vlastní hmotností jsou patrné z obr. 9-10 pro vertikální směr a 9-11 pro směr horizontální.



Obr. 9-10 Maximální vertikální zrychlení – vliv trati

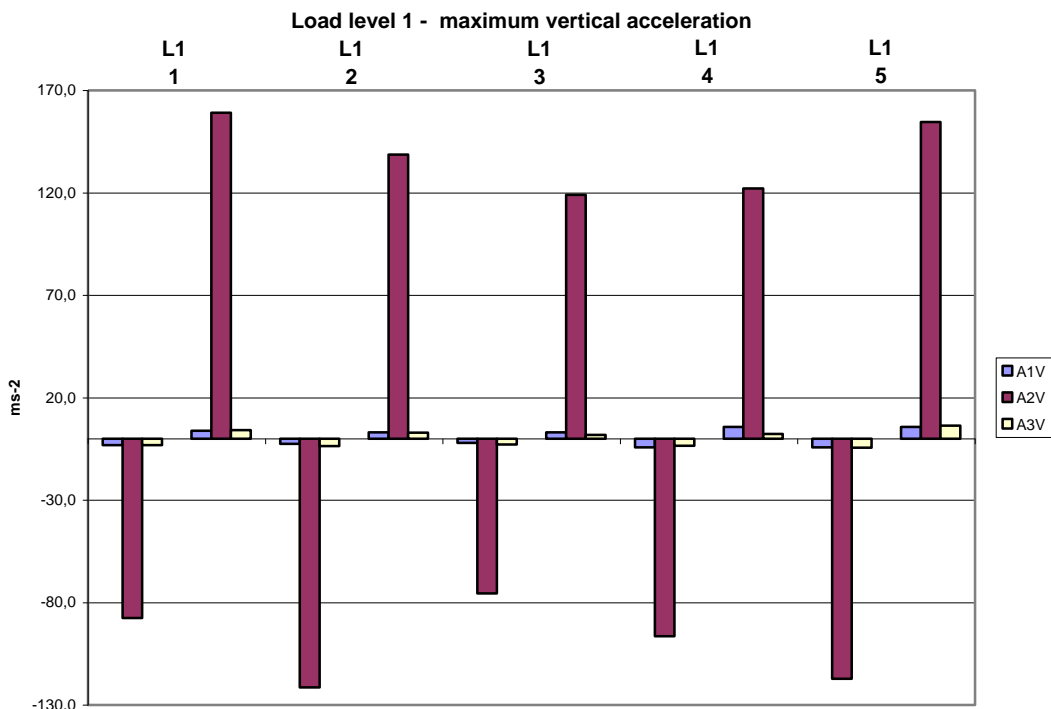


Obr. 9-11 Maximální horizontální zrychlení – vliv trati

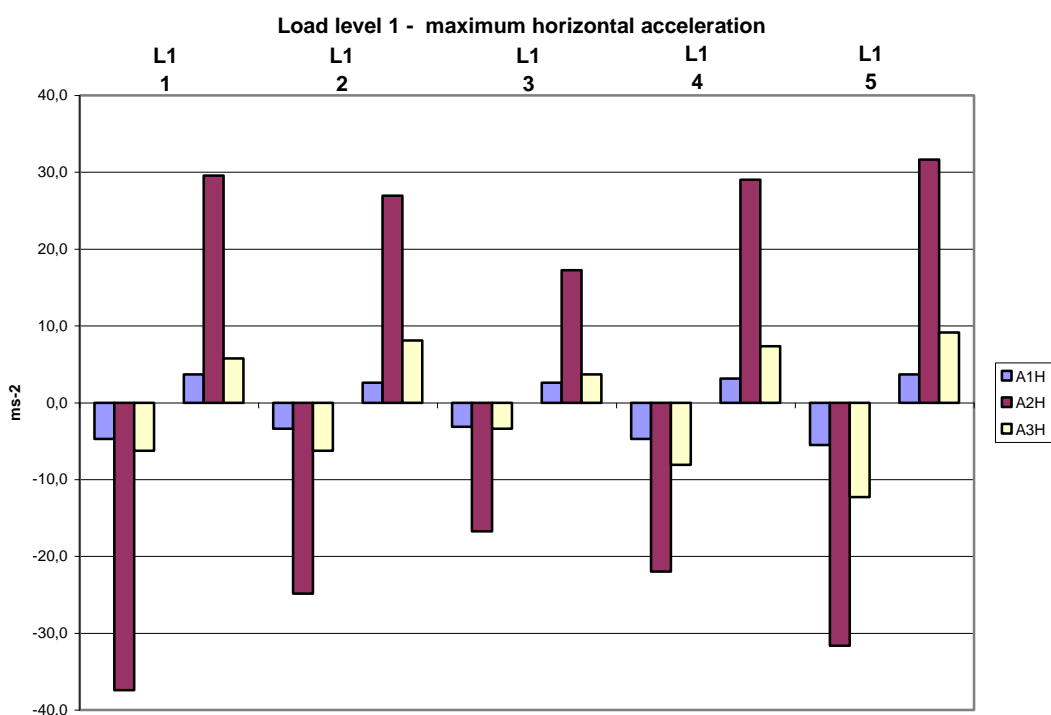


### 9.3.1.3 Maximální amplitudy zrychlení pro úroveň zatížení L1

Maximální amplitudy zrychlení v důsledku vlivu tratě pro úroveň zatížení L1 jsou patrné z obr. 9-12 pro vertikální směr a 9-13 pro směr horizontální. Přidaná hmotnost byla 380 kg.



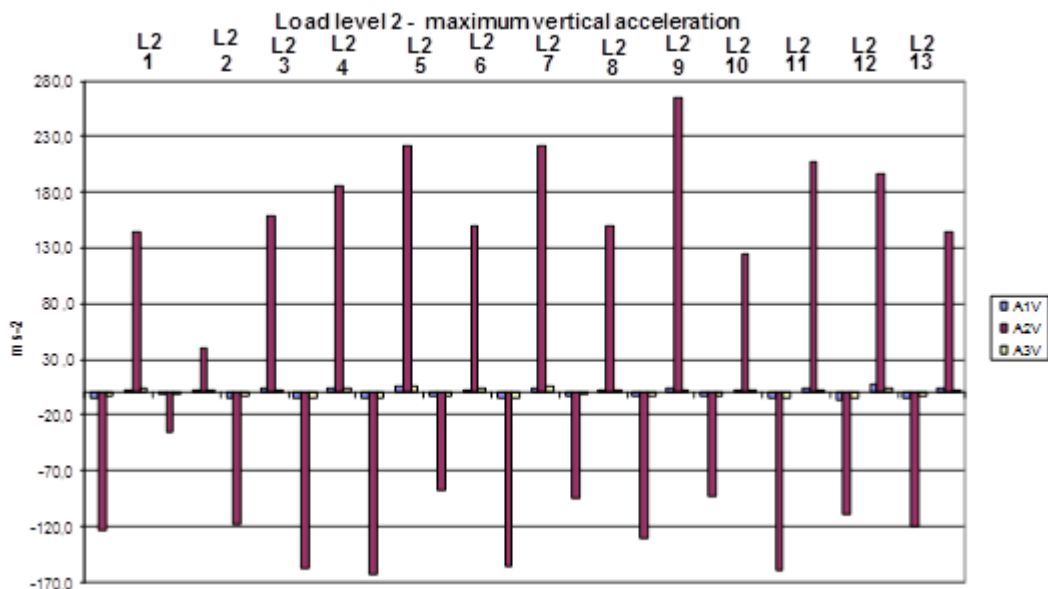
Obr. 9-12 Maximální vertikální zrychlení – L1 - vliv trati



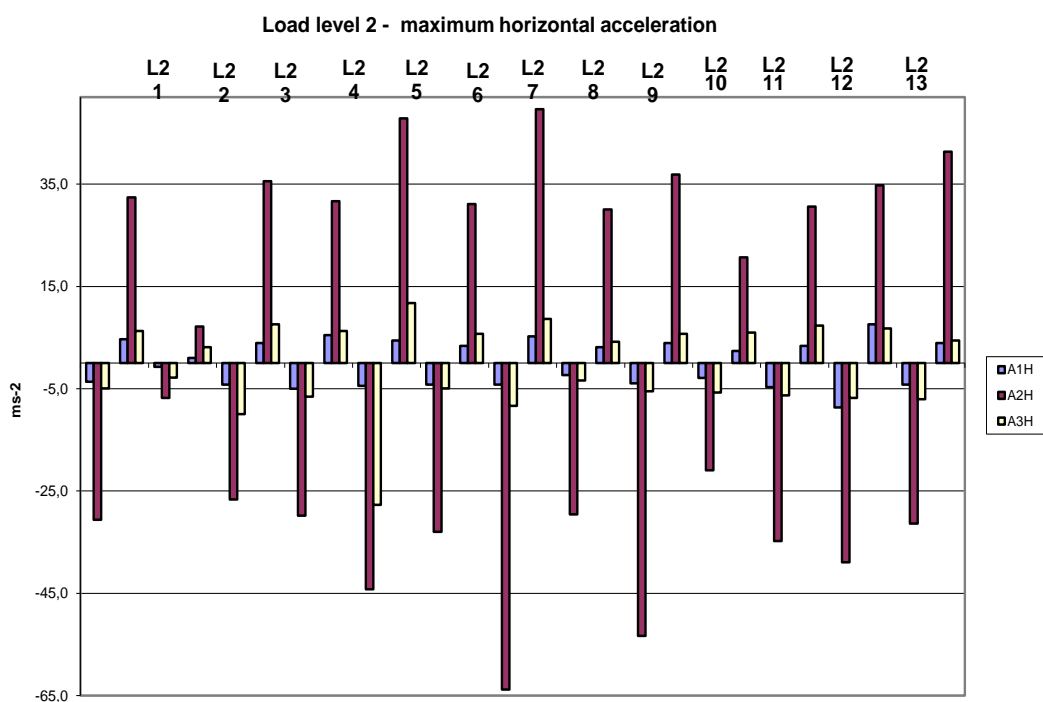
Obr. 9-13 Maximální horizontální zrychlení – L1 - vliv trati

### 9.3.1.4 Maximální amplitudy zrychlení pro úroveň zatížení L2

Maximální amplitudy zrychlení v důsledku vlivu tratě pro úroveň zatížení L2 jsou patrné z obr. 9-14 pro vertikální směr a 9-15 pro směr horizontální. Přidaná hmotnost byla 600 kg.



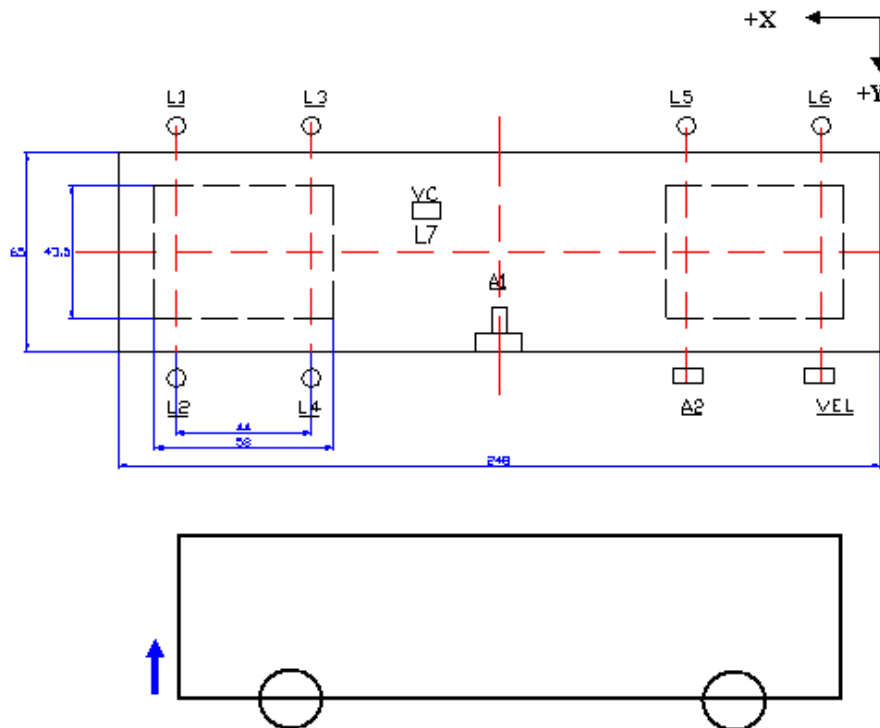
Obr. 9-14 Maximální vertikální zrychlení – L2 - vliv tratě



Obr. 9-15 Maximální horizontální zrychlení – L2 - vliv tratě

### 9.3.2 Měření pomocí snímačů posuvů

V průběhu výzkumu provozních charakteristik na trati v Easteigh bylo použito šest LVDT snímačů pro měření posuvů mezi šasí a podvozkem ve svislém směru. Jeden LVDT snímač posuvu byl využit pro monitorování horizontálního pohybu mezi šasí a GFRP podvozkem. Rozmístění těchto snímačů na vagónu dokumentuje obr. 9-16, horizontální snímač také foto 9-7. Ten byl použit pro měření úhlového natočení otočného podvozku vzhledem k šasí vagónu.



Obr. 9-16 Rozmístění snímačů posuvů

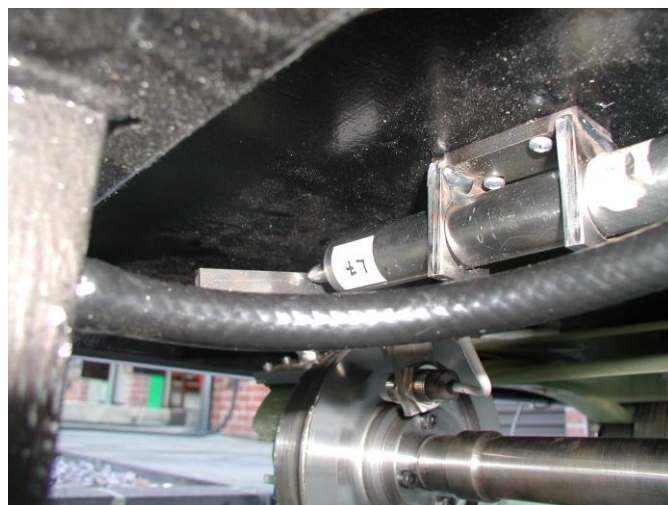
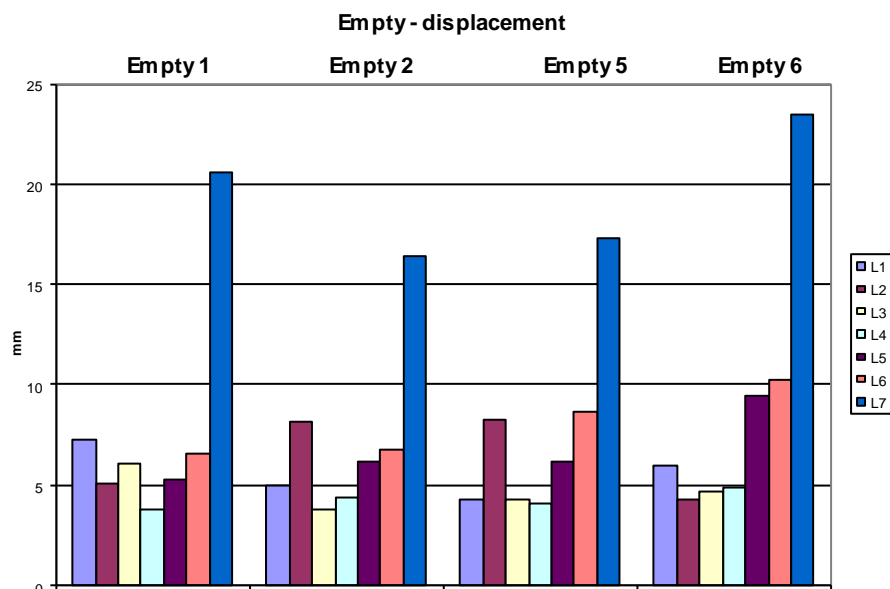


Foto 9-7 Snímač L7

### 9.3.2.1 Maximalní amplitudy výchylek s prázdným vagónem - Empty

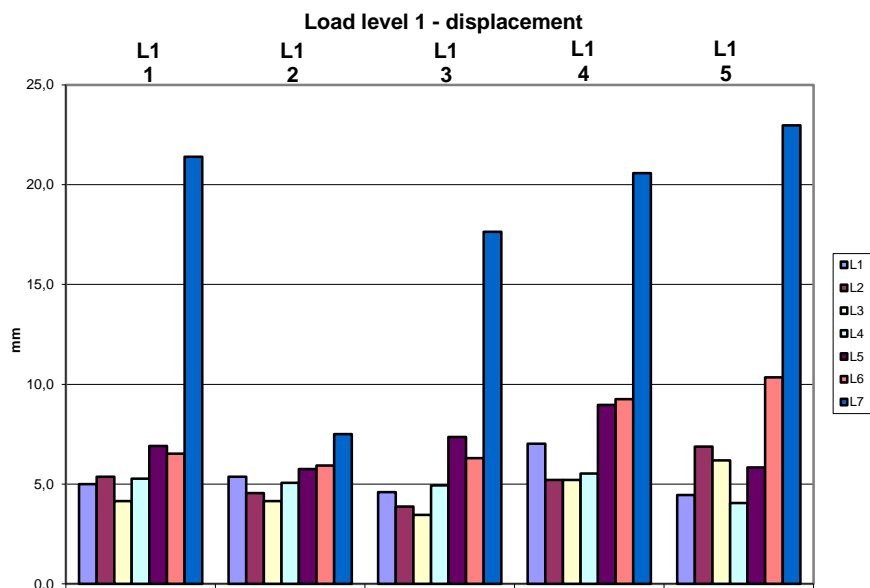
Maximální amplitudy zdvihů LVDT snímačů v důsledku vlivu trati při prázdném vagónu jsou znázorněny v následujícím grafu, viz obr. 9-17.



Obr. 9-17 Maximální amplitudy výchylek – vliv trati

### 9.3.2.2 Maximalní amplitudy výchylek pro úroveň zatížení L1

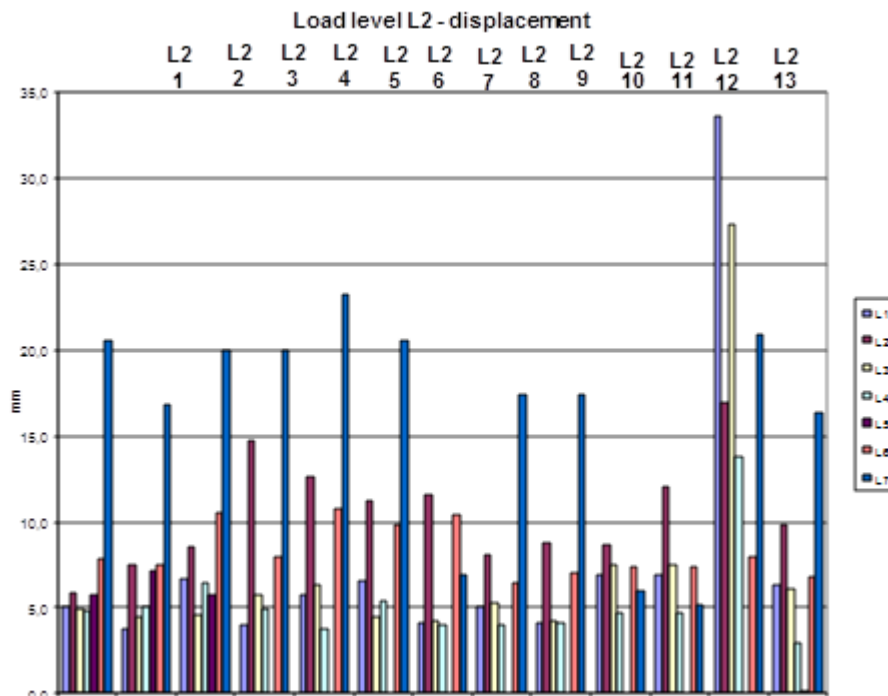
Maximální amplitudy zdvihů LVDT snímačů v důsledku vlivu trati pro úroveň zatížení L1 jsou znázorněny v následujícím grafu, viz obr. 9-18. Přidaná hmotnost byla 380 kg.



Obr. 9-18 Maximální amplitudy výchylek – L1 - vliv trati

### 9.3.2.3 Maximální amplitudy výchylek pro úroveň zatížení L2

Maximální amplitudy zdvihů LVDT snímačů v důsledku vlivu tratě pro úroveň zatížení L2 jsou znázorněny v následujícím grafu, viz obr. 9-19. Přidaná hmotnost byla 600 kg.



Obr. 9-19 Maximální amplitudy výchylek – L2 - vliv trati

### 9.3.3 Detailní rozbor výsledků měření na trati

V následujících kapitolách jsou detailně vyhodnoceny jednotlivé dílčí úseky trati, které mají rozhodující vliv na úroveň zrychlení, kterým jsou při jejich průjezdech GFRP i konvenční podvozky vystaveny. Jsou jimi zejména přejezdy křížících se kolejí (crossing), průjezdy výhybkami (points) a oblouky (curves). Naměřené parametry jsou uvedené v tabulkách, které obsahují informaci o pořadí dané události, její určení na trati v metrech od jejího začátku a dále hodnoty vertikálních a horizontálních zrychlení korespondující pro tuto traťovou událost, obojí jak pro vagón s GFRP podvozky, tak i vagón s podvozky ocelovými. Poslední dva sloupce obsahují informaci, pro který vagón byla hodnota horizontálního, resp. vertikálního zrychlení vyšší.

#### 9.3.3.1 Přejezd křížení kolejí - crossing

Hodnoty horizontálních a vertikálních zrychlení během každého průjezdu kříženými kolejemi jsou pro GFRP a ocelový podvozek uvedeny v tab. 9-4. Z výsledků uvedených v této tabulce vyplývá:

- horizontální zrychlení na vagónu s ocelovými podvozky jsou obecně vyšší než na vagónu s GFRP podvozky (ve 127 případech oproti 6 GFRP)



- maximální hodnota horizontálního zrychlení na vagónu s GFRP podvozky je při průjezdu křížením kolejí č. 5 v sekvenci L2\_12 (8.6 ms<sup>-2</sup>) a v sekvenci L1\_5 při průjezdu křížením kolejí č. 19 pro vagón vybavený ocelovými podvozky (12.3 ms<sup>-2</sup>)
- vertikální zrychlení na vagónu s GFRP podvozky je obecně vyšší oproti vagónu s ocelovými podvozky (v 67 případech oproti 50)
- maximální hodnota vertikálního zrychlení na vagónu s GFRP podvozky je při průjezdu křížením kolejí č. 5 v sekvenci L2\_12 (7.1 ms<sup>-2</sup>) a v sekvenci L1\_5 při průjezdu křížením kolejí č. 4 pro vagón vybavený ocelovými podvozky (6.3 ms<sup>-2</sup>)

Crossing No.	Distance on track (m)	Test number	Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Higher horizontal accel.	Higher vertical accel.
1	56,3	E_1	4,2	3,1	2,9	3,7	GRP	ST
		L1_1	3,7	3,4	3,7	2,1		GRP
		L1_5	5,2	5,2	5,0	4,5	GRP	GRP
		L2_1	4,7	4,2	4,2	3,1	GRP	GRP
		L2_4	5,5	4,7	3,9	3,4	GRP	GRP
		L2_6	3,7	3,1	4,7	3,4	ST	ST
L2_12	4,2	3,7	4,2	2,3		GRP		
2	67,5	E_1	3,4	3,1	4,2	1,6	ST	GRP
		L1_1	2,1	1,0	3,7	1,3	ST	ST
		L1_5	3,4	3,3	5,0	2,3	ST	GRP
		L2_1	1,6	1,0	2,6	1,0	ST	
		L2_4	2,1	1,0	5,5	2,6	ST	ST
		L2_6	1,6	1,3	3,4	1,8	ST	ST
L2_12	1,6	0,8	3,1	1,3	ST	ST		
3	140,65	E_1	2,3	2,6	3,4	1,8	ST	GRP
		L1_1	3,1	3,1	3,7	1,6	ST	GRP
		L1_5	5,0	3,4	5,2	3,7	ST	ST
		L2_1	1,8	0,5	4,2	1,8	ST	ST
		L2_4	3,7	3,0	4,2	1,8	ST	GRP
		L2_6	1,6	0,9	3,9	2,6	ST	ST
L2_12	3,1	2,9	3,9	2,1	ST	GRP		
4	172,43	E_1	4,2	3,1	5,0	1,8	ST	GRP
		L1_1	4,4	2,6	6,3	3,1	ST	ST
		L1_5	5,5	2,4	9,4	6,3	ST	ST
		L2_1	2,6	2,9	6,3	4,7	ST	ST
		L2_4	3,1	1,8	6,3	3,1	ST	ST
		L2_6	3,4	2,7	5,7	3,1	ST	ST
L2_12	3,4	2,9	5,0	2,3	ST	GRP		
5	259,48	E2	1,6	1,0	1,3	1,0	GRP	
		L1_2	1,6	1,8	2,1	1,0	ST	GRP
		L1_5	1,6	1,8	2,3	1,0	ST	GRP
		L2_2	1,5	0,3	3,1	2,1	ST	ST
		L2_4	2,5	1,6	2,9	1,3	ST	GRP
		L2_12	8,6	7,1	6,8	3,9	GRP	GRP
6	266,82	E2	2,6	2,1	2,1	1,3	GRP	GRP
		L1_2	1,6	1,6	1,6	1,3		GRP
		L1_5	1,5	1,6	1,8	1,6	ST	
		L2_2	0,6	0,3	1,1	0,5	ST	ST
		L2_4	1,8	2,6	2,6	1,0	ST	GRP
		L2_12	7,1	6,0	6,8	4,4	GRP	GRP
7	598,02	E2	3,9	2,3	4,7	2,1	ST	GRP
		L1_2	2,9	1,6	3,4	2,3	ST	ST
		L1_5	2,6	1,8	4,2	1,6	ST	GRP
		L2_2	0,7	0,4	1,1	0,6	ST	ST
		L2_4	2,1	1,8	4,7	2,6	ST	ST
		L2_10	2,3	2,6	3,9	2,3	ST	GRP
8	612,97	E2	2,9	2,6	2,6	1,3	GRP	GRP
		L1_2	2,9	2,1	4,4	2,1	ST	
		L1_5	3,3	2,2	4,3	1,8	ST	GRP
		L2_2	0,5	0,4	1,2	0,7	ST	ST
		L2_4	2,0	1,2	5,7	3,1	ST	ST
		L2_10	2,9	2,1	6,0	3,1	ST	ST
9	733,91	E2	2,9	3,4	2,6	2,1	GRP	GRP
		E4	1,8	1,6	1,0	1,3	GRP	GRP
		L1_3	1,3	1,3	0,8	1,0	GRP	GRP
		L2_2	0,9	0,7	1,1	0,6	ST	GRP
		L2_4	1,6	2,9	5,0	2,6	ST	GRP
		L2_8	0,9	0,6	1,8	1,0	ST	ST
L2_13	1,3	1,4	2,6	1,3	ST	GRP		
10	742,51	E2	2,3	2,1	3,4	1,6	ST	GRP

Tab. 9-4/1 Výsledky z průjezdů kříženými kolejemi

Crossing No.	Distance on track (m)	Test number	GRP bogied wagon		Steel bogied wagon		Higher horizontal accel.	Higher vertical accel.
			Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )		
		E4	1,8	2,8	4,4	1,8	ST	GRP
		L1_3	2,6	2,6	2,6	2,1		GRP
		L2_2	1,0	0,6	1,1	0,7	ST	ST
		L2_4	1,8	3,0	4,8	2,3	ST	GRP
		L2_8	3,1	2,9	2,3	2,1	GRP	GRP
		L2_13	1,4	1,3	2,5	1,3	ST	GRP
		E2	2,6	3,1	2,3	1,6	GRP	GRP
		E4	1,3	1,3	1,3	1,3		
		L1_3	1,3	1,3	1,6	1,3	ST	
		L2_2	0,4	0,4	1,1	0,5	ST	ST
		L2_8	1,0	0,6	2,1	0,8	ST	ST
		L2_13	2,6	2,6	1,8	1,0	GRP	GRP
		E2	2,3	1,0	2,1	1,0	GRP	GRP
		E4	2,3	3,7	1,8	2,6	GRP	GRP
		L1_3	2,1	2,6	3,7	2,8	ST	ST
		L2_2	0,4	0,3	0,5	0,4	ST	ST
		L2_8	0,9	0,8	2,6	1,6	ST	ST
		L2_13	1,0	0,8	1,3	1,0	ST	ST
		E2	2,3	2,3	1,6	1,3	GRP	GRP
		L1_3	2,1	2,6	3,7	2,9	ST	ST
		L1_5	2,3	2,3	3,6	2,3	ST	
		L2_2	0,4	0,4	0,5	0,4	ST	
		L2_5	1,8	1,4	3,6	3,4	ST	ST
		L2_8	0,9	1,8	2,6	2,1	ST	ST
		L2_13	1,0	0,8	1,3	1,0	ST	ST
		E2	2,1	1,3	1,6	2,1	GRP	ST
		L1_3	3,1	2,3	3,4	1,6	ST	GRP
		L1_5	2,1	1,7	3,4	1,8	ST	ST
		L2_2	0,7	0,6	1,4	0,6	ST	
		L2_5	1,5	2,6	3,6	2,9	ST	ST
		L2_8	1,1	0,9	2,3	1,0	ST	ST
		L2_13	1,3	1,3	2,6	2,1	ST	ST
		L1_5	2,1	1,7	3,4	1,8	ST	ST
		L2_5	1,5	2,6	3,7	2,9	ST	ST
		L2_13	1,3	1,3	2,6	2,1	ST	ST
		L1_5	1,9	1,7	2,9	1,6	ST	GRP
		L2_5	0,9	0,5	3,9	1,6	ST	ST
		L2_13	1,1	0,8	1,8	1,0	ST	ST
		E_6	2,9	1,8	2,6	1,6	GRP	GRP
		L1_4	2,3	2,1	2,3	1,3		GRP
		L1_5	0,8	1,3	3,8	0,7	ST	GRP
		L2_3	1,3	1,6	2,1	1,0	ST	GRP
		L2_5	2,9	2,9	3,1	2,1	ST	GRP
		L2_13	1,6	1,6	2,6	1,3	ST	GRP
		E_6	3,4	2,9	2,6	1,3	GRP	GRP
		L1_4	1,3	2,1	2,1	1,3	ST	GRP
		L1_5	0,9	1,4	4,4	0,8	ST	GRP
		L2_3	1,8	1,6	2,3	1,3	ST	GRP
		L2_5	1,8	2,1	2,9	0,8	ST	GRP
		L2_13	1,5	1,5	2,3	1,4	ST	GRP
		E_6	3,1	1,8	1,6	1,0	GRP	GRP
		L1_4	2,6	2,9	8,1	2,3	ST	GRP
		L1_5	2,6	2,5	12,3	3,7	ST	ST
		L2_3	2,6	3,9	9,9	3,7	ST	GRP
		L2_5	2,7	3,9	4,2	3,1	ST	GRP
		L2_13	2,9	3,1	7,1	2,3	ST	GRP
		E_6	2,9	2,6	2,8	1,9	GRP	GRP
		L1_4	2,1	1,6	2,3	1,9	ST	ST
		L1_5	2,1	1,6	2,3	1,3	ST	GRP

Crossing No.	Distance on track (m)	Test number	GRP bogied wagon		Steel bogied wagon		Higher horizontal accel.	Higher vertical accel.
			Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )		
		L2_3	1,3	1,6	2,1	1,0	ST	GRP
		L2_5	1,8	1,6	2,3	1,3	ST	GRP
		L2_13	2,1	1,6	1,6	1,6	GRP	GRP
		E_6	2,8	1,7	2,3	2,0	GRP	ST
		L1_4	2,3	1,8	2,0	2,1	GRP	ST
		L1_5	2,0	1,7	2,4	1,6	ST	GRP
		L2_3	1,5	1,7	2,0	2,3	ST	ST
		L2_5	1,1	0,8	1,8	1,0	ST	ST
		L2_13	2,1	1,6	2,3	1,3	ST	GRP

Tab. 9-4/2 Výsledky z průjezdů kříženými kolejemi

### 9.3.3.2 Průjezd výhybkami - points

Hodnoty horizontálních a vertikálních zrychlení během každého průjezdu výhybkami jsou pro GFRP a ocelový podvozek uvedeny v tab. 9-5.

Point No.	Distance on track (m)	Test number	GRP bogied wagon		Steel bogied wagon		Higher horizontal accel,	Higher vertical accel,
			Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )		
1	60,55	E1	3,9	3,7	3,0	2,9	GRP	GRP
		L1_1	4,7	2,6	5,0	1,8	ST	GRP
		L2_1	4,7	4,2	4,2	1,8	GRP	GRP
		L2_4	4,1	3,2	6,0	3,7	ST	ST
		L2_6	4,2	2,6	4,7	2,1	ST	GRP
		L2_12	4,2	3,7	4,2	3,9	GRP	ST
2	93,42	E1	1,9	1,8	4,4	2,1	ST	ST
		L1_1	1,6	1,6	5,0	1,3	ST	GRP
		L2_1	1,3	0,5	4,2	2,3	ST	ST
		L2_4	2,3	2,1	5,0	3,1	ST	ST
		L2_6	1,1	0,4	4,2	2,1	ST	ST
		L2_12	1,8	0,8	4,7	1,3	ST	ST
3	114,41	E1	3,4	3,4	1,8	3,1	GRP	GRP
		L1_1	2,6	1,6	3,6	1,3	ST	GRP
		L2_1	1,8	1,6	3,9	2,3	ST	ST
		L2_4	2,3	2,1	5,7	3,7	ST	ST
		L2_6	1,8	1,3	3,4	1,6	ST	ST
		L2_12	2,1	0,5	3,4	2,3	ST	ST
4	157,32	E1	3,4	3,9	2,6	1,8	GRP	GRP
		L1_1	4,4	1,6	4,7	2,6	ST	ST
		L2_1	2,3	1,3	6,2	5,0	ST	ST
		L2_4	4,2	2,5	6,5	5,0	ST	ST
		L2_6	3,1	2,9	5,0	2,1	ST	GRP
		L2_12	3,1	2,3	4,2	2,1	ST	GRP
5	915,04	E2	2,1	1,3	1,6	2,1	GRP	ST
		L1_5	2,6	2,3	3,6	2,6	ST	ST
		L2_2	0,7	0,6	1,4	0,6	ST	GRP
		L2_5	1,6	2,6	3,7	2,9	ST	ST
		L2_8	1,1	0,9	2,3	1,0	ST	ST
		L2_13	1,3	1,3	2,6	2,1	ST	ST
6	999,562	E6	3,1	3,4	1,8	1,8	GRP	GRP
		L1_4	3,1	3,1	2,3	1,8	GRP	GRP
		L1_5	4,2	1,3	1,8	1,8	GRP	ST
		L2_5	2,9	2,6	3,4	1,6	ST	GRP
		L2_13	1,1	0,8	1,8	1,0	ST	ST
7	1513,6	E6	3,7	1,8	2,9	1,0	GRP	GRP
		L1_4	1,8	1,0	4,4	3,4	ST	ST
		L1_5	1,2	0,8	4,2	3,9	ST	ST
		L2_3	2,6	3,9	3,4	2,1	ST	GRP
		L2_5	2,9	2,9	10,2	1,8	ST	GRP
		L2_13	1,0	0,8	2,3	1,8	ST	ST
8	1523,8	E6	3,1	1,8	1,6	1,0	GRP	GRP
		L1_4	2,6	2,9	8,1	2,3	ST	GRP
		L1_5	2,6	2,5	12,3	3,7	ST	ST
		L2_3	1,0	1,3	2,3	1,3	ST	GRP
		L2_5	2,7	3,9	4,2	3,1	ST	GRP
		L2_13	2,9	3,1	7,1	2,3	ST	GRP
9	1568,9	E6	3,9	2,6	2,9	1,8	GRP	GRP
		L1_4	2,1	1,6	2,9	2,3	ST	ST
		L1_5	2,6	1,0	3,1	1,3	ST	ST
		L2_3	3,1	2,9	3,4	2,1	ST	GRP
		L2_5	4,2	2,5	27,7	6,3	ST	ST
		L2_13	1,6	1,6	1,6	1,6	GRP	GRP

Tab. 9-5 Výsledky z průjezdů výhybkami

Z výsledků uvedených v tab. 9-5 vyplývá:

- horizontální zrychlení na vagónu s ocelovými podvozky jsou obecně vyšší než na vagónu s GFRP podvozky (ve 40 případech oproti 12 GFRP)
- maximální hodnota horizontálního zrychlení na vagónu s GFRP podvozky je při průjezdu výhybkou č. 1 v sekvenci L1\_1 a L2\_1 (4,7 ms<sup>-2</sup>) a v sekvenci L2\_5 při průjezdu výhybkou č. 9 pro vagón vybavený ocelovými podvozky (27,7 ms<sup>-2</sup>)



- vertikální zrychlení na vagónu s ocelovými podvozky je obecně vyšší oproti GFRP vagónu (v 28 případech oproti 24 GFRP).
- maximální hodnota vertikálního zrychlení na vagónu s GFRP podvozky je při průjezdu výhybkou č. 1 v sekvenci L2\_1 (4,2 ms<sup>-2</sup>) a v sekvenci L2\_5 při průjezdu výhybkou č. 9 pro vagón vybavený ocelovými podvozky (6.3 ms<sup>-2</sup>)

### 9.3.3.3 Průjezd oblouky - curves

Hodnoty horizontálních a vertikálních zrychlení v průjezdech oblouky jsou pro GFRP a ocelový podvozek uvedeny v tab. 9-6.

Curve No.	Distance on track (m)	Test number	GRP bogied wagon		Steel bogied wagon		Higher horizontal accel,	Higher vertical accel,
			Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Horizontal acceleration (ms <sup>-2</sup> )	Vertical acceleration (ms <sup>-2</sup> )		
A	28.6- 46.6	E1	1,8	1,6	1,6	0,8	GRP	GRP
		L1_1	1,3	1,3	2,1	1,3	ST	
		L2_1	1,3	1,6	3,1	1,8	ST	ST
		L2_4	1,8	2,1	3,7	2,9	ST	ST
		L2_6	1,0	1,0	2,2	1,0	ST	
		L2_12	1,3	1,0	2,6	1,6	ST	ST
B	246.13 – 315.13	E2	2,6	2,1	3,7	2,1	ST	
		L1_2	2,8	1,8	5,0	1,8	ST	
		L2_2	0,5	0,4	3,1	2,1	ST	ST
		L2_4	2,3	2,6	5,5	2,3	ST	GRP
		L2_12	8,6	7,0	6,8	4,4	GRP	GRP
C	822.96 – 891.46	E2	2,9	3,1	3,6	2,1	ST	GRP
		E4	3,1	3,7	3,4	2,6	ST	GRP
		L1_3	3,1	2,6	3,7	2,9	ST	ST
		L2_2	0,6	0,5	0,6	0,4		GRP
		L2_8	2,3	1,8	4,2	2,1	ST	ST
		L2_13	2,8	2,6	1,8	1,3	GRP	GRP
D	914.4 – 947.4	E2	2,3	2,1	2,1	1,8	GRP	GRP
		E4	2,3	2,6	2,3	1,0		GRP
		L1_3	1,3	1,3	2,6	1,6	ST	ST
		L2_2	0,7	0,6	1,3	0,6	ST	
		L2_5	3,1	1,8	3,7	2,9	ST	ST
		L2_8	0,5	0,8	1,0	0,8	ST	
E	1346.79 – 1373.79	L2_13	2,3	2,1	2,6	1,8	ST	GRP
		E6	2,9	1,6	2,6	1,6	GRP	
		L1_4	1,8	1,8	3,7	1,8	ST	
		L2_3	2,1	2,3	3,7	2,3	ST	
		L2_5	2,3	2,1	5,2	2,7	ST	ST
F	1409.46 – 1469.46	L2_13	1,6	2,3	2,3	1,1	ST	GRP
		E6	3,7	3,4	11,5	3,7	ST	ST
		L1_4	2,3	2,1	2,3	1,6		GRP
		L2_3	1,8	2,1	2,6	1,0	ST	GRP
		L2_5	2,1	2,1	8,3	2,6	ST	ST
G	1546.34 – 1588.82	L2_13	1,6	1,3	2,6	1,3	ST	
		E6	2,1	2,6	2,6	1,8	ST	GRP
		L1_4	3,7	2,6	8,1	3,4	ST	ST
		L2_3	3,1	3,9	9,9	3,1	ST	GRP
		L2_5	4,2	3,9	27,7	2,3	ST	GRP
H	1676.4 – 1741.4	L2_13	1,9	2,1	2,4	1,5	ST	GRP
		E6	2,9	2,9	2,1	2,1	GRP	GRP
		L1_4	3,1	2,6	2,9	2,3	GRP	GRP
		L2_3	3,4	2,6	3,1	1,8	GRP	GRP
		L2_5	3,1	2,6	4,2	3,1	ST	ST
		L2_13	2,1	2,2	2,4	1,3	ST	GRP
I	1777.26 – 1802.26	E6	1,8	2,1	1,6	1,0	GRP	GRP
		L1_4	1,8	1,8	2,3	1,8	ST	
		L2_3	1,8	1,3	2,1	1,8	ST	ST
		L2_5	2,3	1,8	2,9	2,1	ST	ST
		L2_13	2,0	1,7	1,5	1,4	GRP	GRP

Tab. 9-6 Výsledky z průjezdů oblouky

Z výsledků uvedených v tab. 9-6 vyplývá:

- horizontální zrychlení na vagónu s ocelovými podvozky jsou obecně vyšší než na vagónu s GFRP podvozky (ve 36 případech oproti 10 GFRP)
- maximální hodnota horizontálního zrychlení na vagónu s GFRP podvozky je při průjezdu obloukem B v sekvenci L2\_12 (8,6 ms<sup>-2</sup>) a obloukem G v sekvenci L2\_5 pro vagón vybavený ocelovými podvozky (27,7 ms<sup>-2</sup>)
- vertikální zrychlení na vagónu s GFRP podvozky je obecně vyšší oproti vagónu s ocelovými podvozky (v 23 případech GFRP oproti 15)
- maximální hodnota vertikálního zrychlení na vagónu s GFRP podvozky je při průjezdu obloukem B v sekvenci L2\_12 (7,0 ms<sup>-2</sup>) a v sekvenci L2\_12 při průjezdu obloukem B pro vagón vybavený ocelovými podvozky (4,4 ms<sup>-2</sup>)

### 9.3.4 Analýza výsledků

Tyto výsledky naznačují, že GFRP podvozek v měřítku 1:1 pokud si zachová vlastnosti pětinového modelu, může být „track friendly“ s významnou redukcí kontaktní únavy dvojkolí. Další výhodou by byla nízká hmotnost umožňující větší užitečné zatížení.

Z analýzy maximální hodnoty zrychlení je zřejmé, že horizontální zrychlení jsou menší u vagónu, který byl vybaven GFRP podvozky. Tato skutečnost je velmi důležitá z pohledu údržby tratí, neboť velká boční zrychlení u neodpružených hmot mají devastující účinky na tratě.

Ve vertikální rovině jsou zrychlení obou zkoumaných typů podvozků srovnatelná, i když obecně je odezva na vagón s GFRP podvozky nižší. Je třeba poznamenat, že vertikální tuhost GFRP podvozku byla 1,2 kN / mm a ocelového podvozku 0,83 kN / mm, příčné tuhosti byly 4 kN/mm pro GFRP a 2,1 kN/mm pro ocelové podvozky, hmotnost vagónu s ocelovými podvozky byla pouhých 85 kg, zatímco pro GFRP podvozky 380, resp. 600 kg.

V dalších kapitolách je disertační práce zaměřena na experimentální výzkum vlastností nejvíce namáhaných prvků rámu GFRP podvozku, kterými jsou podélníky spodního rámu podvozku. Těmi je svislé zatížení od hmotnosti vagónu transmitováno na trať. Další výzkum je zaměřen na příčník spodního rámu podvozku s uchycením brzdového systému. Disertační práce se ve své poslední etapě dále zabývá výzkumem dynamického chování celého GFRP podvozku s využitím vlastních, jak výzkumných metodik autora, tak i vyvinutého speciálního zkušebního standu.



## 10 Výzkum pevnostního dílu – podélník

Prvkem kompozitové konstrukce rámu GFRP podvozku, který kromě své klíčové funkce, tj. transfer vertikálního zatížení ze skříně vagónu do podvozku a traťového podloží, musí splňovat také požadavky na vypružení, tlumení a statickou i únavovou pevnost, je podélník spodního rámu. Oba tyto podélníky jsou integrovány spolu s příčnickem do horního a spodního rámu. Spodní rám tvoří jeden celek obsahující dva podélníky a jeden příčník. Kvalitní výroba podélníku metodou RTM, vzhledem k vyjmenovaným specifickým požadavkům, je velmi náročná a komplikovaná a z tohoto důvodu se prvotní výzkum věnoval pouze konstrukci samostatných podélníků, které spolu s příčnickem netvořily jeden celek. Tloušťka podélníku je cca 200 mm, obsahuje více než 100 vrstev skleněné tkaniny s různou orientací vláken, po uzavření formy je tato vakuově plněna pryskyřicí za vzniku exotermické reakce. Z tohoto důvodu je třeba formu v různých místech rozdílně ochlazovat, aby tuhnutí pryskyřice probíhalo za více méně konstantní teploty, která nesmí být příliš nízká, aby umožňovala plynulé plnění formy. Nesmí být ale ani příliš vysoká, aby nedocházelo k odpařování pryskyřice a následné tvorbě bublin, které by ve výsledné struktuře způsobovaly degradaci pevnostních vlastností výsledného konstrukčního dílu. Rozhodnutí provádět výzkum vlastností podélníků odděleně od spodního rámu se ukázalo jako správné, vlivem vysoké náročnosti na výrobu bylo postupně vyrobeno několik podélníků, až sedmý a osmý mohly být podrobeny testům s nadějí, že budou vykazovat požadované pevnostní vlastnosti. Cílem testů bylo ověřit statickou odolnost podélníků vůči zatížení, kterému budou vystaveny v provozních podmínkách. Následně byly podélníky vystaveny rozmitání – sweep testu v rozsahu frekvencí 0 až 30 Hz pro čtyři různé úrovně statického předpětí s cílem nalést vlastní frekvence těchto prvků.

Kompletní uspořádání testů je patrné z foto 10-1. Zkušební sestava podélníku obsahuje horní i spodní část, které jsou spolu s nápravovou kravatou namontovány do ložiskových domků. Nápravy jsou při tomto uspořádání nahrazeny silnostěnnými trubkami, které umožňují odvalování po tuhé podpoře, která je tvořena robustními ocelovými profily. Při aplikaci svislé síly pomocí zatěžovacího servoválece v místě styku podélníku se skříní vagónu tento vzájemný pohyb umožňoval podélnou deformaci kompletního podélníku a tedy zabezpečoval proměnný rozvor náprav v důsledku svislého zatížení podélníku. Svislá zatížení byla aplikována prostřednictvím tuhé desky s pomocí jednoho hydraulického válce o jmenovité síle 250 kN a zdvihem 250 mm. Tento zatěžovací systém byl řízen řídicí elektronikou Labtronic 8800 německého výrobce IST.

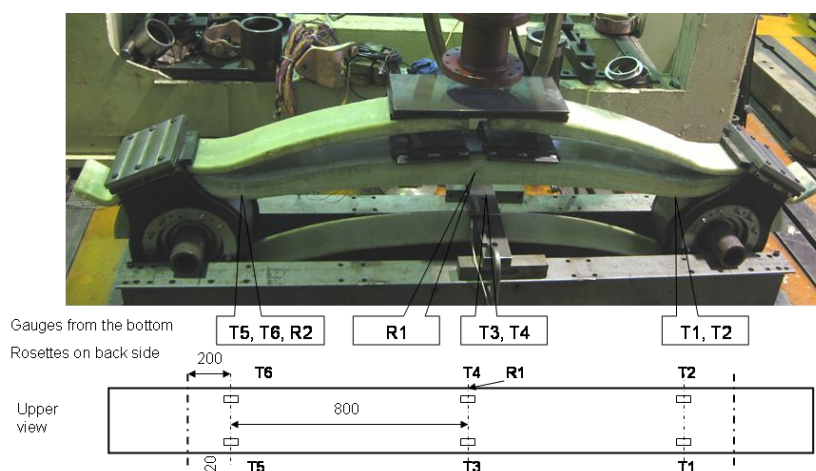


Foto 10-1 Uspořádání zkušební sestavy

## 10.1 Instrumentace zkoušky

Na spodní podélník číslo 7 bylo nainstalováno 6 tenzometrů typu HMB LY11 6/120, viz foto 10-1. Na svislou stěnu podélníku v místě působící svislé síly byla nalepena tenzometrická růžice R1 značky Vishay SR-4 FAER-25R-35-S6EL, viz foto 10-2.

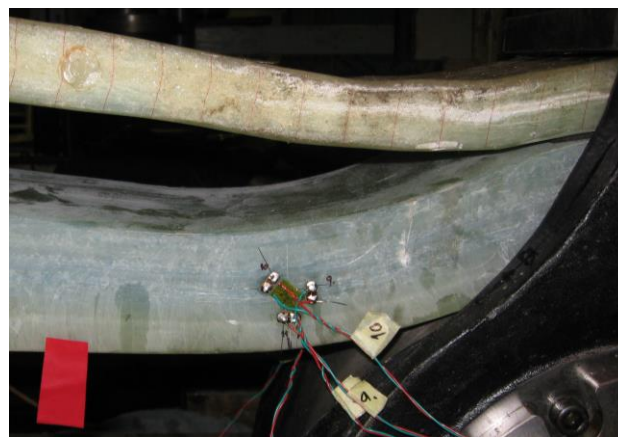
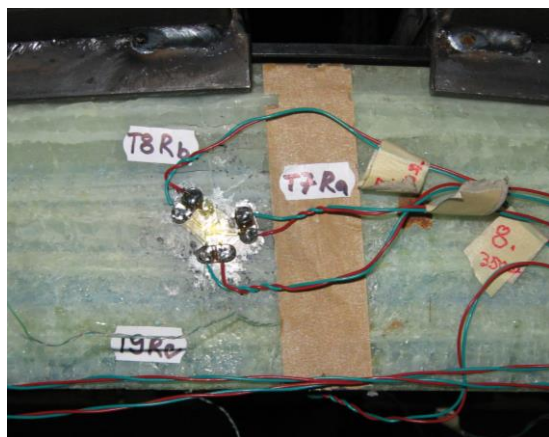


Foto 10-2 Pozice tenzometrické růžice R1

Foto 10-3 Pozice tenzometrické růžice R2, #8

Na podélník číslo 8 byla navíc nalepena tenzometrická růžice R2 stejného typu i výrobce, její pozice na boční stěně podélníku v blízkosti jeho vyústění do ložiskového domku je uvedena na foto 10-3. Všechny tenzometry i růžice byly nalepeny s použitím adhézního lepidla Z7 firmy HBM. Průhyb podélníku byl měřen leserovým snímačem Micro-Optronics optoNCDT 1401 s rozsahem 250 mm. V průběhu testů byla dále zaznamenávána působící síla a posuv pístnice hydraulického zatěžovacího servoválce. K měření byly použity dvě měřicí ústředny SPIDER8 firmy HBM.

## 10.2 Provedení testů

Testy byly provedeny ve dvou krocích. V prvním kroku byly podélníky zatěžovány statickou silou simulující různou hmotnost skříně vagónu působící na podélník podvozku. Ve druhém kroku byly provedeny dynamické testy sweepem s konstantní amplitudou buzení a s proměnou frekvencí zatěžování.

### 10.2.1 Static test

GFRP podélníky byly zatěžovány s postupně narůstající svislou silou po 5 kN. Podélník číslo 7 byl takto zatěžován až do limitní síly 100 kN, poté následovala pečlivá prohlídka a odlehčení. Následně bylo zatěžování opakováno až do maximální síly 130 kN a podobně pak do 190 kN. Při již 50 kN zatížení se objevila první malá delaminace, k rozsáhlé delaminaci došlo po dosažení třetího maxima 190 kN přibližně po minutové výdrž na tomto maximu. Delaminace byla doprovázena poměrně výrazným zvukem.

Podobně byl zatěžován podélník číslo 8 až do hodnot 130 kN, 225 kN a 250 kN s odlehčováním mezi těmito maximy. Při této zkoušce nedošlo k žádné delaminaci spodního podélníku. Maximální síla 250 kN reprezentovala 25 % maximálního zatížení vagónu.

## 10.2.2 Sweep test

Pro sweepové testy byl hydraulický zatěžovací servoválec řízen v režimu řízené dráhy jeho pístnice. Amplituda rozmítání byla 1 mm. Frekvence se měnila v interval  $<0; 30>$  Hz s rychlostí změny frekvence  $0.2 \text{ Hz}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zkouška byla provedena opakovaně pro čtyři úrovně předpětí:  $F = \{30; 50; 70; 90\}$  kN.

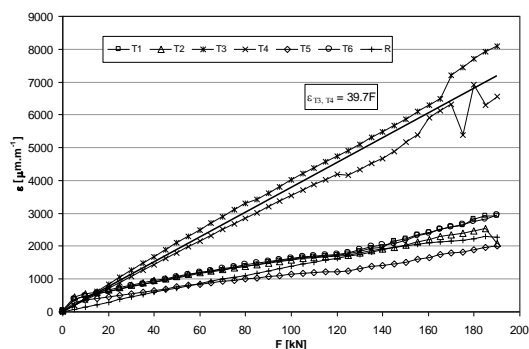
## 10.3 Vyhodnocení testů

### 10.3.1 Static test

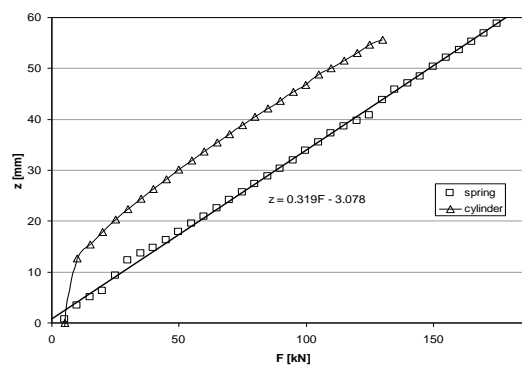
Výsledky statických testů jsou pro jednotlivé tenzometry a snímače posuvu zobrazeny v příslušných grafech. Pro tenzometrické růžice byly podle příslušných standardů vyhodnoceny smykové deformace a tyto vyneseny do příslušných grafů.

#### 10.3.1.1 Podélník #7

Výsledky pro tento podélník jsou neuspokojivé, neboť u něho došlo k delaminaci při poměrně malé síle 50 kN. Tato byla následována rozsáhlou delaminací krátce po dosažení síly 190 kN. Tyto delaminace jsou patrné z foto 10-4. Závislost deformace na zatěžovací síle je vynesena do grafu na obr. 10-1, závislost dráhy pístnice a laserového snímače posuvu na působící síle je vynesena v grafu na obr. 10-2.



Obr. 10-1 Deformace vs. síla, #7



Obr. 10-2 Dráha vs. síla, #7



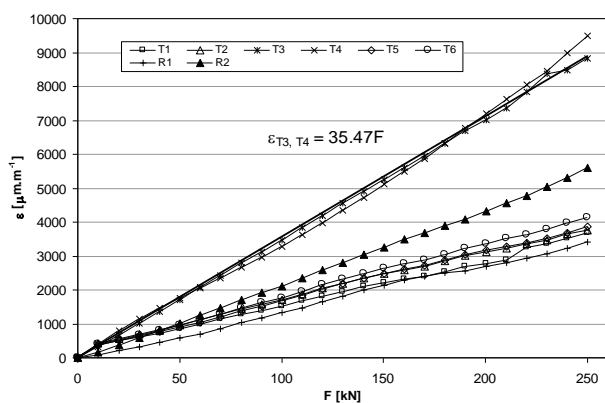
Foto 10-4 Delaminovaný podélník #7

### 10.3.1.2 Podélník #8

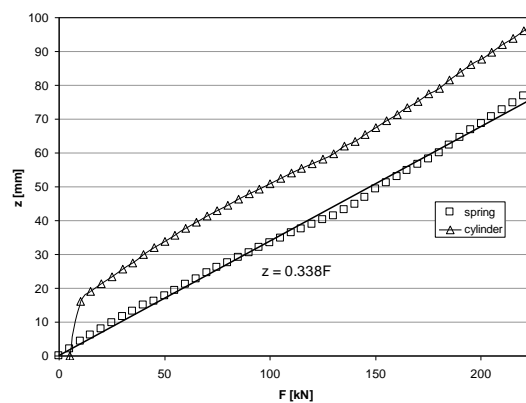
Spodní podélník číslo 8 splnil podmínku maximální síly a bez delaminace odolal aplikované síle 250 kN, viz foto 10-5. Naměřené deformace v závislosti na zatěžovací síle jsou uvedeny v grafu na obr. 10-3, závislost dráhy pístnice a laserového snímače posuvu na působící síle je vynesena v grafu na obr. 10-4.



Foto 10-5 Podélník #8 při statickém zatížení  $F = 250$  kN



Obr. 10-3 Deformace vs. síla, #8



Obr. 10-4 Dráha vs. síla #8

### 10.3.1.3 Diskuze výsledků

Následující efekty byly pozorovány a vyhodnoceny po ukončení testů:

- zbytkový průhyb spodního podélníku #8 po odlehčení síly z 250 kN na nulu byl 5.2 mm
- nápravová kravata u podélníku #8 se po odlehčení z maximální síly 250 kN nevrátila do původní pozice a zůstala vytažena cca 50 mm. To ukazuje na nedostatečnou hodnotu přitlačné síly spodní desky zabezpečující sevření nápravové kravaty k vnějšímu



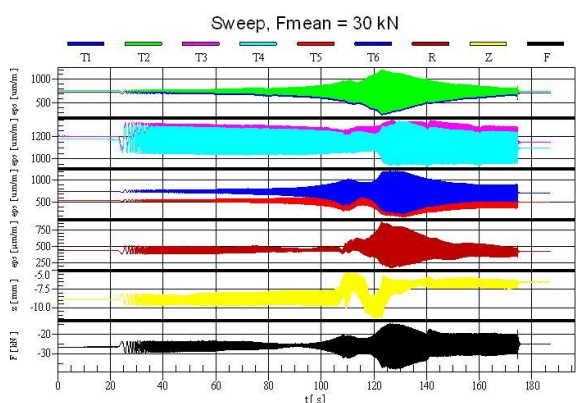
ložiskovému kroužku, případně nesprávné vzájemné poměry drsnosti obou těchto kontaktních prvků

- průměrné deformace odečtené na tenzometru T3 a T4 i průhyb podélníku v závislosti na působící síle jsou přibližně lineární, rovnice těchto závislostí jsou uvedeny v příslušných grafech. Je zřetelné, že jak tuhost, tak i deformace obou podélníků jsou téměř shodné
- smyková deformace, vyhodnocená z dílčích deformací tenzometrických růžic, je téměř 2x vyšší v blízkosti ložiskového domku než ve středu podélníku avšak stále nižší než je tomu u tenzometrů namáhaných ohybem
- zvětšení rozvoru obou náprav při zatěžující síle  $F = 200$  kN bylo 60 mm

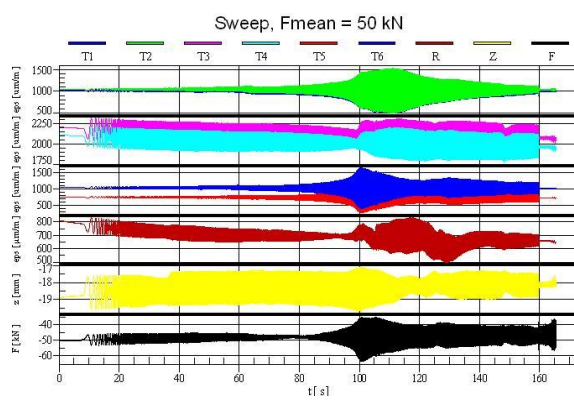
## 10.3.2 Sweep test

### 10.3.2.1 Podélník #7

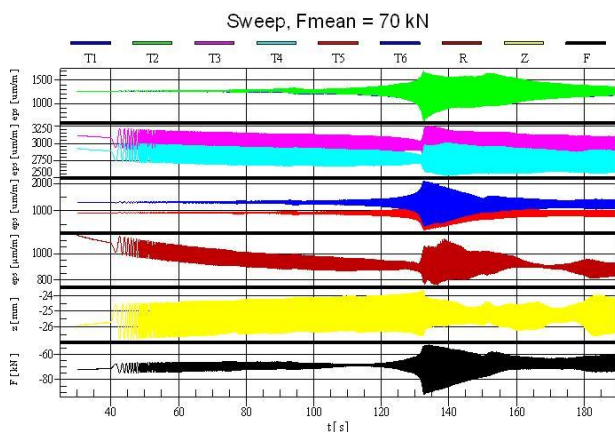
Záznamy signálů tenzometrů získané při zkoušce sweepem jsou pro různé hodnoty předpětí zatěžovací síly uvedeny na obr. 10-5 až 10-8. Spektrální výkonové hustoty těchto průběhů jsou uvedeny na obr. 10-9.



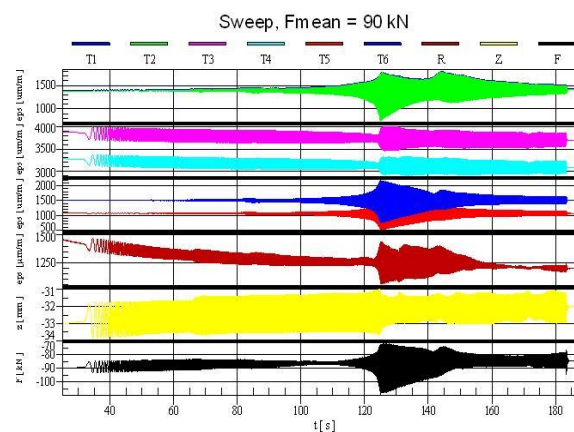
Obr. 10-5 Statické předpětí  $F = 30$  kN, #7



Obr. 10-6 Statické předpětí  $F = 50$  kN, #7

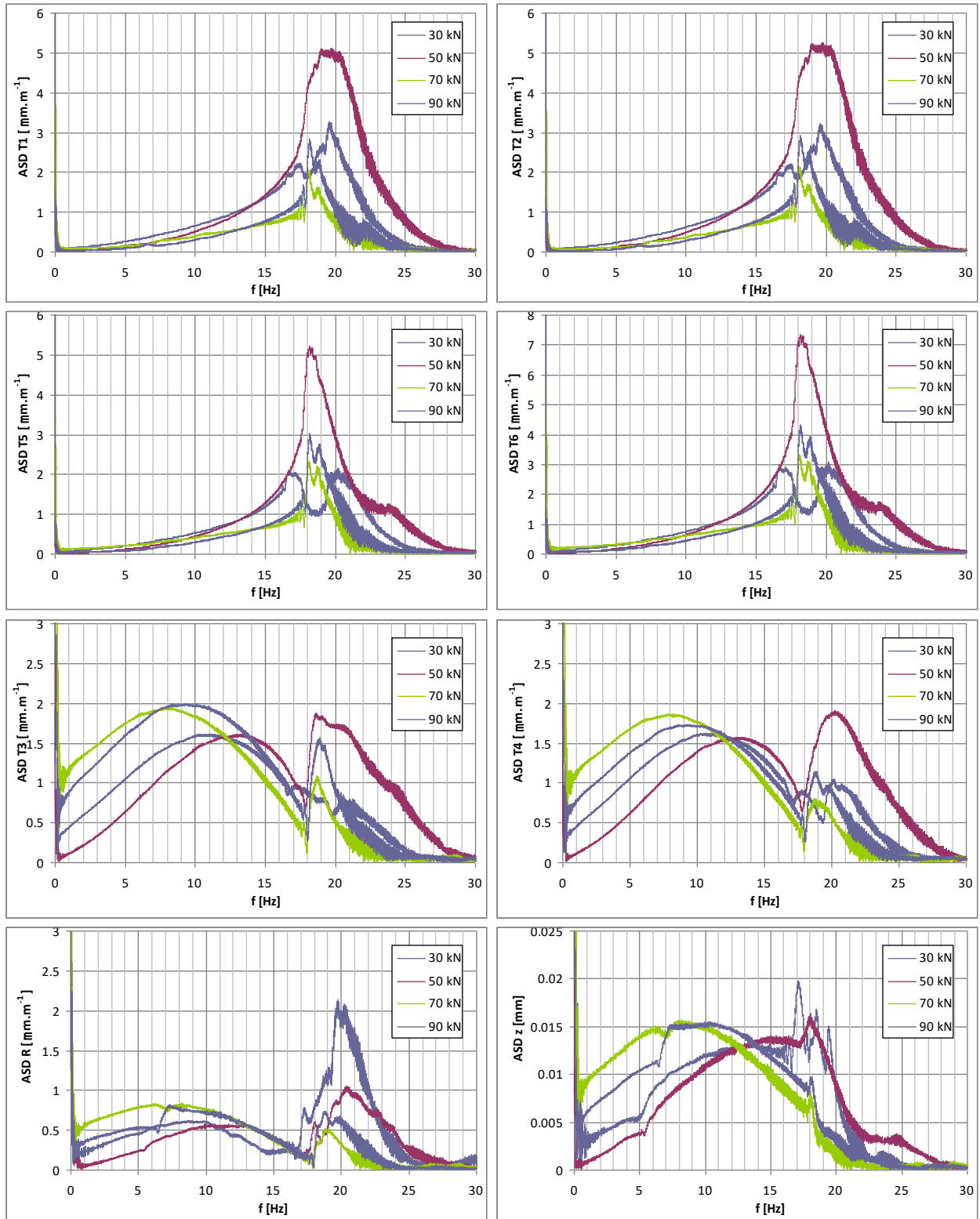


Obr. 10-7 Statické předpětí  $F = 70$  kN, #7



Obr. 10-8 Statické předpětí  $F = 90$  kN, #7

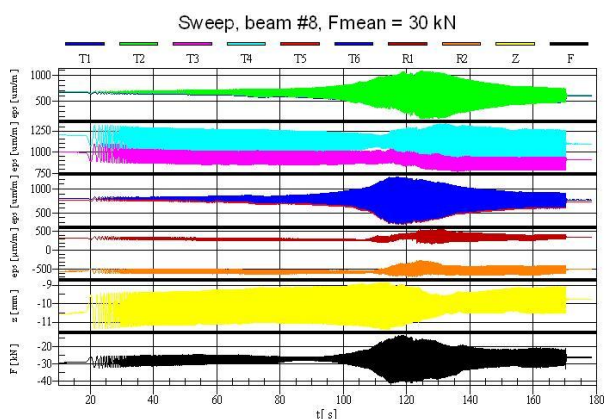




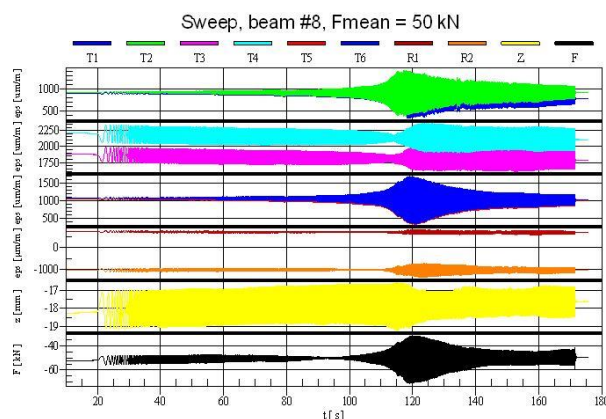
Obr. 10-9 Spektrální výkonová hustota průběhů tenzometrů při sweep testu podélníku #7

### 10.3.2.2 Podélník #8

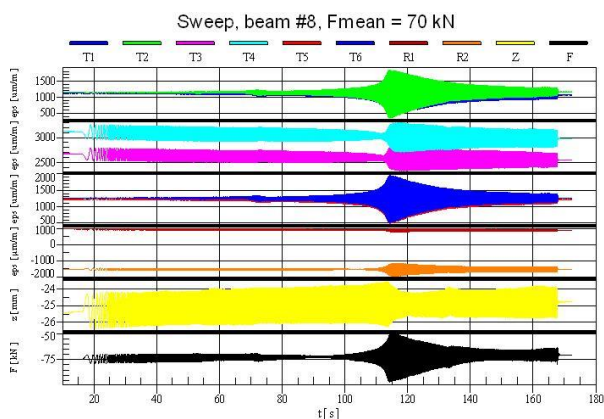
Záznamy signálů tenzometrů získané při zkoušce sweepem jsou pro různé hodnoty předpětí zatěžovací síly uvedeny na obr. 10-10 až 10-13. Spektrální výkonové hustoty těchto průběhů jsou uvedeny na obr. 10-14.



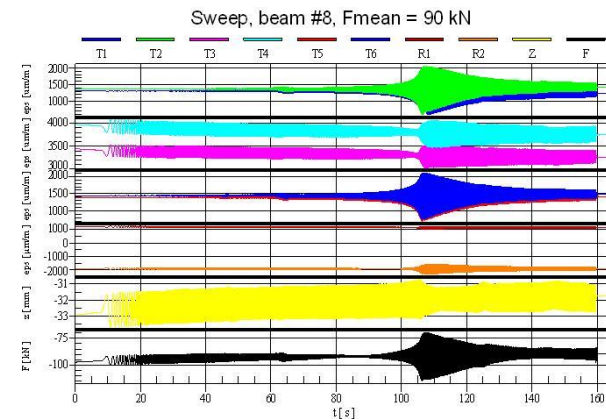
Obr. 10-10 Statické předpětí  $F = 30$  kN, #8



Obr. 10-11 Statické předpětí  $F = 50$  kN, #8



Obr. 10-12 Statické předpětí  $F = 70$  kN, #8

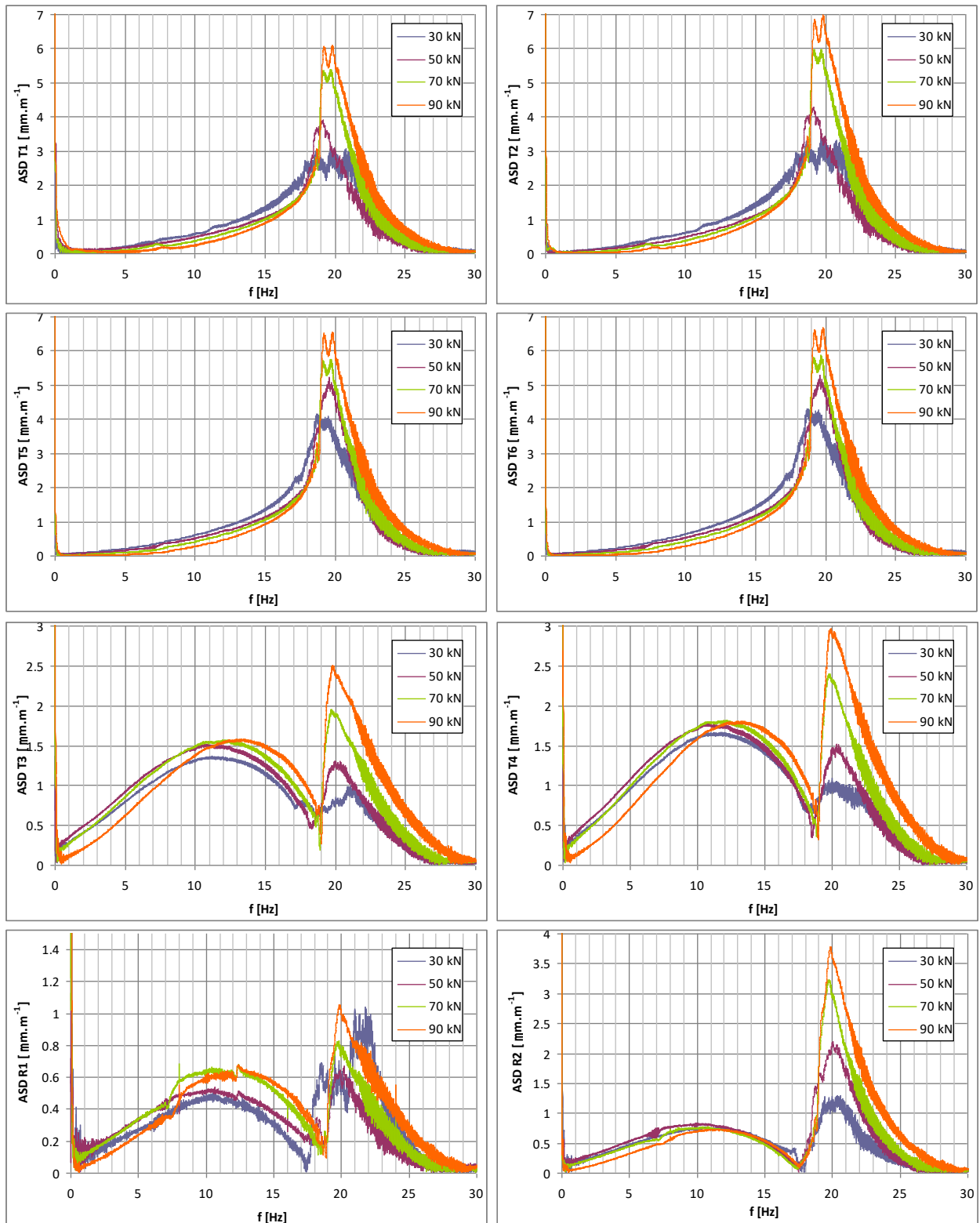


Obr. 10-13 Statické předpětí  $F = 90$  kN, #8

### 10.3.2.3 Diskuze výsledků

Následující efekty byly pozorovány a vyhodnoceny po ukončení testů:

- dvě hlavní rezonanční frekvence byly pozorovány na grafech s frekvenční závislostí. První nevýrazná pravděpodobně ohybového tvaru kmitu, druhá významně větší s poměrně ostrým ohraničením frekvence. Neexistují významné rozdíly mezi podélníkem #7 a #8. Ze všech měřených signálů kromě síly, leží ohybová frekvence v intervalu  $\langle 8; 15 \rangle$  pro podélník #7 a v intervalu  $\langle 11; 15 \rangle$  pro podélník #8. Ze silových signálů lze tuto frekvenci pozorovat v intervalu  $\langle 6; 9 \rangle$  pro podélník #7 a  $\langle 8; 9 \rangle$  u podélníku #8
- při sweep testech bylo pozorováno velmi velké kmitání nápravové kravaty



Obr. 10-14 Spektrální výkonová hustota průběhů tenzometrů při sweep testu podélníku #8

## 11 Výzkum příčnicku s uchycením brzdového systému

Důležitým prvkem každého vozidla je pohonná výkonná jednotka či její adekvátní náhrada. Pokud se vozidlo díky svému přímému či nepřímému pohonu uvede v pohyb, je jisté, že v průběhu svého pohybu po silnici, vodní cestě či železniční trati přijde okamžik, kdy svojí rychlost bude muset z provozních důvodů redukovat nebo úplně zastavit. Za tímto účelem musí být vybaveno ještě výkonnějším systémem, než je ten pohonný, který tuto funkci spolehlivě zastane. Vzhledem k tomu, že GFRP podvozek je koncipován jako vysokorychlostní pro nákladní přepravu, je nezbytné, aby jeho brzdový systém byl vysoce účinný a spolehlivý. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto použít dvojkolí s integrovanými brzdovými kotouči a vybavit GFRP podvozek kotoučovými brzdami. Upevnění tohoto pomocného brzdového rovněž GFRP rámu je řešeno šroubovým spojem. Pomocný brzdový rám je přišroubován k příčnicku spodního rámu kompozitového podvozku. Ověření pevnostních charakteristik tohoto konstrukčního uspořádání bylo další etapou při výzkumu vybraných vlastností kompozitového podvozku.

### 11.1 Testovací sestava

Podobně jako u výzkumu vlastností podélníků bylo i zde rozhodnuto ověřit vlastnosti pomocného brzdového rámu a jeho integraci do kompozitového podvozku na zjednodušené variantě. Byl vyroben samostatný příčnick spodního rámu podvozku bez jeho integrace do podélníků. K tomuto příčnicku byly přišroubovány dva pomocné brzdové rámy s držáky brzdových jednotek. Na místo skutečných brzdových jednotek byly připojeny hydraulické zatěžovací servoválce pro simulování brzdových účinků.

#### 11.1.1 Výzkum statické pevnosti

Pro zkoušky bylo snahou vytvořit okrajové podmínky pokud možno nejvěrnější skutečné realitě. Původní experimenty probíhaly bez použití středového čepu, pomocí kterého se ze skříň vozidla přenáší podélné a příčné síly, viz foto 11-5. Chování příčnicku, do kterého jsou připevněny pomocné brzdové rámy, vykazovalo pod zatížením neadekvátní reakce, docházelo k velkým deformacím a pohybům samotného příčnicku, okrajové podmínky byly vzdáleny skutečným podmínkám. Proto bylo rozhodnuto tento způsob zkoušení ukončit, vyrobit ocelovou náhradu středového čepu a robustní ocelový příčnick, viz foto 11-4, který nahrazoval skříň vozidla a do kterého středový čep ústil podobně, jako je tomu u reálné konstrukce.

##### 11.1.1.1 Uspořádání zkoušky

Testovaný příčnick byl upnut svými volnými konci, v místech kde je normálně integrován do podélníků rámu, na dva ocelové bloky. K vyrovnání zakřiveného tvaru příčnicku byla použita dřevěná vložka, na kterou bylo v místě styku s příčnickem kopírováno jeho skutečné zakřivení. Druhá strana dřevěné vložky byla rovná a rovnoběžná s ocelovými bloky. Pomocí upínek byl příčnick upevněn přes tyto vložky na obou koncích k ocelovým blokům. Jednotlivé brzdové konzoly pomocných rámu byly propojeny ocelovou příčkou a k této příčce přes kolová ložiska připojen hydraulický zatěžovací servoválec. Pro každou sadu kotoučů na jedné nápravě byl

připraven jeden zatěžovací válec typu PLz 400/200NV. Situaci detailně popisuje foto 11-3, detail připojení je patrný z foto 11-1.



Foto 11-1 Zatížení brzdové konzoly



Foto 11-2 Připojení středového čepu

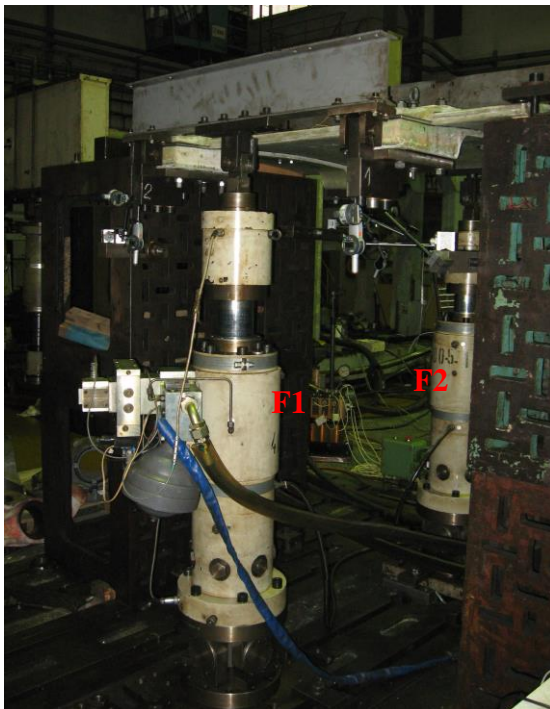


Foto 11-3 Uspořádání zkušební sestavy

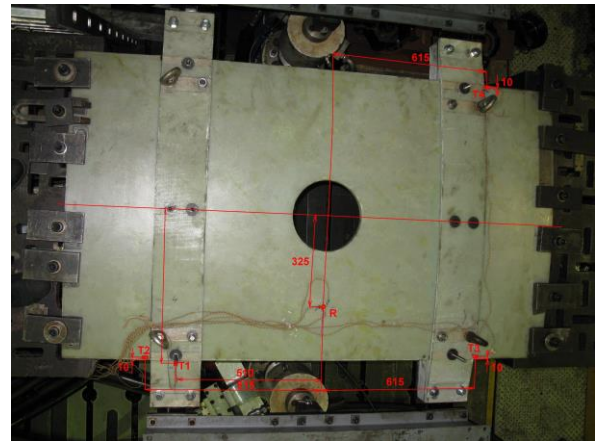
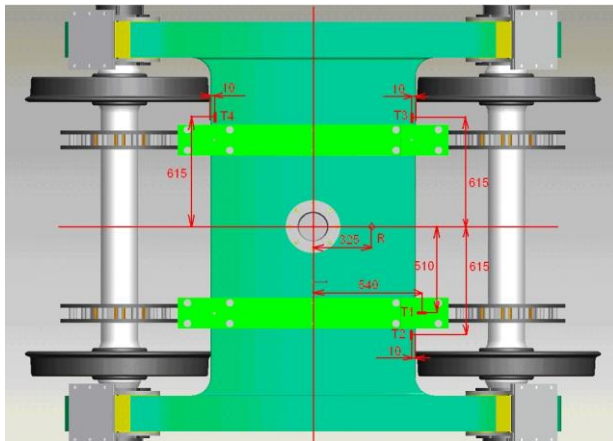


Foto 11-4 Příčnick se středovým čepem

### 11.1.1.2 Instrumentace zkoušky

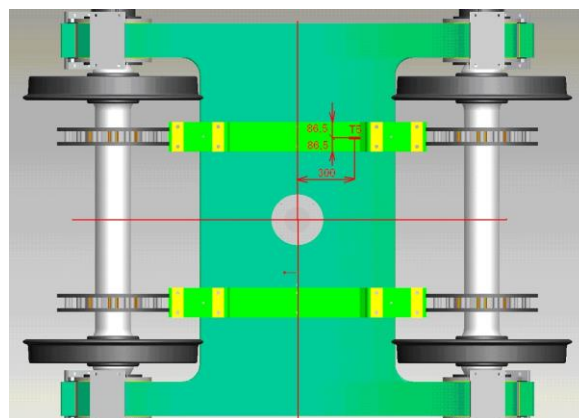
Celkem 5 jednosměrných tenzometrů typu HBM 350/6LY11 a jedna tenzometrická růžice typu Vishay MM SR FAER -25R-S6EL, byly instalovány na testovaný předmět. Všechny tenzometrické snímače měly odpor 350  $\Omega$ . Rozmístění použitých tenzometrických snímačů je patrné z obr. 11-1, 11-2 a foto 11-5. Umístění tenzometrické růžice je dokumentováno na foto 11-6. V průběhu experimentu byly rovněž měřeny okamžité hodnoty sil a posuvů zatěžovacích válců.





Obr. 11-1 Pozice tenzometrů – pohled zhora

Foto 11-5 Pozice tenzometrů – pohled zhora



Obr. 11-2 Pozice tenzometrů – pohled zdola

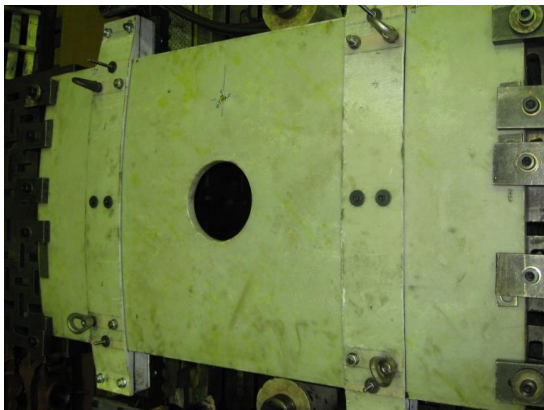


Foto 11-6 Pozice tenzometrické růžice

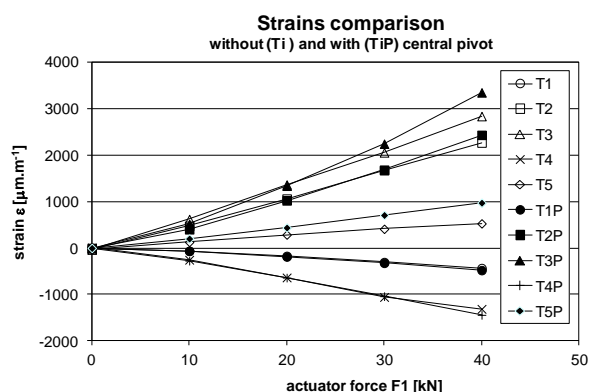
### 11.1.1.3 Provedení zkoušky

Cílem experimentu bylo zjistit deformační odezvu příčnicku spodního rámu podvozku s dvěma pomocnými brzdovými rámy na reálné brzdové účinky. Brzdové zatěžovací síly byly pro tento experiment dodány firmou Knorr-Bremse. Zatěžování probíhalo v několika krocích. Nejdříve byl celý systém zatížen jen malými silami, staticky a dynamicky. Po procvičení všech snímačů a usazení celé zkušební sestavy byly aplikovány síly F1 a F2, které působily s opačnou

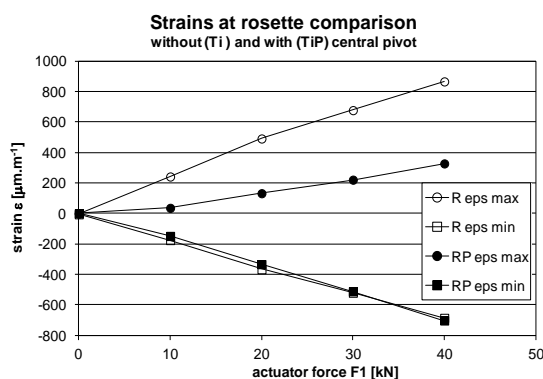
fázi, podobně jako jsou brzdové konzoly zatěžovány při reálném provozu. Zatěžování probíhalo stupňovitě po 10 kN nejdříve s kladným směrem síly F1 a záporným pro sílu F2. Maximální aplikovaná síla byla 40kN, tj. 20kN na každou brzdovou konzolu. Odlehčování probíhalo sestupně se stejným krokem po 10 kN. V průběhu zatěžování byly zaznamenávány deformace tenzometrů a posuvů pístnic zatěžovacích válců. Po konečném odlehčení bylo měření opakováno pro opačný směr jízdy vozidla, tedy s kladnou silou F2 a zápornou silou F1. Zkoušky byly provedeny pro obě varianty, tj. s a bez středového čepu.

### 11.1.1.4 Výsledky statické zkoušky

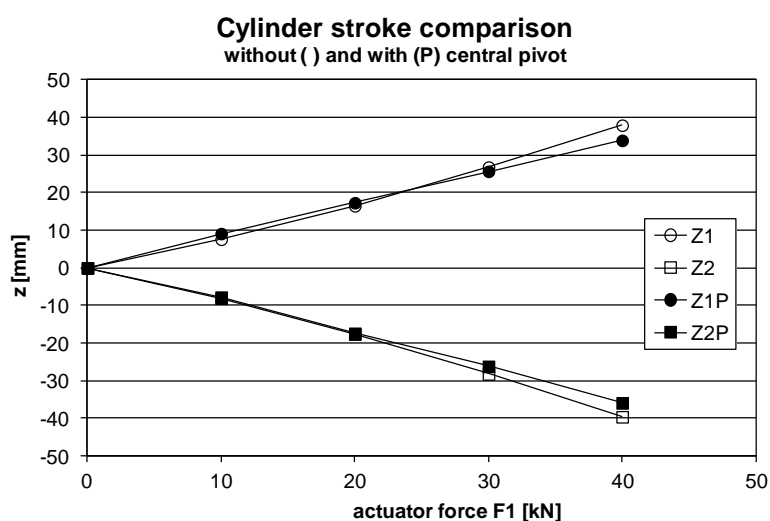
Výsledky statických zkoušek pro variantu s a bez použití středového čepu jsou uvedeny v grafech na obr. 11-3 a 11-4. Označení tenzometru pro variantu s použitím středového čepu je na grafech doplněno o písmeno P. Hlavní deformace  $\varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2$  byly z dílčích vypočítány podle standardních vztahů. Maximální deformace byla naměřena na tenzometru T3P a měla hodnotu  $\varepsilon = 3350 \mu\text{m.m}^{-1}$ . Vliv vyztužení příčnicku ukotvením středového čepu na jeho poddajnost je patrný z obr. 11-5.



Obr. 11-3 Deformace vs síla F1



Obr. 11-4 Deformace vs síla F2



Obr. 11-5 Vliv použití středového čepu na průhyb

## 11.1.2 Výzkum únavových vlastností

Důležitějším faktorem, než je statická pevnost, je u brzdového systému kolejového vozidla schopnost spolehlivě odolávat provozním podmínkám a zatížení z jeho provozu vyplývajícím. Výzkum únavových vlastností tohoto, z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti, klíčového uzlu konstrukce, je prvořadý pro prokázání únavové pevnosti a provozní spolehlivosti.

### 11.1.2.1 Uspořádání zkoušky

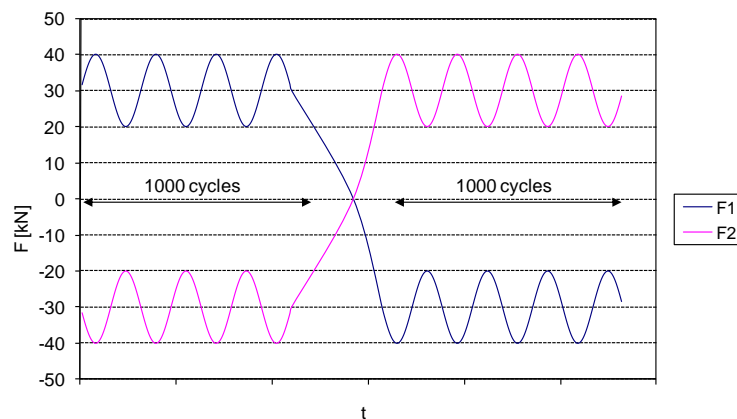
Za účelem výzkumu únavových vlastností pomocných brzdových rámu integrovaných do příčnicku spodního rámu podvozku bylo využito stejného uspořádání zkušební sestavy jako při výzkumu jeho vlastností při statickém zatěžování, viz podkapitola 11.1.1. Pro cyklické zatěžování byly použity dva hydraulické servoválce PLz 400/200 NV firmy Schenck.

### 11.1.2.2 Instrumentace zkoušky

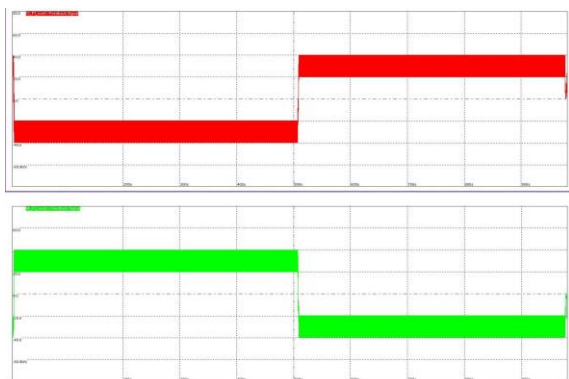
Podobně jako v předchozím odstavci i instrumentace zkušební vzorku byla shodná s podkapitolou 11.1.1.2.

### 11.1.2.3 Provedení zkoušky

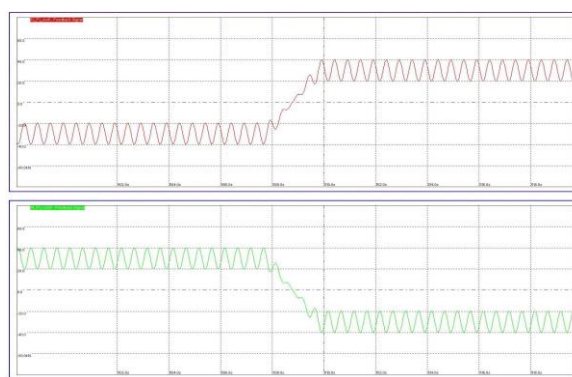
S ohledem na výpočet firmy Knorr-Bremse byly brzdové konzoly pomocného brzdového rámu vystaveny kvazistatickému zatížení  $F1_{\text{mean}} = 30 \text{ kN}$  a  $F2_{\text{mean}} = -30 \text{ kN}$ , tedy 15 kN na každou brzdovou konzolu. Amplituda dynamického zatížení byla stejná pro oba zatěžující servoválce  $F_a = 10 \text{ kN}$ , tj. 5 kN na každou brzdovou konzolu. Pro cyklické zatěžování byl zvolen typ signálu sinus s frekvencí 2 Hz. Každých 1000 cyklů se smysl kvazistatických složek sil  $F1$  a  $F2$  otočil. Tato skutečnost zohledňovala provoz vozidla oběma směry. Požadovaný průběh zatěžovacích sil je patrný z obr. 11-6. Reálný zatěžovací průběh je dokumentován na obr. 11-7, jeho detailní zobrazení pak na obr. 11-8. V průběhu únavové zkoušky byly periodicky monitorovány tenzometrické snímače a dráhové pohyby snímačů polohy integrovaných do zatěžovacích servoválců.



Obr. 11-6 Zatěžovací program



Obr. 11-7 Reálný zatěžovací průběh



Obr. 11-8 Reálný zatěžovací průběh - detail

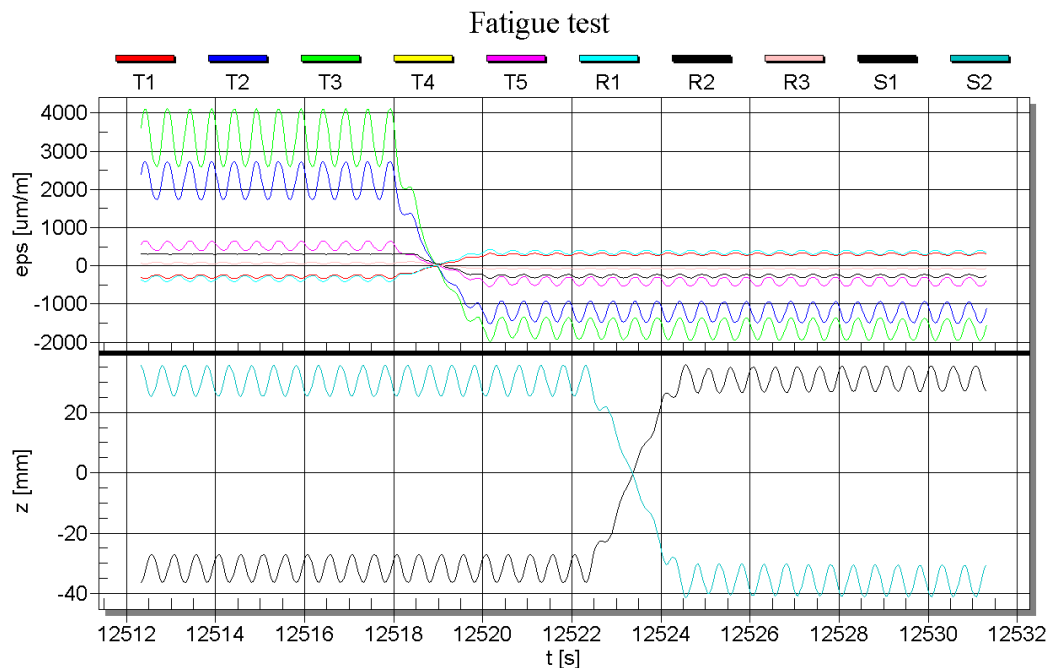
#### 11.1.2.4 Výsledky zkoušky

V průběhu únavové zkoušky byla zkoušená sestava, skládající se ze dvou pomocných brzdových rámu šroubově spojených s příčnickem spodního rámu GFRP podvozku, podrobena celkem 1 675 000 zatěžovacích cyklů. Při tomto počtu cyklů byla únavová zkouška ukončena s ohledem na prasklý ocelový kroužek středového čepu. Průběh zkoušek doprovázely různé provozní poruchy, které jsou detailně zaznamenány v tab. 11-1. Delaminace příčnicku spodního rámu GFRP podvozku, vzniklé při únavové zkoušce, jsou zdokumentovány na foto 11-7.

Počet cyklů	Druh poškození
270 000	Prasklý upínací šroub
309 600	Delaminace příčnicku v oblasti upnutí na ocelové bloky
657 600	Delaminace příčnicku v místě připojení brzdového pomocného rámu
661 000	Uvolněny upínací šrouby, dotaženo
820 000	Dotažení šroubů
1 005 000	Prasklý šroub středového čepu, výměna
1 274 000	Prasklý šroub středového čepu, výměna
1 303 000	Prasklý šroub středového čepu, výměna
1 400 000	Prasklý šroub středového čepu, výměna
1 675 000	Test ukončen, prasklý ocelový kroužek středového čepu

Tab. 11-1 Poškození vzniklá v průběhu únavové zkoušky

Příklad časového průběhu záznamu tenzometrů v průběhu únavové zkoušky je zobrazen na obr. 11-9. Maximální deformace byla naměřena  $\varepsilon = 3\,800 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$  na tenzometru T4, maximální průhyb brzdové kozoly byl 38,32 mm.



Obr. 11-9 Časový průběh záznamu tenzometrů



Foto 11-7 Delaminace příčnicku při únavové zkoušce

### 11.1.2.5 Diskuze výsledků únavového testu

Následující efekty byly pozorovány a vyhodnoceny po ukončení testů:

- počet cyklů, kterému by měly brzdové konzoly nákladního podvozku odolat bez poškození, bývá u konvenčně provedených rámců podvozků 1 až 2 milióny cyklů. Zkoušená konfigurace se z tohoto pohledu jeví jako poddimenzovaná minimálně v oblasti ocelových prvků brzdového uspořádání. To je však v tomto případě velmi snadné optimalizovat
- delaminace příčnicku spodního rámu GFRP podvozku ukazuje na ne zcela dobré zvládnutí technologie jeho výroby. S ohledem na poměrně velký průhyb brzdových konzol v průběhu zatěžování je třeba příčnick zesílit o další vrstvy sklolaminátu tak, aby došlo k omezení tohoto průhybu. Tím by se předešlo nepříznivému chování brzdového systému při jeho provozu a zároveň by došlo k roznesení mezilamelárního napětí do více vrstev a tedy k jeho snížení, potažmo delší životnosti. Okrajové podmínky tohoto



zkušebního uspořádání nemusely odpovídat přesně variantě, kdy je příčník celistvě integrován do podélníku

- únavová zkouška prokázala bezpečný charakter poškození GFRP konstrukce. Vlivem cyklického zatížení došlo k delaminaci příčníku spodního rámu GFRP podvozku. Při tomto mezním stavu konstrukce však i nadále zůstala zachována její funkce, i když poddajnost brzdových konzol se zvětšila. Nicméně vlak by byl s tímto typem uložení brzdových jednotek schopen zastavit. Podobná nehoda při použití konvenčních materiálů má charakter rostoucí trhliny, kde po dosažení její mezní hodnoty dochází k úplnému dolomení, brzdový systém není schopen fungovat
- pomocné brzdové rámy, určené pro zavěšení brzdových jednotek, odolaly aplikovanému počtu cyklů při daném cyklickém zatěžování. To ukazuje na jejich dostatečné nadimenzování i technologické zvládnutí její výroby

## 12 Výzkum dynamického chování GFRP podvozku

Výzkum vybraných vlastností jednotlivých klíčových částí GFRP podvozku i jeho pětinového modelu prokázal značnou naději, že lze pokračovat ve vývoji kompozitového podvozku v plném měřítku a že tento bude schopen adoptovat vlastnosti potřebné k bezporuchovému provozu a přípustným jízdním charakteristikám. S ohledem na fakt, že dokud není podvozek homologován, není možné provést jeho jízdní zkoušky na trati, bylo nutné vyvinout, zkonstruovat a vyrobit speciální zkušební stand, který jízdní zkoušky umožní simulovat, viz foto 12-1. Nutno zdůraznit, že se jedná o originální metodu, která pro železniční vozidla nebyla dosud použita a byla vyvinuta za účelem posouzení dynamického chování kolejových vozidel při nemožnosti použít reálnou trať pro získání těchto dynamických charakteristik.



Foto 12-1 Speciální zkušební stand pro výzkum dynamických vlastností

## 12.1 Jednotlivé součásti speciálního zkušebního standu

Speciální stand pro simulace jízdních podmínek byl autorem disertační práce vyvinut v rámci citovaného mezinárodního projektu. Skládá se z několika klíčových částí, mezi které patří robustní podlaha zkušebního pracoviště, podpurné a opěrné prvky, hydraulické válce s příslušenstvím tvořící spolu s řídicí elektronikou vlastní budící soustavu, šasi vagónu používané jako přípravek pro uložení nákladu a zároveň adoptující testovaný podvozek, betonové panely umožňující měnit okamžitou hmotnost celé testované soustavy.

### 12.1.1 Vagónové šasi

Za účelem vytvoření speciálního zkušebního standu bylo zapůjčeno šasi vagónu typu Smms, viz foto 12-2. Tento nákladní vagón musel být před jeho použitím modifikován, neboť byl dosud využíván s podvozkem, při jehož použití je přenos svislého zatížení realizován pomocí středového čepu. Adaptéry pro přenos vertikálního zatížení podélníky a vyrobený středový čep pro přenos podélné a příčné síly jsou dokumentovány na foto 12-3.



Foto 12-2 Šasi vagónu Smms

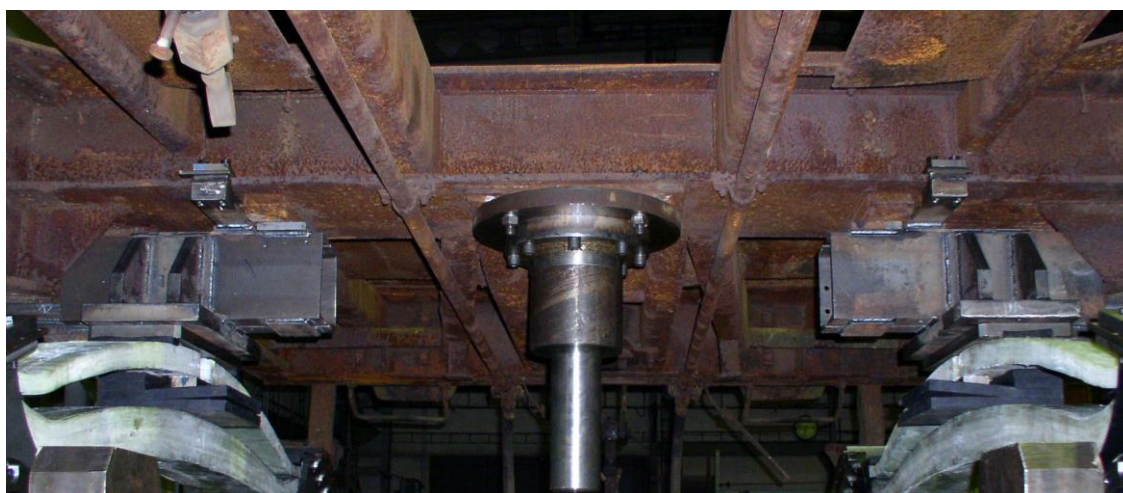


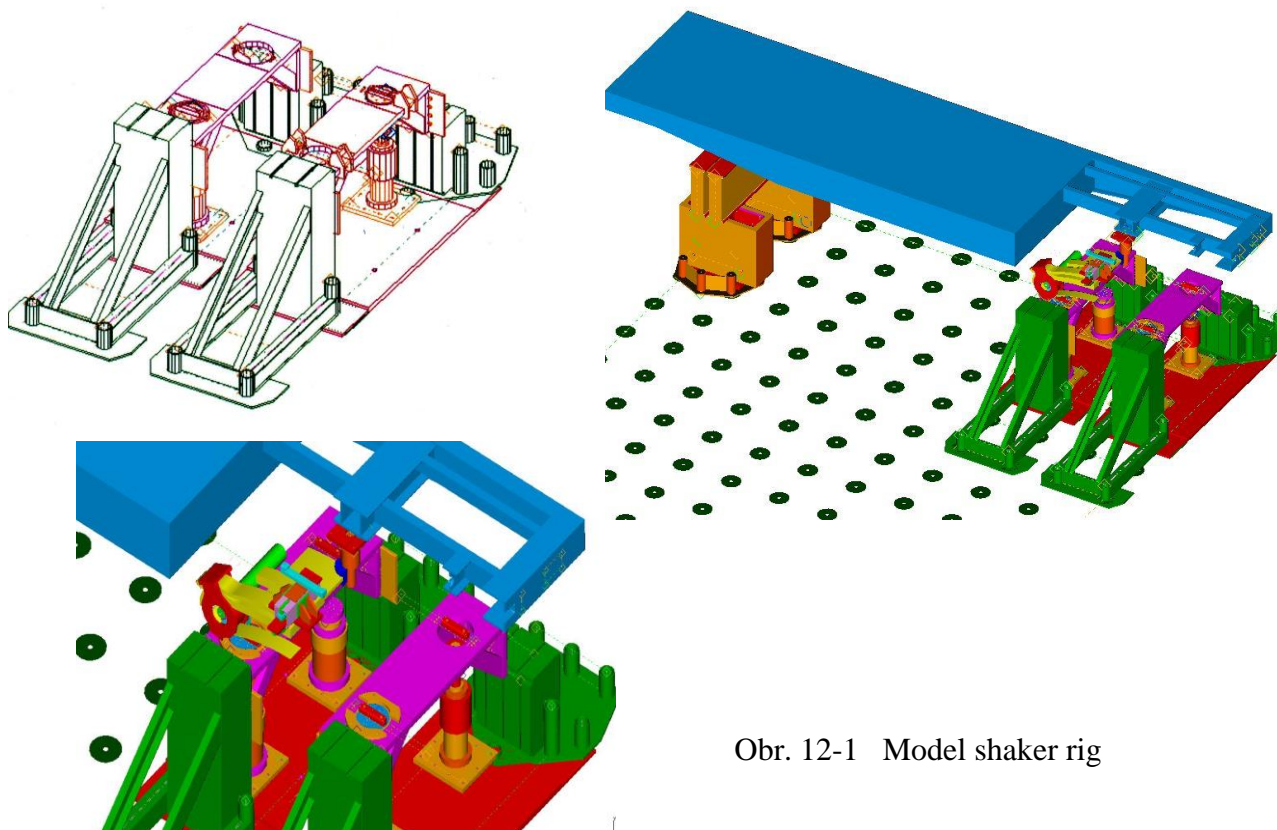
Foto 12-3 Modifikace vagónového šasi pro transfer svislého zatížení, pivot



### 12.1.2 Popis speciálního zkušebního standu

Speciální zkušební stand byl vyvinut a sestaven na Dynamické zkušebně Výzkumného a zkušebního ústavu v rámci programu Eureka v projektu Eurobiegie E!1841, podrobný popis tohoto shaker rig je uveden následně.

Speciální zkušební stand – shaker rig je postaven s použitím prvků upínacího a podpůrného systému Scheck 4000 a dalších dodatečně vyrobených přípravků. Stand umožňuje testování vagónu dvojnápravovými podvozky. Důležitou částí standu jsou čtyři hydraulické zatěžovací válce, na které je nákladní železniční vagón Smmp prostřednictvím jednoho podvozku, včetně vypružení, koly tohoto podvozku ustaven. Hydraulické zatěžovací válce umožňují vertikální buzení posuvů pod každým kolem podvozku. Pod kola přední nápravy podvozku se použijí dva hydraulické zatěžovací servoválce Schenck typu PL 630 K s dvoustupňovými servoventily 63l/min. Pod kola zadní nápravy podvozku použijí dva hydraulické zatěžovací servoválce Schenck typu PL 400 N se stejným typem servoventilů. Všechny zatěžovací válce mají speciální vedení, které umožňuje jejich pohyb pouze ve vertikálním směru a mají integrovány snímače sil a dráhových posuvů pístnic. Vagón je připraven k testování, pokud dvojkolí zkoušeného podvozku, které je s vagónem smontováno, stojí na náhradách kolejí upevněných na zatěžovacích válcích, (obr. 12-1, foto 12-4). Kola podvozku jsou po dobu zkoušek odbrzděná. Zatěžovací hydraulické válce jsou řízeny digitální řídicí elektronikou IST.



Obr. 12-1 Model shaker rig

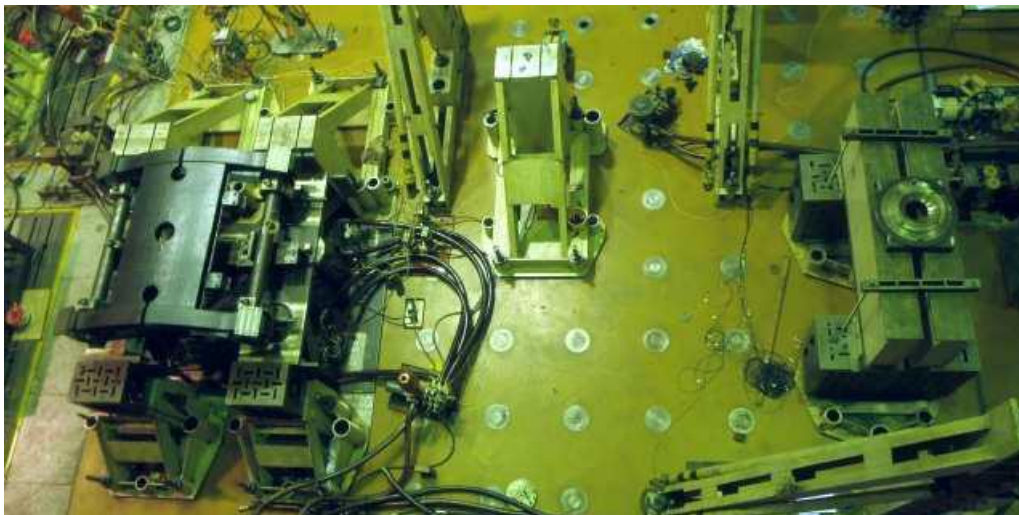
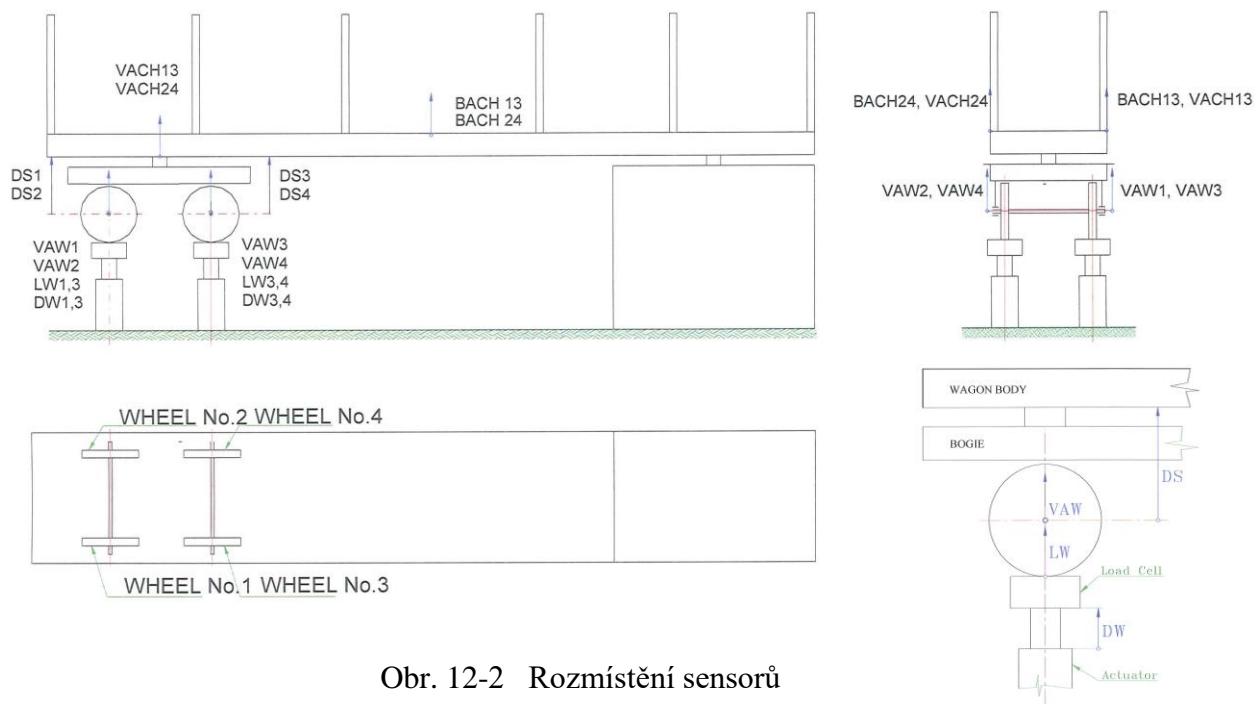


Foto 12-4 Shaker rig připraven pro spojení se šasí

### 12.1.3 Instrumentace

Před zahájením testování byl vagón a zkoušený GFRP podvozek instrumentován čtyřmi inductivními snímači posuvu typu HBM WA 300 pro měření relativního pohybu mezi dvojkolím a šasím vagónu u každého kola DS<sub>i</sub>, dále čtyřmi inductivními akcelerometry pro měření zrychlení na každém kole VAW<sub>i</sub>, akcelerometrem na ocelovém nosníku šasi vagónu v místech mezi nápravami VACH13 a VACH24, dále uprostřed po obou stranách tohoto ocelového nosníku BACH13, BACH24 (viz obr. 12-2). Vzájemný pohyb šasi vagónu a jednotlivých kol byl monitorován indukčními snímači posuvu DS<sub>i</sub>. Po celou dobu testování byly také zaznamenávány posuvy zatěžovacích válců a jejich siloměrů, představující sílu vznikající mezi koly a kolejnicemi, viz snímače DW<sub>i</sub> a LW<sub>i</sub>. Lokalizace použitých snímačů jsou dokumentovány na foto 12-10 až 12-14.



Obr. 12-2 Rozmístění sensorů



Kromě snímačů posuvů, sil a zrychlení byly podobně, jako při výzkumu příčnicku spodního rámu GFRP podvozku, nainstalovány jednosměrné tenzometry T1, T2 a T3 a tenzometrická růžice R, jejich umístění je patrné z foto 12-5 až 12-9.

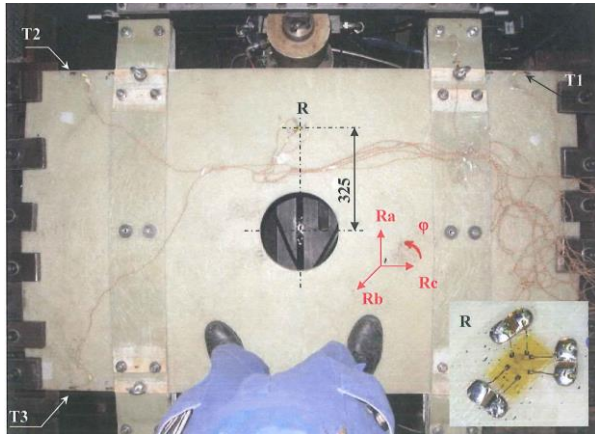


Foto 12-5 Pozice tenzometrů T1, T2, T3 a R

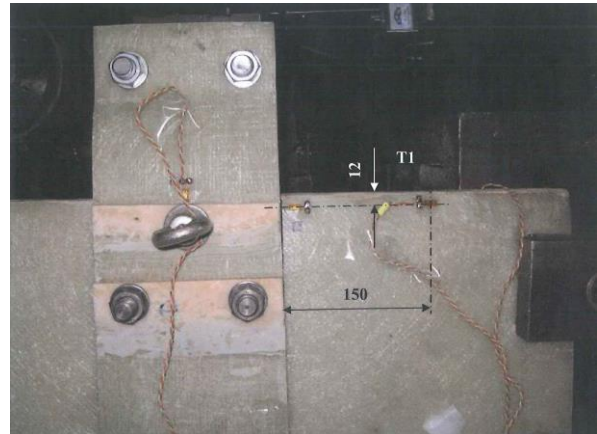


Foto 12-6 Pozice tenzometrů T1

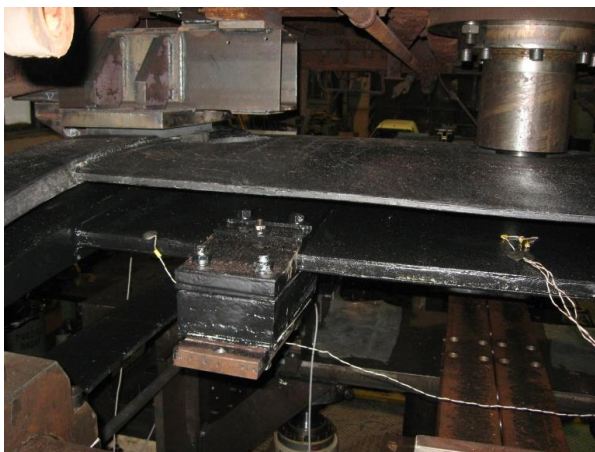


Foto 12-7 Pozice tenzometrů T1 a R

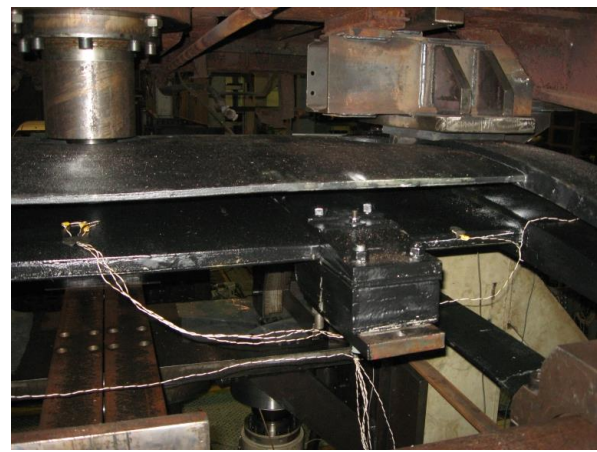


Foto 12-8 Pozice tenzometrů T2 a R



Foto 12-9 Pozice tenzometru T3

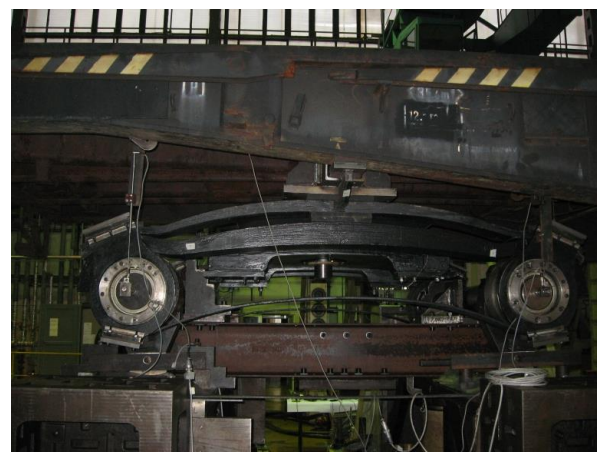


Foto 12-10 Sensory DS1, DS3, VAW1, VAW3



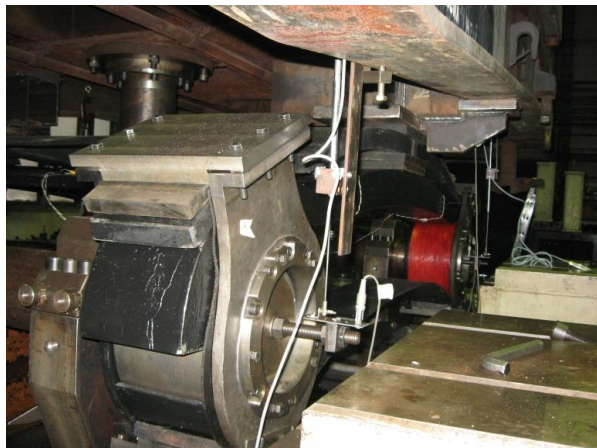


Foto 12-11 Sensory DS1 a VAW1

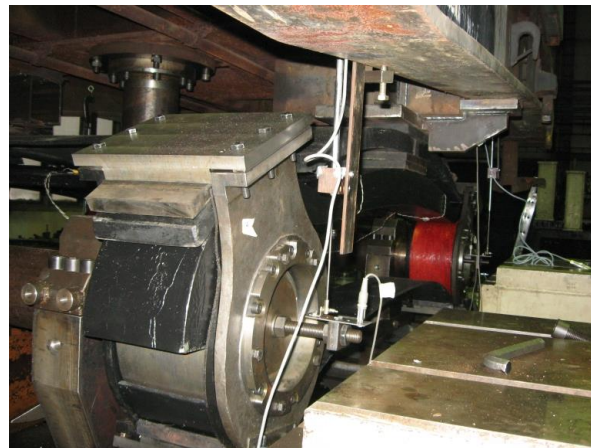


Foto 12-12 Sensory DS2, DS4, VAW2, VAW4



Foto 12-13 Sensor VACH24



Foto 12-14 Sensor BACH24

#### 12.1.4 Metody testů

GFRP podvozek byl spolu s vagónovým šasí a s využitím shaker rig podroben celé řadě testů s cílem získat informace o jeho chování jako odezvy na dynamická buzení dvojkolí hydraulickými zatěžovacími válci. Zmíněné testy jsou pod názvy drop test, sweep bmp test, track profile test a twist test vysvětleny v následujících kapitolách.

##### 12.1.4.1 Počáteční testovací podmínky

Před prvním testem, kterému byla podrobena sestava vagónového šasí s GFRP podvozkem, byly všechny čtyři zatěžovací válce nastaveny do středních poloh a vzájemně vyrovnány tak, aby tvořily horizontální rovinu, ve které je vlastní hmotnost vagónového šasí a GFRP podvozku rovnoměrně rozložena na každý zatěžovací válec. Tyto pozice válců byly zafixovány i pro všechny další testy s přídatnou užitečnou hmotností.

#### 12.1.4.2 Drop test

Tento test umožnil dynamicky zjistit vlastní frekvence a kritické tlumení vypružení. Jeho podstatou je v prvním kroku drop-pád dvojkolí přední nápravy případně obou náprav (zatěžovacích válců 1, 2, případně všech čtyř zatěžovacích válců) o 5 a 10 mm se současným měřením instrumentovanými sensory s cílem vybuzení vlastní frekvence. Z původních dráhových pozic zatěžovacích válců se těmito pomalu vyjede o aplikovanou výšku dropu. Ten je následně realizován skokovou změnou. Míra tlumení je vyhodnocena z měření exponenciálního poklesu po sobě jdoucích vrcholů  $p_i, p_{i+1}$  vzájemného pohybu šasi a kola podvozku nebo zrychlení. Koeficient relativního tlumení jako logaritmický dekrement  $\delta$  a kritická míra tlumení se následně vyhodnotí z rovnice (1) a (2).

$$\delta = \frac{p_i}{p_{i+1}} \quad (1)$$

kritická míra tlumení  $\zeta = 1/2 \cdot \pi \cdot \delta \quad (2)$

#### 12.1.4.3 Sweep bump test

Test frekvenčním rozmítáním – sweepem byl prováděn v rozmezí frekvencí 0 ÷ 30 Hz, což umožňuje identifikovat všechny významné rezonanční vrcholy včetně vrcholů odpovídajícím odpruženým a neodpruženým hmotám a šasi a jejich odpovídajících amplitud. V průběhu testu sweepem byly nejprve excitovány zatěžovací servoválce přední nápravy a po té servoválce obou náprav. Buzení mělo sinusový charakter s konstantní amplitudou posuvu pístitic zatěžovacích servoválců 0,5 a 1,0 mm. Frekvence harmonického kmitání servoválců se plynule měnila od 0 do 30 Hz s rychlostí 0,2 Hz·s<sup>-1</sup>, servoválce byly excitovány bez fázového posunu. Pro porovnání experimentálně odměřených frekvenčních vrcholů s teoretickými, vypočtenými podle vztahu (3), lze použít vztah:

$$f_r = \frac{\pi \cdot g}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{F_m}} \quad (3)$$

kde je

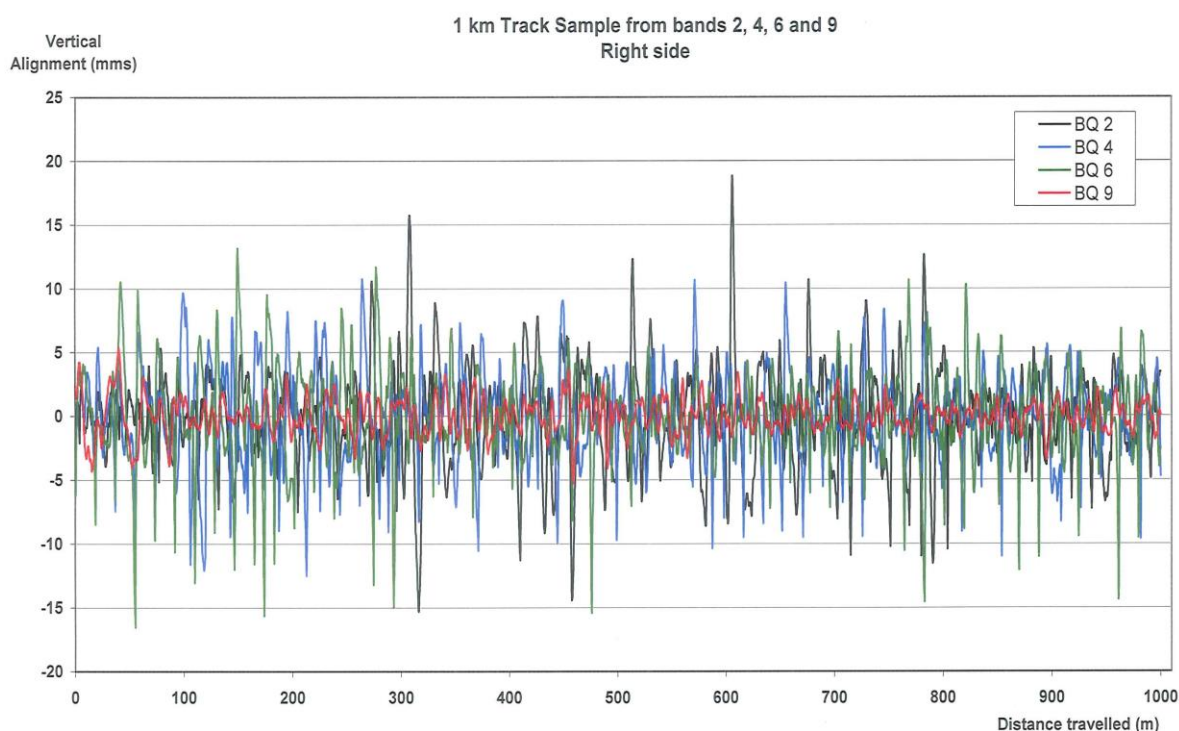
$R$	tuhost vypružení [N.mm <sup>-1</sup> ]
$F_m$	střední hodnota zatížení na jednom kole [kN].

#### 12.1.4.4 Simulace jízdního profilu tratě

Pro simulace jízdního profilu tratě byl použit záznam profilu 1 km dlouhého úseku tratě z Derby do Carnforth ve Velké Británii. Aby bylo možno porovnat vliv kolejového svršku na chování vagónu je četnost měření profilu tratě v tomto záznamu 0,2476 m pro kvalitu tratě BQ2, BQ4, BQ6 a 0,2589 m pro BQ9. Tyto úseky, odpovídající UK traťové klasifikaci obsahující kvalitativní skupiny BQ1 až BQ12, byly z celého záznamu ručně vybrány a vloženy do řídicí elektroniky zatěžovacích servoválců. Za účelem možnosti porovnat profily těchto vybraných traťových úseků s ostatními byly pro tyto úseky vypočteny spektrální výkonové

hustoty. Výhodou tohoto přístupu je možnost generování náhodného traťového profilu podle zadané spektrální výkonové hustoty. Spektrální výkonová hustota byla vypočtena ze svislých výkmitů – nerovností jejich vzdáleností v ose jízdy vozidla, takže jsou nezávislé na rychlosti vozidla.

Nerovnosti pravé i levé kolejnice byly simulovány pomocí zatěžovacích servoválců na každé nápravě. Každé traťové kvalitativní skupině byl přiřazen doporučený interval jízdní rychlosti. Simulace rychlosti byla realizována změnou časového vzdálenosti mezi jednotlivými vzorky nerovnosti tratě v řídicím programu zatěžovacích servoválců. Nerovnosti zadní nápravy byly oproti té přední realizovány s časovým posunem, doba prodlevy byla vypočtena jako poměr vzdálenosti mezi oběma nápravami vozu k aplikované rychlosti jízdy. Testované traťové profily jsou uvedeny na obr. 12-3, obsahují spektrální výkonové hustoty pro všechny traťové sekvence.

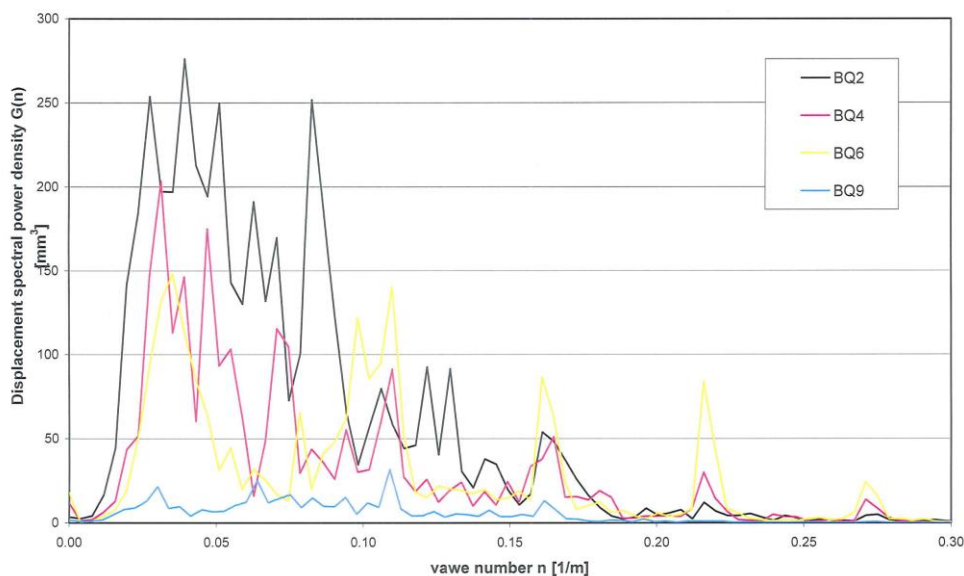


Obr. 12-3 Testované traťové profily pro 4 kvalitativní skupiny BQ

Dynamický koeficient zatížení DLC byl vypočten z měřených hodnot snímačů LWi podle vztahu

$$DLC = \frac{s_F}{F_m}, \quad (4)$$

kde  $s_F$  is směrodatná odchylka dynamického zatížení a  $F_m$  je střední hodnota dynamického zatížení (statická složka, která je rovna zatížení jednoho kola).



Obr. 12-4 Spektrální výkonové hustoty nerovností traťových profilů

Kompletní experimentální program pro drop, sweep bump test a simulace jízdního profilu tratě je uveden v tab. 12-1.

Pořadí	Test	Parametr	Buzená náprava	Pořadí	Test	Parametr	Excitovaná náprava
1	Drop	5 mm	Přední (1, 2)	14	Track	BQ4/ 25km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
2		10 mm	Přední (1, 2)	15		BQ4/ 51km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
3		10 mm	Obě (1, 2, 3, 4)	16		BQ4/ 66km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
4		5 mm	Zadní (3, 4)	17		BQ4/ 76km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
5		10 mm	Zadní (3, 4)	18		BQ6/ 35km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
6		10 mm	Zadní (3, 4)	19		BQ6/ 52km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
7	Bump	0.5 mm	Přední (1, 2)	20		BQ6/ 66km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
8		1.0 mm	Přední (1, 2)	21		BQ6/ 69km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
9		0.5 mm	Zadní (3, 4)	22		BQ6/ 104km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
10		1.0 mm	Zadní (3, 4)	23		BQ6/ 107km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
11	Track	BQ2/ 22km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)	24		BQ6/ 160km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
12		BQ2/ 44km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)	25		BQ9/ 53km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)
13		BQ2/ 66km.h <sup>-1</sup>	Obě (1, 2, 3, 4)				

Tab. 12-1 Experimentální program pro dynamické testy

#### 12.1.4.5 Torzní tuhost podvozku

Torzní tuhost podvozku je jedním z významných parametrů, které rozhodují o dynamických účincích kolejového vozidla na železniční infrastrukturu. Čím tužší podvozek bude, tím větší silový dopad na trať bude vozidlo tímto podvozkem vybavené mít. Toto poškození bude násobně narůstat při průjezdu vozidla oblouky menších průměrů nebo při výškově nerovné trati. Pro vyšší přepravní rychlosti by tato vozidla byla nepoužitelná.

Současně s provozem vozidel s tuhými podvozky musí být vynakládány velké prostředky na údržbu železniční a dopravní cesty. Zvýšenému namáhání jsou přitom logicky vystavena i samotná vozidla. Jednotliví výrobci se již nyní snaží o konstrukce s “track friendly” podvozky. Dosud ale v EU neplatí žádná direktiva, která by provozovatele vozidel, kteří významně poškozují trať, postihovala. Motivace výrobců vyrábět k tratím přátelská vozidla proto není velká, o zájmu či nezájmu provozovatelů vozidel o tyto obvykle dražší podvozky konstrukčně i technologicky rozhoduje obvykle cena. Výjimku v nákladní železniční dopravě představuje snad jen nákladní podvozek s označením TF25. Dílčích vylepšení se postupně dostává také v Evropě nejrozšířenějšímu povozku Y25 různých výrobců a to zejména snahou konstrukčně zabezpečit natáčení jeho dvojkolí při průjezdu oblouky. U osobní železniční dopravy je situace významně lepší, v jízdním komfortu se výrobci předhánějí, jeho posuzovatelem je lidská bytost toužící po přepravě z bodu A do bodu B v co nejkratším času, v bezpečí a pohodlí. Proto jsou zde využívána efektivní druhotná vypružení v podobě vzduchových pružin, které jsou schopny reagovat na změnu provozních podmínek svoji změnou tuhostních parametrů. GFRP podvozek je v tomto ohledu revolučně pokrokový, neboť oproti, v nákladní železniční dopravě převážně používaným ocelovým pružícím prvkům, jejichž charakteristiky se v průběhu jejich provozu zhoršují vlivem degradačních procesů použitého materiálu zejména koroze, je vyroben z materiálu s vnitřním tlumením. Toto tlumení je reprodukovatelné a má v čase neměnný charakter. Výzkum dynamických vlastností jeho pětinového modelu na trati v Eastleigh prokázal samonatačecí schopnost dvojkolí při průjezdech oblouky. Tato schopnost je odrazem prodlužování rozvoru náprav na vnější straně podvozku. K tomu dochází vlivem odstředivé síly, která zvyšuje zatížení vnějšího podélníku spodního rámu podvozku, který zvětší svoji délku a příznivě ovlivní i úhel natočení dvojkolí do oblouku.

Zjištění torzní tuhosti podvozku může být provedeno několika způsoby, obvykle se tato charakteristika prokazuje vykloněním jednoho kola z roviny všech ostatních o danou hodnotu. Podle Britských standardů je třeba uvažovat torzní tuhost vagónu i podvozku. Při délce vagónu 13,4 metrů by maximální diference kola z roviny ostatních měla být 13,4 mm.

Podle Evropských standardů a podmínek TSI je třeba pro výjimečné zatížení podvozku aplikovat zkroucení 1% z rozvoru náprav při použití originálních prvků vypružení. GFRP podvozek má rozvor 2000 mm, diference jednoho kola z roviny ostatních kol podvozku musí být tedy 20 mm. Toto musí být splněno jak pro podmínky prázdného, tak i plně zatíženého vagónu. Rám podvozku je přitom zkroučován tak, aby udržel kontakt kola s kolejnicí. Při provozním zatížení je hodnota diference poloviční, v tomto případě představuje hodnotu 10 mm. Procentuální diference silových změn na jednotlivých kolech od adekvátních nominálních sil na rovné trati by při zkroucení rámu neměla přesáhnout 60%. Dalším způsobem může být zkroucování rámu podvozku až do doby, kdy naopak dojde k úplnému odlehčení jednoho kola. Pro tento stav je měřeno rozložení deformací v kritických místech konstrukce rámu podvozku, které nesmí překročit přípustnou mez.

Výsledky výzkumného programu zaměřeného na dynamické vlastnosti GFRP podvozku v měřítku 1:1 tak, jak jsou popsány v kapitole 11, jsou uvedeny v následující kapitole.

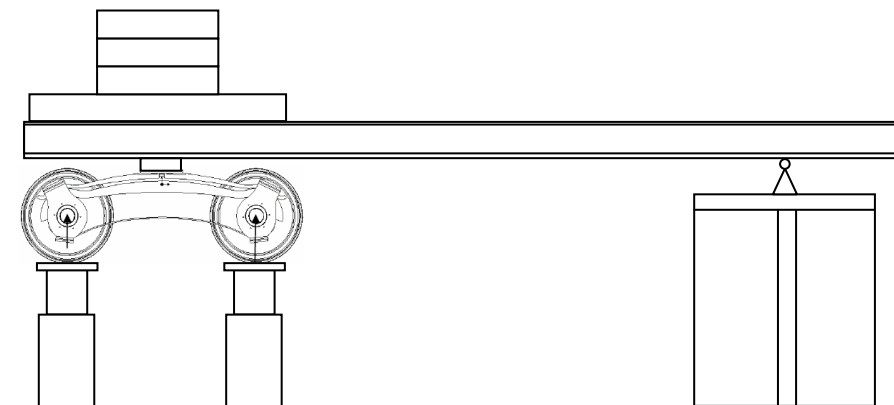
## 12.2 Výsledky výzkumu vybraných vlastností GFRP podvozku

### 12.2.1 Vertikální tuhost podvozku

Při výzkumu vertikální tuhosti a rozložení deformací na příčnicku spodního rámu GFRP podvozku byl nejdříve kompletní smontovaný podvozek ustaven svými kolovými náhradami na náhradu kolejnic, umístěných na hydraulických zatěžovacích válcích shaker rig. Potom byl



podvozek přes středový čep propojen s vagónem Smms. Ten byl na svém druhém konci podepřen tuhým nosníkem s kulovou tornou, aby byl vagón schopen prostorového pohybu v průběhu zatěžování. Při tomto základním ustavení poloviny vagónu na podvozek bylo provedeno první měření zatížení od poloviny vlastní hmotnosti vagónu – 6t. Potom byly na plošinu vagónu nad GFRP podvozkem postupně nakládány dvojice betonových panelů, každý s hmotností 1 400kg, viz obr. 12-5 a foto 12-15.



Obr. 12-5 Zatěžování podvozku

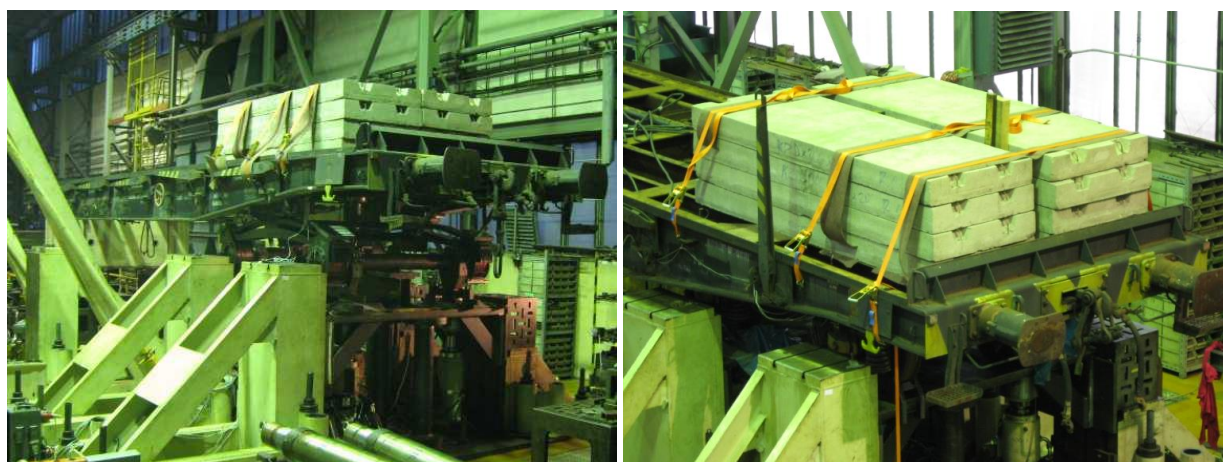


Foto 12-6 Nakládání vagónu

K měření průhybu podvozku byly použity indukční snímače mezi šasi vagónu a středem kola DSi a dále dvojice číselníkových úchytkoměrů DA a DB monitorující průhyb podvozku k podélnému nosníku vagónu. Tyto snímače by teoreticky měly být ve shodě s DSi. Současně byly pro jednotlivé zatěžovací kroky odečítány nárůsty sil na siloměrech zatěžovacích servoválců LWi, které pro tento výzkum byly sepnuty v režimu neměnné polohy svých pístnic, jako by podvozek stál na pevných kolejích. Při experimentu byly rovněž zaznamenávány hodnoty tenzometrických snímačů. Zatěžování a měření probíhalo v krocích po 2 800 kg až do okamžité hmotnosti 17 200 kg. Přidáno bylo tedy postupně 8 betonových panelů o jejich celkové hmotnosti 11 200 kg. Po odečtení všech měřených hodnot posledního zatěžovacího kroku byly betonové panely postupně odebírány a podvozek odlehčován. Výsledky jsou pro silové a dráhové snímače uvedeny v tab. 12-2 a pro tenzometrické snímače v tab. 12-3.

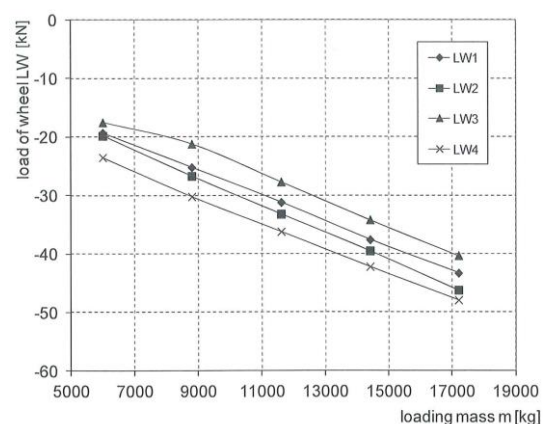
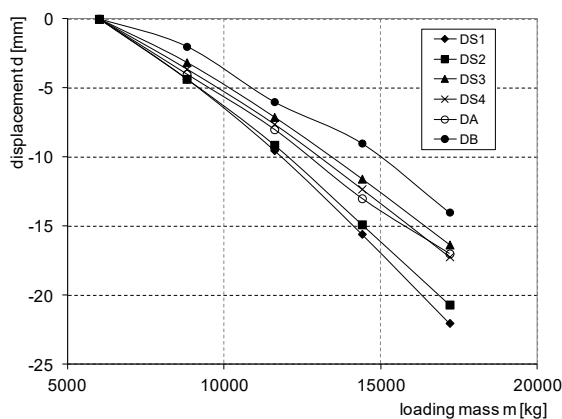
m [kg]	LW1 [kN]	LW2 [kN]	LW3 [kN]	LW4 [kN]	DS1 [mm]	DS2 [mm]	DS3 [mm]	DS4 [mm]	DA [mm]	DB [mm]
6 000 tare	-19.3	-19.8	-17.5	-23.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
8 800	-25.2	-26.7	-21.2	-30.2	-4.4	-4.4	-3.2	-3.6	-2	-4
11 600	-31.2	-33.2	-27.7	-36.2	-9.5	-9.1	-7.1	-7.6	-6	-8
14 400	-37.6	-39.5	-34.2	-42.2	-15.6	-14.9	-11.6	-12.3	-9	-13
17 200	-43.3	-46.2	-40.3	-47.9	-22.0	-20.7	-16.4	-17.2	-14	-17
6 000 tare	-18.7	-21.6	-17.5	-23.0	-6.7	-6.6	-4.9	-5.0	-	-

Tab. 12-2 Kolové síly a průhyb podvozku

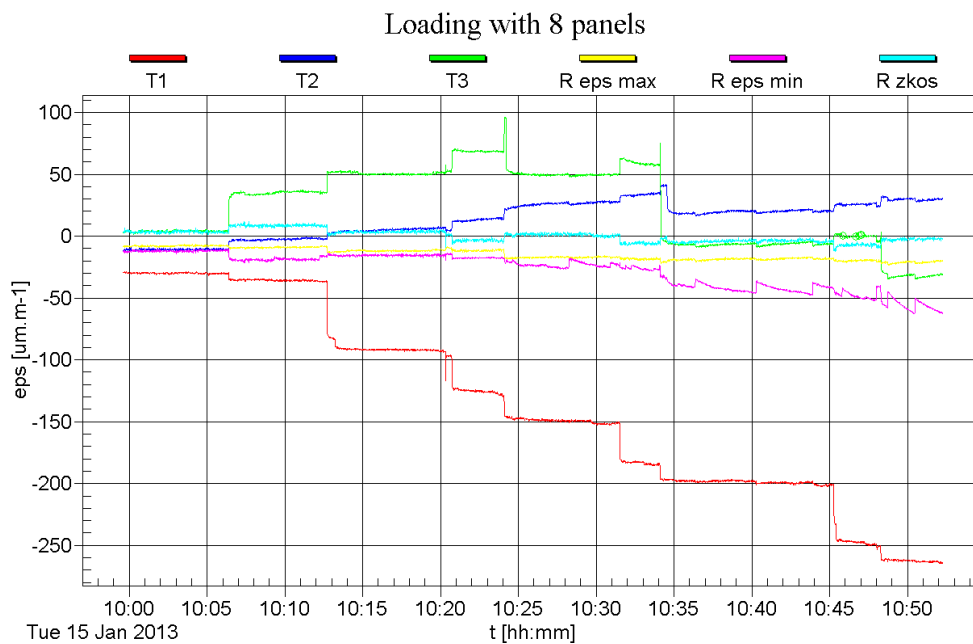
m [kg]	$\varepsilon_{T1}$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	$\varepsilon_{T2}$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	$\varepsilon_{T3}$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	$\varepsilon_{R, \max}$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	$\varepsilon_{R, \min}$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	$\gamma_R$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
6 000 tare	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8 800	-61.0	13.7	47.8	-3.7	-5.9	2.9
11 600	-116.9	34.6	47.3	-9.4	-12.0	0.2
14 400	-166.6	28.8	-9.6	-10.0	-28.8	-7.2
17 200	-231.4	40.3	-36.2	-13.4	-43.3	-3.8
6 000 tare	-54.5	-1.7	-86.6	15.3	3.9	6.7

Tab. 12-3 Zatížení vs. deformace tenzometrů

Graficky jsou výsledky výzkumu vertikální tuhosti zobrazeny na obr. 12-6, resp. 12-7 pro silovou závislost a 12-8 pro tenzometrické snímače.



Obr. 12-6 Vertikální tuhost podvozku Obr. 12-7 Okamžitá hmotnost vagónu vs. síla



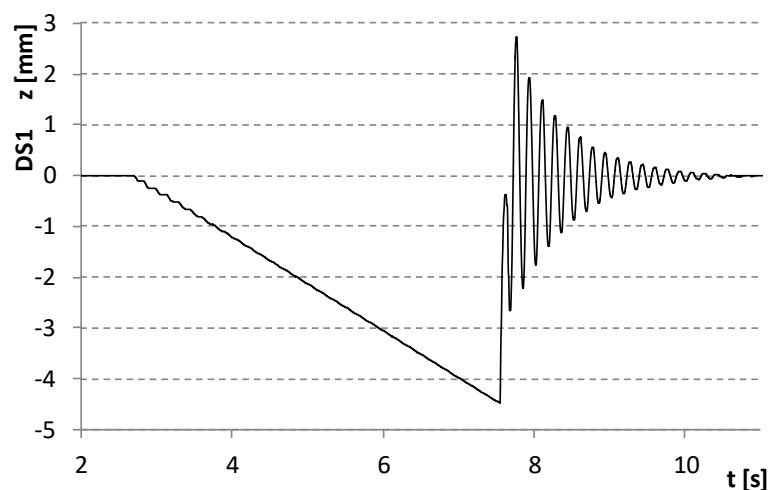
Obr. 12-8 Deformace tenzometrů při statickém zatížení

## 12.2.2 Dynamické testy

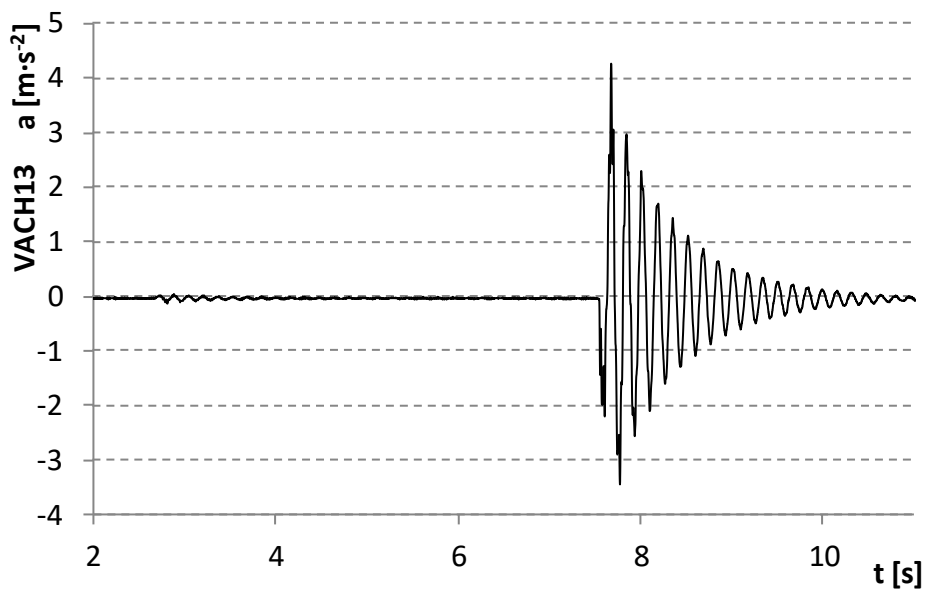
S využitím vyvinuté metodiky laboratorního dynamického testování kolejových vozidel byl proveden rozsáhlý výzkum vybraných vlastností GFRP podvozku.

### 12.2.2.1 Drop testy

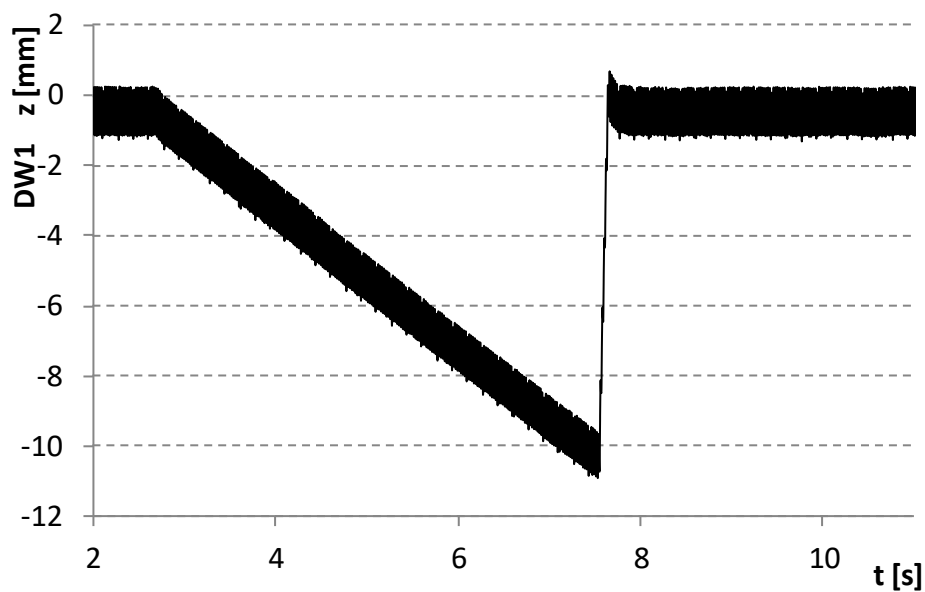
Metodika, použitá pro výzkum dynamických vlastností formou drop testů, je popsána v kapitole 12.1.3.2. Typické odezvy při drop testech jsou pro skokovou výšku 10 mm znázorněny na obr. 12-9 až 12-12. Koeficient relativního tlumení  $\delta$  a kritická míra dynamického tlumení  $\zeta$ , vyhodnocené z provedených testů v závislosti na výšce dropu a úrovni zatížení (tare=vlastní hmotnost, laden=přidána hmota 11 200 kg), jsou uvedeny v tabulkách 12-4 až 12-11.



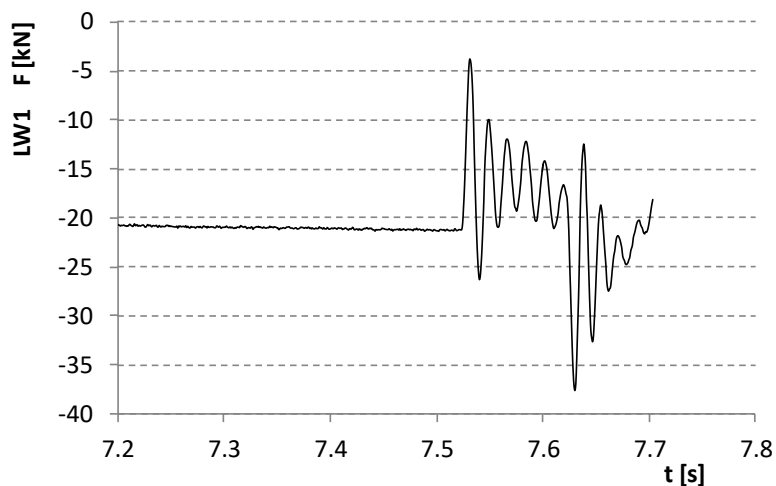
Obr. 12-9 Relativní dráha DS1 kola 1 při 10 mm drop testu přední nápravy, tare



Obr. 12-10 Zrychlení šasi vagónu VACH13 při 10 mm drop testu přední nápravy, tare



Obr. 12-11 Posuv zatěžovacího servoválcce DW1 při 10 mm drop testu přední nápravy, tare



Obr. 12-12 Zatížení zatěžovacího servoválce LW1 při 10 mm drop testu přední nápravy, tare

Drop 5 mm	State	Axle	Sensor	File	Offset	
	Tare	1. axle	DS1	D7	mean	-1.615
	t [s]	z [mm]	z <sub>cor</sub> [mm]	f [Hz]	δ [°]	ζ [%]
Positive peaks	15.419	-0.31	1.30	6.0	0.25	4.0
	15.585	-0.60	1.01	6.0	0.23	3.7
	15.753	-0.81	0.80	6.1	0.17	2.7
	15.917	-0.94	0.68	6.1	0.20	3.2
	16.081	-1.06	0.55	<b>6.0</b>	0.21	<b>3.4</b>
Negative peaks	15.505	-2.62	-1.01	6.1	0.18	2.9
	15.668	-2.46	-0.84	6.1	0.25	4.0
	15.833	-2.27	-0.65	6.0	0.21	3.4
	16	-2.14	-0.53	6.2	0.22	3.5
	16.162	-2.04	-0.42	<b>6.1</b>	0.22	<b>3.4</b>

Tab. 12-4 Výsledky drop testu 5 mm, DS1, tare

Drop 10 mm	State	Axle	Sensor	File	Offset	
	Tare	1. axle	DS1	D8	mean	-1.62
	t [s]	z [mm]	z <sub>cor</sub> [mm]	f [Hz]	δ [°]	ζ [%]
Positive peaks	7.763	1.207	2.827	5.8	0.34	5.4
	7.934	0.40	2.02	5.8	0.26	4.1
	8.107	-0.06	1.56	6.0	0.21	3.3
	8.274	-0.36	1.26	5.9	0.20	3.1
	8.443	-0.58	1.04	<b>5.9</b>	0.25	<b>4.0</b>
Negative peaks	7.851	-3.77	-2.15	5.9	0.24	3.8
	8.02	-3.31	-1.69	5.9	0.25	4.0
	8.189	-2.93	-1.31	5.9	0.23	3.7
	8.358	-2.66	-1.04	6.0	0.27	4.4
	8.526	-2.41	-0.79	<b>5.9</b>	0.25	<b>4.0</b>

Tab. 12-5 Výsledky drop testu 10 mm, DS1, tare



Drop 5mm	State	Axle	Sensor	File	Offset	
	Tare	2. axle	DS3	D9	mean	-0.25
	t [s]	z [mm]	$z_{cor}$ [mm]	f [Hz]	$\delta$ [ ]	$\zeta$ [%]
Positive peaks	12.026	0.60	0.85	6.1	0.33	5.3
	12.189	0.36	0.61	5.8	0.22	3.5
	12.36	0.24	0.49	6.1	0.18	2.8
	12.523	0.16	0.41	6.0	0.35	5.5
	12.69	0.04	0.29	<b>6.0</b>	0.27	<b>4.3</b>
Negative peaks	12.105	-0.86	-0.61	6.0	0.22	3.5
	12.271	-0.74	-0.49	6.0	0.28	4.5
	12.437	-0.62	-0.37	6.0	0.18	2.8
	12.605	-0.56	-0.31	6.2	0.39	6.2
	12.766	-0.46	-0.21	<b>6.1</b>	0.27	<b>4.2</b>

Tab. 12-6 Výsledky drop testu 5 mm, DS3, tare

Drop 10mm	State	Axle	Sensor	File	Offset	
	Tare	2. axle	DS3	D10	mean	-0.23
	t [s]	z [mm]	$z_{cor}$ [mm]	f [Hz]	$\delta$ [ ]	$\zeta$ [%]
Positive peaks	12.873	0.70	0.93	6.1	0.42	6.7
	13.038	0.38	0.61	6.1	0.35	5.6
	13.203	0.20	0.43	6.0	0.00	0.0
	13.369	0.20	0.43	5.9	0.33	5.2
	13.539	0.08	0.31	<b>6.0</b>	0.27	<b>4.4</b>
Negative peaks	12.955	-1.04	-0.81	6.1	0.50	8.0
	13.119	-0.72	-0.49	6.1	0.09	1.4
	13.282	-0.68	-0.45	6.0	0.20	3.1
	13.45	-0.60	-0.37	6.0	0.32	5.0
	13.618	-0.50	-0.27	<b>6.0</b>	0.27	<b>4.4</b>

Tab. 12-7 Výsledky drop testu 10 mm, DS3, tare

Drop 5 mm	State	Axle	Sensor	File	Offset	
	Laden	1. axle	DS1	D32	mean	161.75
	t [s]	z [mm]	$z_{cor}$ [mm]	f [Hz]	$\delta$ [ ]	$\zeta$ [%]
Positive peaks	39.898	163.30	1.55	4.0	0.14	2.2
	40.151	163.10	1.35	4.0	0.16	2.6
	40.4	162.90	1.15	4.0	0.19	3.0
	40.65	162.70	0.95	4.0	0.24	3.8
	40.898	162.50	0.75	<b>4.0</b>	0.18	<b>2.9</b>
Negative peaks	40.021	160.40	-1.35	4.0	0.16	2.6
	40.274	160.60	-1.15	4.0	0.19	3.0
	40.527	160.80	-0.95	4.1	0.24	3.8
	40.773	161.00	-0.75	4.0	0.14	2.3
	41.022	161.10	-0.65	<b>4.0</b>	0.18	<b>2.9</b>

Tab. 12-8 Výsledky drop testu 5 mm, DS1, laden

Drop 10 mm	State	Axle	Sensor	File	Offset	
	Laden	1. axle	DS1	D34	mean	160.82
	t [s]	z [mm]	$z_{cor}$ [mm]	f [Hz]	$\delta$ [°]	$\zeta$ [%]
Positive peaks	14.737	163.80	2.98	3.9	0.22	3.6
	14.992	163.20	2.38	3.9	0.18	2.9
	15.247	162.80	1.98	3.9	0.23	3.6
	15.501	162.40	1.58	4.0	0.14	2.2
	15.753	162.20	1.38	<b>3.9</b>	0.19	<b>3.1</b>
Negative peaks	14.863	158.40	-2.42	3.9	0.18	2.9
	15.118	158.80	-2.02	3.9	0.22	3.5
	15.375	159.20	-1.62	4.0	0.20	3.3
	15.625	159.50	-1.32	4.0	0.16	2.6
	15.876	159.70	-1.12	<b>3.9</b>	0.19	<b>3.1</b>

Tab. 12-9 Výsledky drop testu 10 mm, DS1, laden

Drop 5 mm	State	Axle	Sensor	File	Offset	
	Laden	2. axle	DS3	D33	mean	233.19
	t [s]	z [mm]	$z_{cor}$ [mm]	f [Hz]	$\delta$ [°]	$\zeta$ [%]
Positive peaks	12.558	234.10	0.91	4.0	0.40	6.3
	12.811	233.80	0.62	4.0	0.18	2.8
	13.06	233.70	0.51	3.9	0.22	3.4
	13.317	233.60	0.41	4.0	0.66	10.5
	13.568	233.40	0.22	<b>4.0</b>	0.36	<b>5.8</b>
Negative peaks	12.676	232.40	-0.78	3.9	0.29	4.7
	12.932	232.60	-0.59	4.0	0.19	3.0
	13.185	232.70	-0.49	4.1	0.23	3.7
	13.43	232.80	-0.38	3.9	0.73	11.7
	13.684	233.00	-0.19	<b>4.0</b>	0.36	<b>5.8</b>

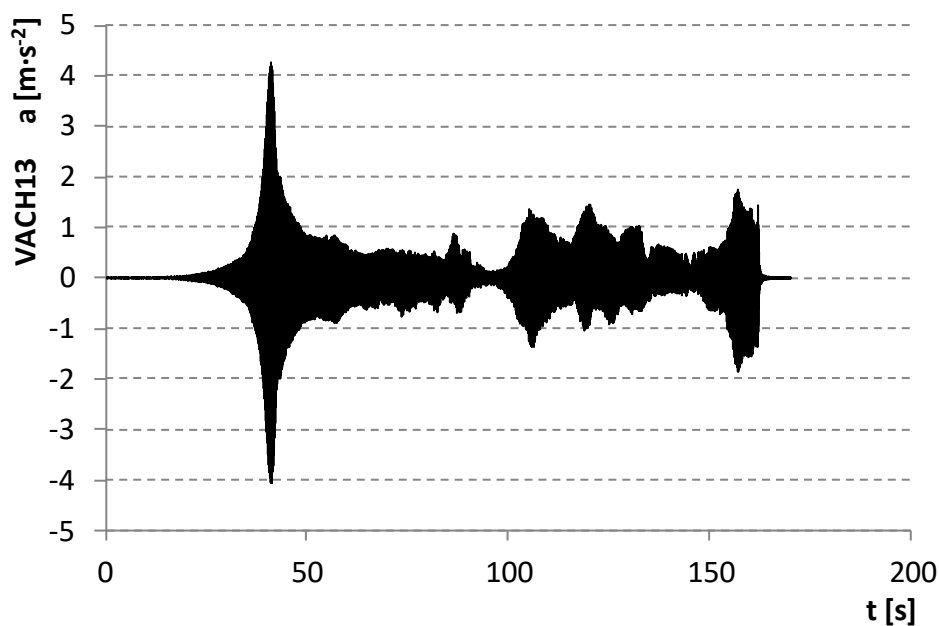
Tab. 12-10 Výsledky drop testu 5 mm, DS3, laden

Drop 10 mm	State	Axle	Sensor	File	Offset	
	Laden	2. axle	DS3	D35	mean	233.25
	t [s]	z [mm]	$z_{cor}$ [mm]	f [Hz]	$\delta$ [°]	$\zeta$ [%]
Positive peaks	15.04	235.10	1.85	3.9	0.31	5.0
	15.295	234.60	1.35	4.0	0.16	2.5
	15.548	234.40	1.16	3.9	0.19	3.0
	15.806	234.20	0.95	4.0	0.38	6.0
	16.055	233.90	0.66	<b>3.9</b>	0.26	<b>4.1</b>
Negative peaks	15.166	231.70	-1.55	4.0	0.22	3.4
	15.418	232.00	-1.25	4.0	0.18	2.8
	15.671	232.20	-1.05	3.9	0.21	3.4
	15.928	232.40	-0.84	4.0	0.44	7.0
	16.178	232.70	-0.55	<b>4.0</b>	0.26	<b>4.1</b>

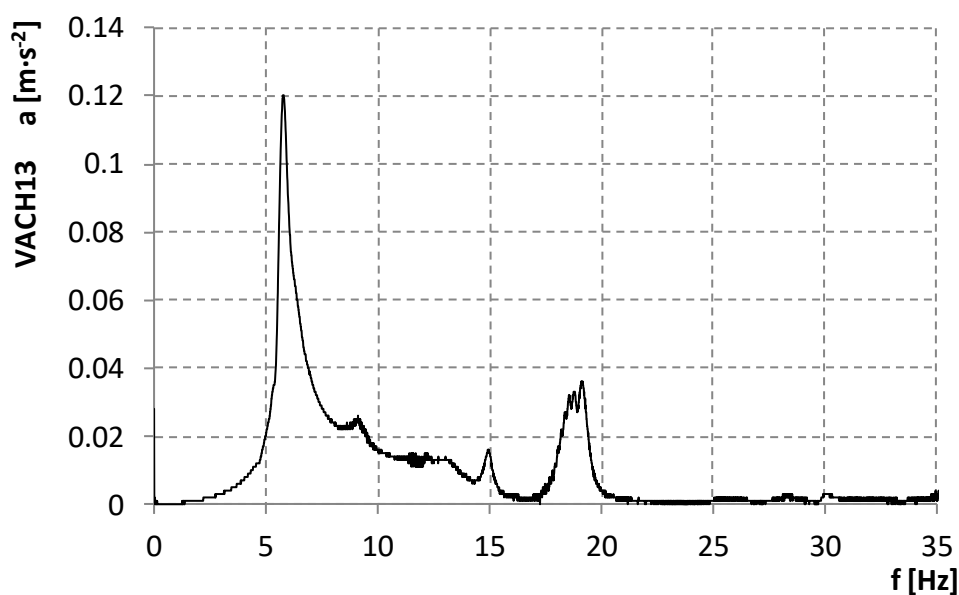
Tab. 12-11 Výsledky drop testu 10 mm, DS3, laden

### 12.2.2.2 Sweep testy

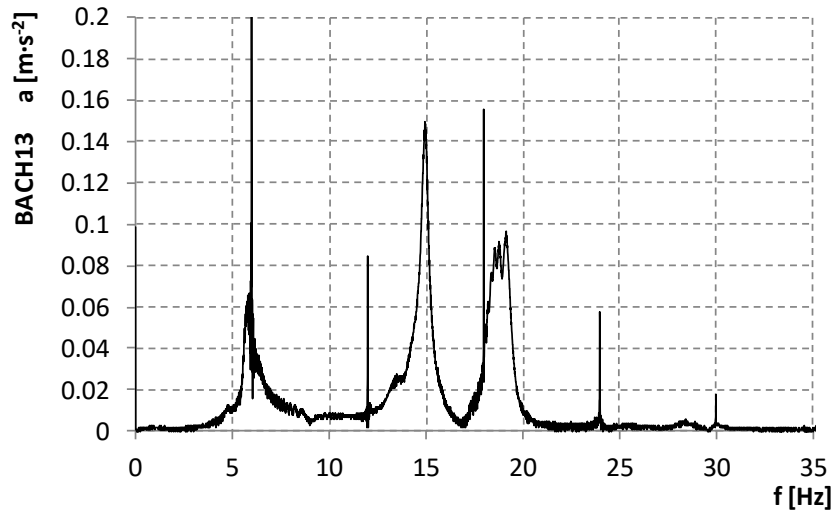
Metodika, použitá pro výzkum dynamických vlastností formou sweep testů, je popsána v kapitole 12.1.3.3. Typický časový průběh sweep testu je ukázán na obr. 12-13. Amplitudová spektra získaná při sweep testech pro vybrané měřené signály jsou pro zatížení pouze vlastní hmotností znázorněna na obr. 12-14 až 12-18, podobně pro vagón naložený přídatnou hmotností 11 200kg, viz obr. 12-1- až 12-23.



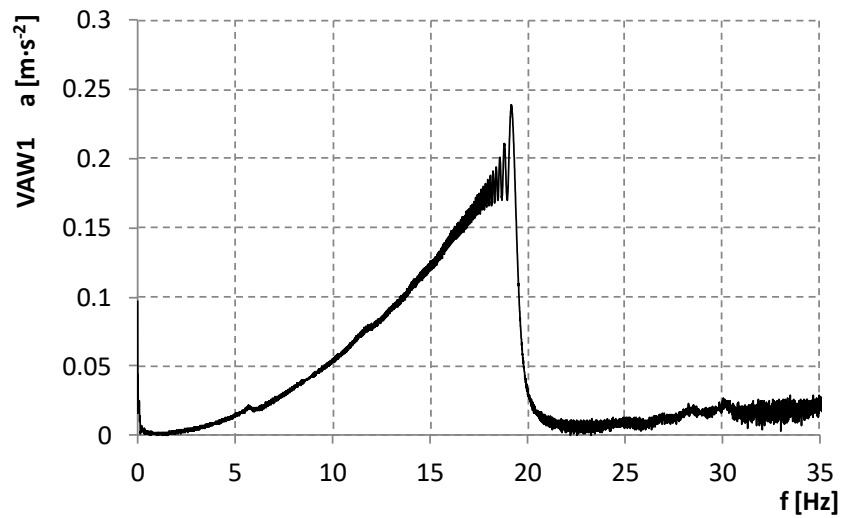
Obr. 12-13 Typický časový průběh při sweep testu



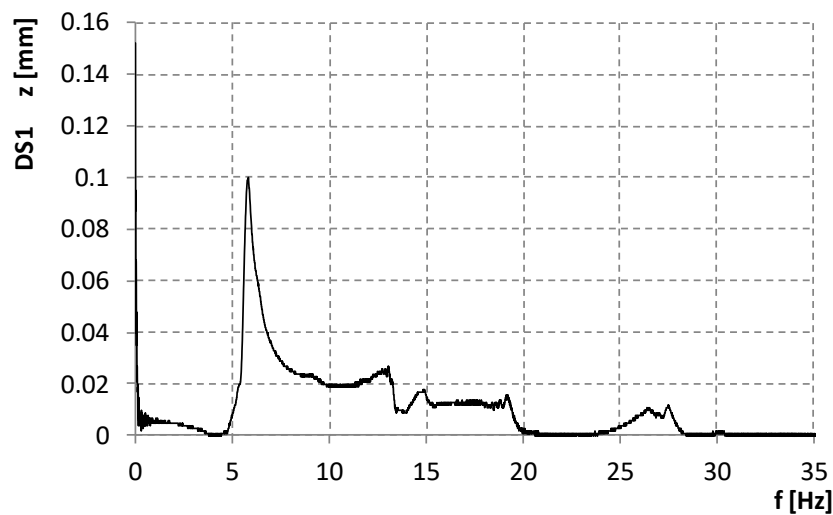
Obr. 12-14 Spektrum amplitud vertikálního zrychlení VACH13 při sweep testu, tare



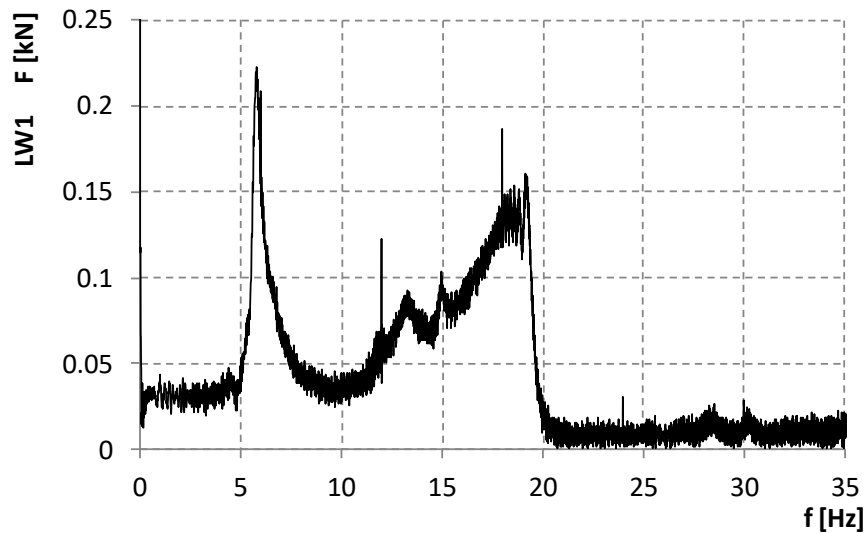
Obr. 12-15 Spektrum amplitud vertikálního zrychlení BACH13 při sweep testu, tare



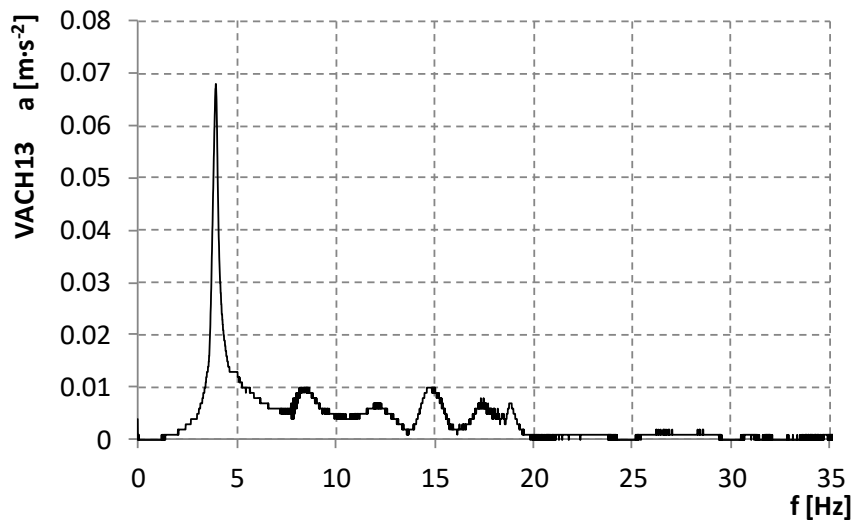
Obr. 12-16 Spektrum amplitud vertikálního zrychlení VAW1 při sweep testu, tare



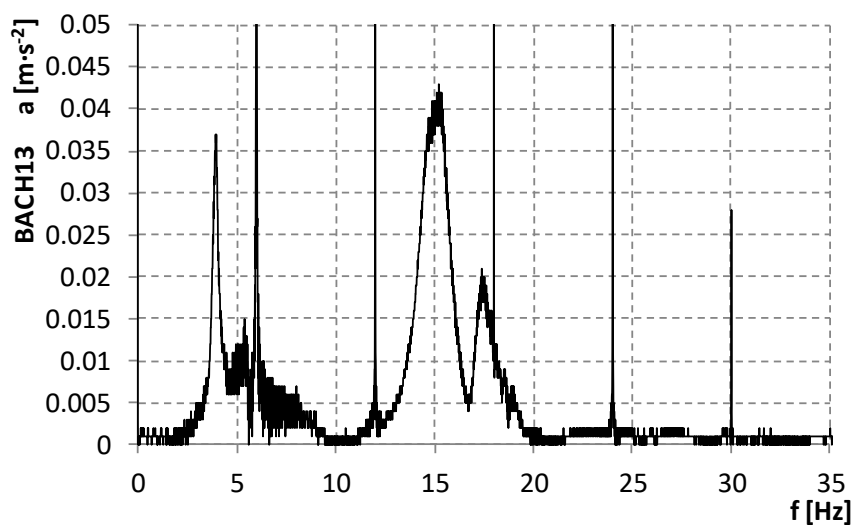
Obr. 12-17 Spektrum amplitud posuvu DS1 při sweep testu, tare



Obr. 12-18 Spektrum amplitud kolové síly LW1 při sweep testu, tare

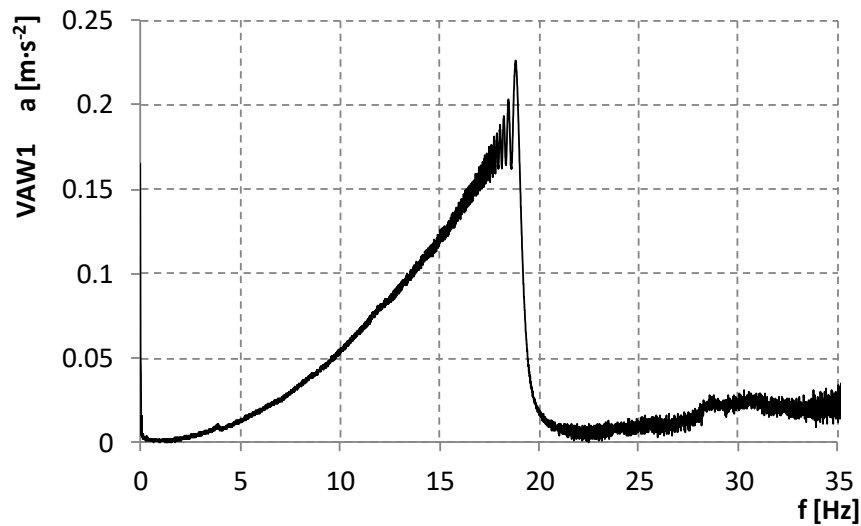


Obr. 12-19 Spektrum amplitud vertikálního zrychlení VACH13 při sweep testu, laden

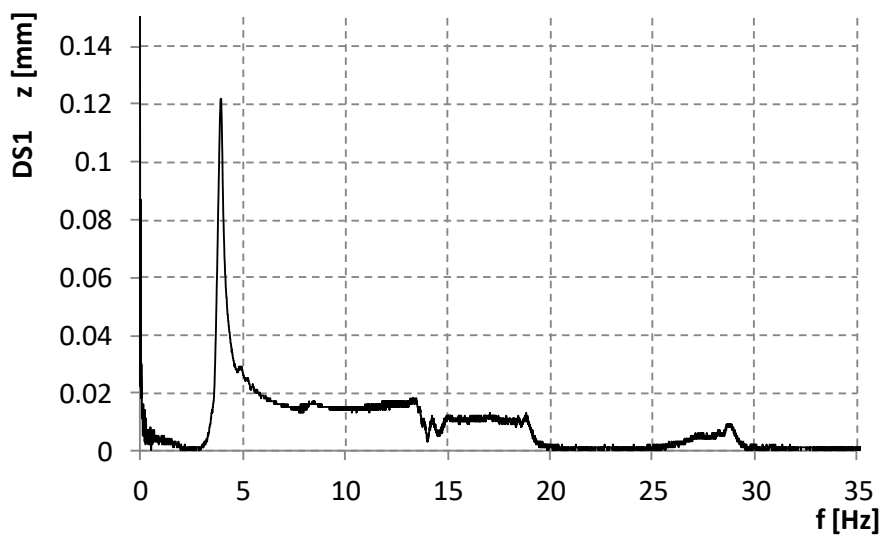


Obr. 12-20 Spektrum amplitud vertikálního zrychlení BACH13 při sweep testu, laden

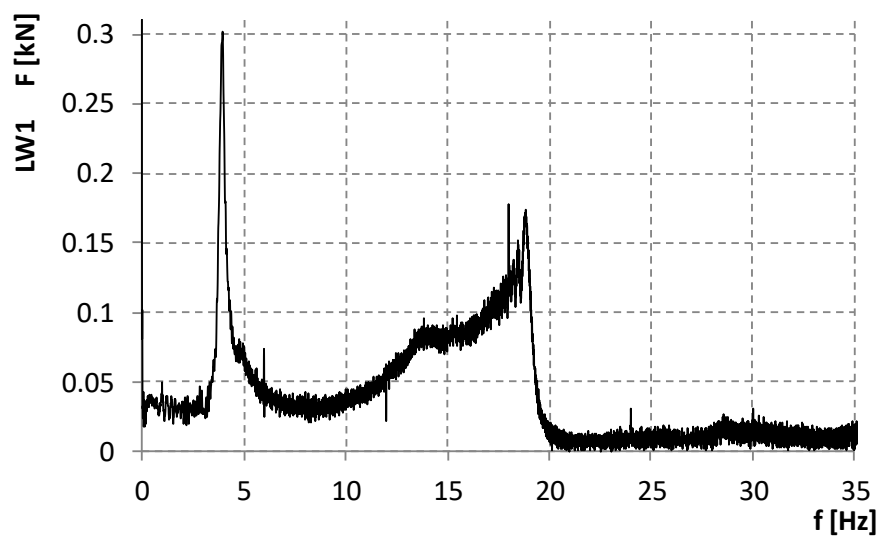




Obr. 12-21 Spektrum amplitud vertikálního zrychlení VAW1 při sweep testu, laden



Obr. 12-22 Spektrum amplitud vertikálního posuvu DS1 při sweep testu, laden



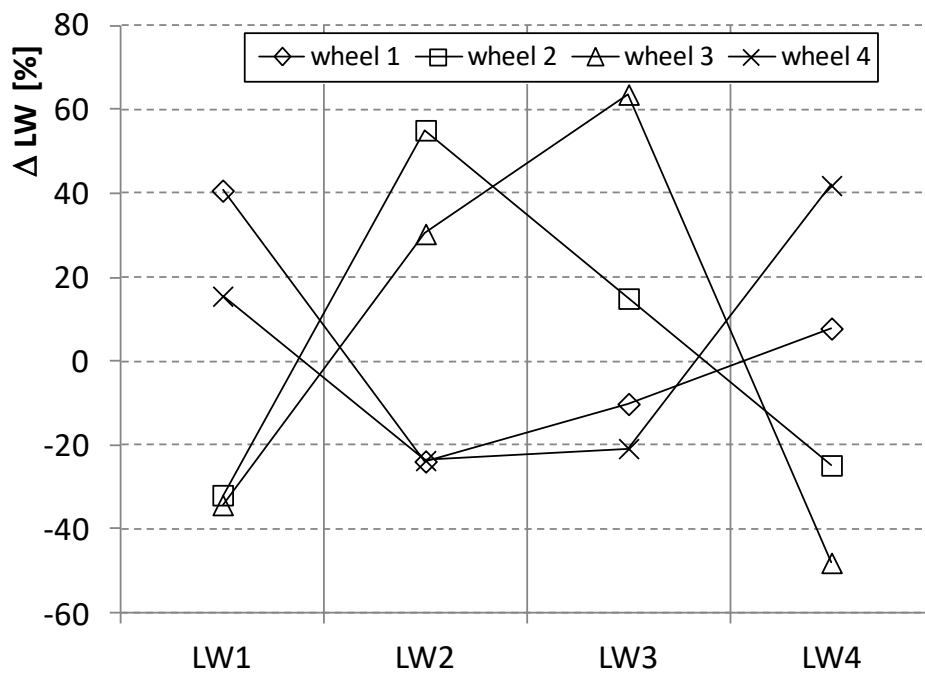
Obr. 12-23 Spektrum amplitud kolové síly LW1 při sweep testu, laden

### 12.2.2.3 Výzkum torzní tuhosti podvozku

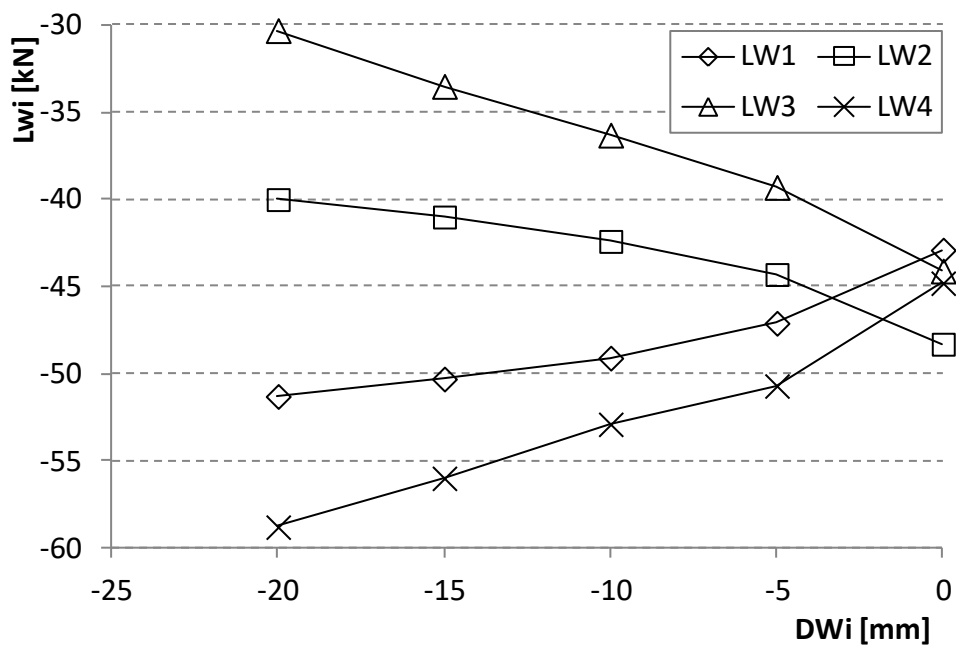
Metodika, použitá pro výzkum torzní tuhosti podvozku je popsána v kapitole 12.1.3.5. Měřené hodnoty změny kolových sil v průběhu zkrucování GFRP podvozku jsou, pro podvozek zatížený vlastní hmotností konfigurace vagón-podvozek, uvedeny v tab. 12-12. Torzní tuhost byla studována postupným vychylováním všech čtyř kol podvozku. Diference mezi jednotlivými kolovými změnami se pohybují v mezích daných TSI požadavky a tyto parametry splňují. Graficky jsou výsledky prezentovány na obr. 12-24 až 12-27. Podobně jsou hodnoty změny kolových sil sumarizovány při výzkumu torzní tuhosti pro stav zatížení přidavnou hmotou 11 200kg uvedeny v tab. 12-13 a na obr. 12-28.

DW1 [mm]	DW2 [mm]	DW3 [mm]	DW4 [mm]	LW1 [kN]	LW2 [kN]	LW3 [kN]	LW4 [kN]	LW1 [%]	LW2 [%]	LW3 [%]	LW4 [%]
0	0	0	0	-20.4	-21.4	-21.7	-21.7	0	0	0	0
-5	0	0	0	-16.1	-22.9	-22.2	-21.5	21.1	-7.0	-2.3	0.9
-10	0	0	0	-14.8	-24	-23	-21	27.5	-12.1	-6.0	3.2
-15	0	0	0	-13.5	-25.2	-23.5	-20.5	33.8	-17.8	-8.3	5.5
-20	0	0	0	-12.1	-26.5	-23.9	-20	40.7	-23.8	-10.1	7.8
0	0	0	0	-20.4	-18.7	-20.7	-21.8	0	0	0	0
0	-5	0	0	-21.8	-17.1	-20.8	-22.6	-6.9	8.6	-0.5	-3.7
0	-10	0	0	-23.3	-15.5	-19.4	-24.4	-14.2	17.1	6.3	-11.9
0	-15	0	0	-25.1	-9.4	-18.8	-25.8	-23.0	49.7	9.2	-18.3
0	-20	0	0	-26.9	-8.4	-17.6	-27.2	-31.9	55.1	15.0	-24.8
0	0	0	0	-19	-21.4	-19.5	-22.5	0	0	0	0
0	0	-5	0	-20.1	-20.1	-16.5	-25	-5.8	6.1	15.4	-11.1
0	0	-10	0	-21.7	-18.5	-14	-27.3	-14.2	13.6	28.2	-21.3
0	0	-15	0	-24	-16.4	-10.2	-30.1	-26.3	23.4	47.7	-33.8
0	0	-20	0	-25.5	-14.9	-7.1	-33.3	-34.2	30.4	63.6	-48.0
0	0	0	0	-19.3	-19.9	-23.6	-21	0	0	0	0
0	0	0	-5	-18.9	-20.9	-24.4	-18.6	2.1	-5.0	-3.4	11.4
0	0	0	-10	-17.7	-22.5	-25.4	-17	8.3	-13.1	-7.6	19.0
0	0	0	-15	-16.9	-23.8	-26.8	-14.5	12.4	-19.6	-13.6	31.0
0	0	0	-20	-16.3	-24.6	-28.5	-12.2	15.5	-23.6	-20.8	41.9

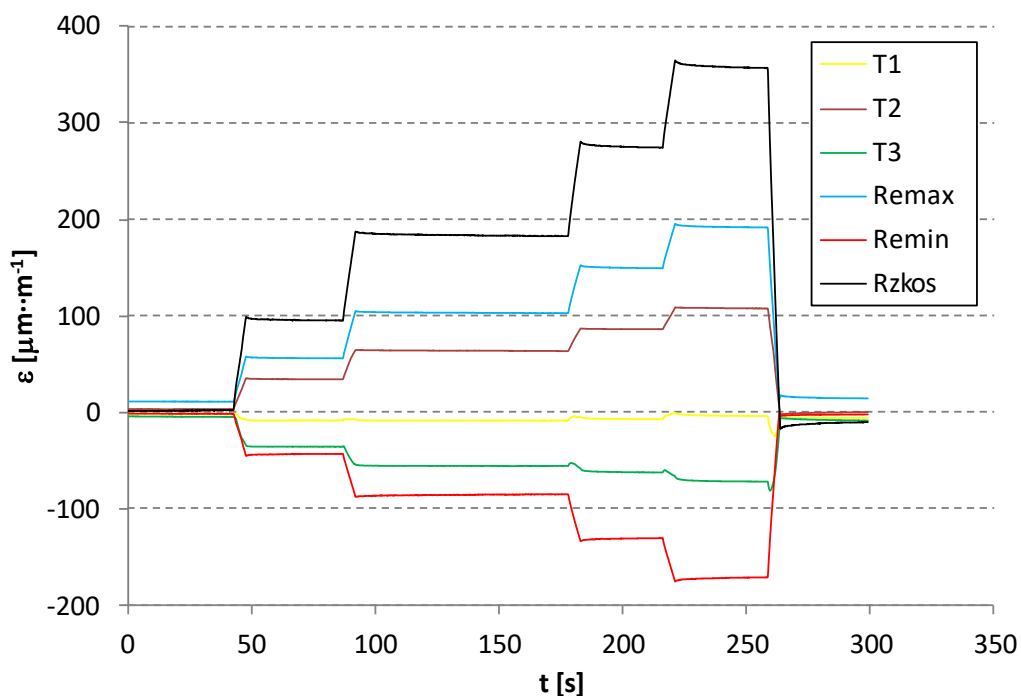
Tab. 12-12 Změna kolových sil, LW<sub>i</sub> v důsledku posunutí kola DW<sub>i</sub> při torzním testu, tare



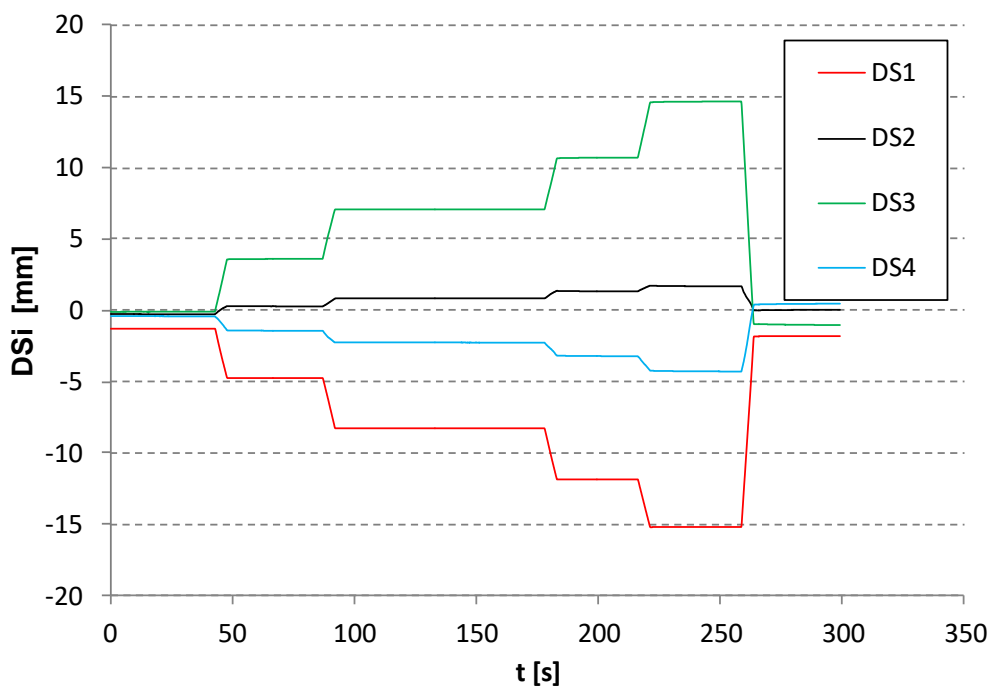
Obr. 12-24 Procentní změna kolové síly při posunutí -20 mm jednoho kola DWi, tare



Obr. 12-25 Absolutní změna kolové síly při posunutí -20 mm kola 3, tare



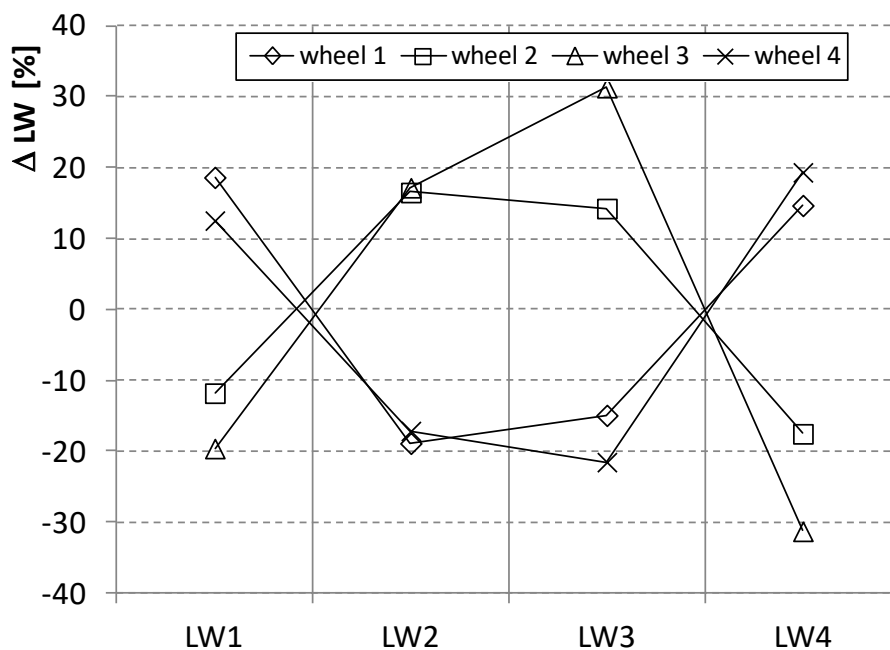
Obr. 12-26 Časový průběh tenzometrů při změně kolové síly při posunutí -20 mm kola 3, tare



Obr. 12-27 Časový průběh posuvu podvozku  $DS_i$  při změně kolové síly -20 mm kola 3, tare

DW1	DW2	DW3	DW4	LW1	LW2	LW3	LW4	LW1	LW2	LW3	LW4
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	0	0	0	-45.6	-45.1	-43.6	-47	0	0	0	0
-5	0	0	0	-41.7	-49.2	-46.6	-43.4	8.6	-9.1	-6.9	7.7
-10	0	0	0	-40.3	-50.3	-48.6	-41.5	11.6	-11.5	-11.5	11.7
-15	0	0	0	-38.5	-52.1	-49.4	-40.6	15.6	-15.5	-13.3	13.6
-20	0	0	0	-37.1	-53.6	-50.1	-40.1	18.6	-18.8	-14.9	14.7
0	0	0	0	-48.4	-43	-44.2	-45.7	0	0	0	0
0	-5	0	0	-50.6	-40.5	-42.7	-48	-4.5	5.8	3.4	-5.0
0	-10	0	0	-52.1	-38.8	-41.1	-50.2	-7.6	9.8	7.0	-9.8
0	-15	0	0	-52.9	-37.4	-39.3	-51.9	-9.3	13.0	11.1	-13.6
0	-20	0	0	-54.1	-35.9	-37.9	-53.7	-11.8	16.5	14.3	-17.5
0	0	0	0	-42.9	-48.3	-44.1	-44.8	0	0	0	0
0	0	-5	0	-47.1	-44.3	-39.3	-50.7	-9.8	8.3	10.9	-13.2
0	0	-10	0	-49.1	-42.4	-36.3	-52.9	-14.5	12.2	17.7	-18.1
0	0	-15	0	-50.3	-41	-33.5	-56	-17.2	15.1	24.0	-25.0
0	0	-20	0	-51.3	-40	-30.3	-58.8	-19.6	17.2	31.3	-31.3
0	0	0	0	-45.4	-45.6	-44.2	-46.5	0	0	0	0
0	0	0	-5	-42.8	-48.8	-48.5	-43.6	5.7	-7.0	-9.7	6.2
0	0	0	-10	-41.2	-50.3	-50.3	-41.5	9.3	-10.3	-13.8	10.8
0	0	0	-15	-40.4	-52	-51.6	-39.8	11.0	-14.0	-16.7	14.4
0	0	0	-20	-39.7	-53.4	-53.7	-37.5	12.6	-17.1	-21.5	19.4

Tab. 12-13 Změna kolových sil, LW<sub>i</sub> v důsledku posunutí kola DW<sub>i</sub> při torzním testu, laden



Obr. 12-28 Procentní změna kolové síly při posunutí -20 mm jednoho kola DW<sub>i</sub>, laden

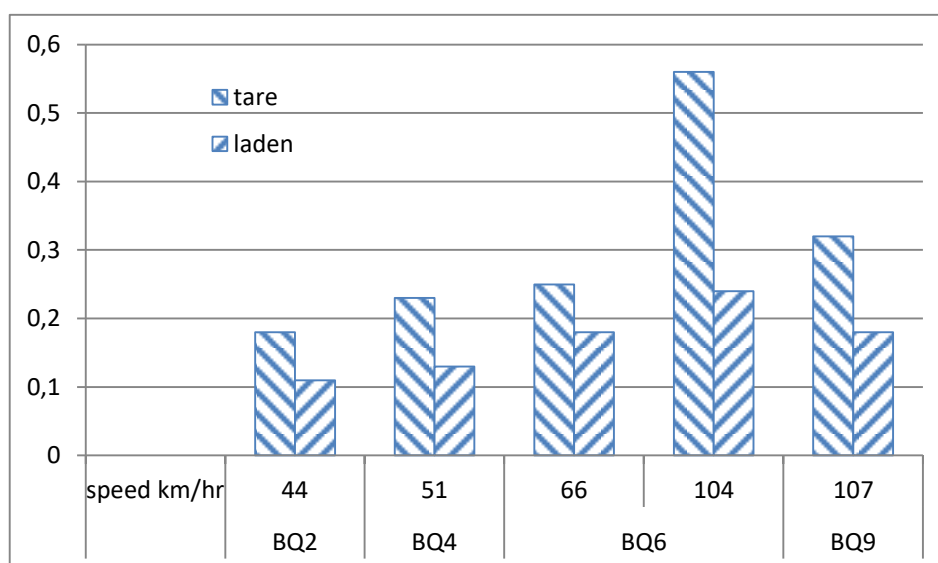


### 12.2.3 Track profile tests

Metodika, použitá pro výzkum jízdních vlastností pomocí shaker rig je popsána v kapitole 12.1.3.2. Výsledky jízdních testů pro jednotlivé kvalitativní traťové úseky jsou formou vypočteného dynamického součinitele zatížení (DLC) jak pro vlastní hmotnost, tak i přidanou zátěž, uvedeny v tab. 12-14 a na obr 12-29, vybrané parametry získané při simulaci průjezdu tratí v tab. 12-15.

Kvalita tratě	v [km·h <sup>-1</sup> ]	DLC [ ] – vlastní hmotnost - tare				DLC [ ] přidaná zátěž -laden			
		Kolo 1	Kolo 2	Kolo 3	Kolo 4	Kolo 1	Kolo 2	Kolo 3	Kolo 4
BQ2	22	0.13	0.12	0.16	0.14	0.09	0.09	0.10	0.10
	44	0.21	0.19	0.25	0.21	0.13	0.13	0.12	0.11
	66	0.31	0.25	0.36	0.28	0.21	0.19	0.20	0.18
BQ4	25	0.15	0.15	0.18	0.16	0.13	0.12	0.13	0.13
	51	0.25	0.25	0.33	0.27	0.16	0.15	0.16	0.15
	66	0.39	0.30	0.41	0.34	0.21	0.19	0.22	0.19
BQ6	76	0.49	0.36	0.47	0.39	0.29	0.24	0.27	0.24
	35	0.22	0.21	0.25	0.23	0.14	0.14	0.14	0.14
	52	0.29	0.27	0.32	0.29	0.18	0.18	0.16	0.16
BQ9	66	0.36	0.31	0.36	0.34	0.23	0.22	0.22	0.21
	69	0.38	0.33	0.39	0.36	0.24	0.23	0.23	0.22
	104	0.62	0.51	0.62	0.57	0.38	0.29	0.35	0.31
BQ9	53	0.09	0.08	0.12	0.11	0.07	0.06	0.06	0.06
	66	0.11	0.11	0.16	0.15	0.09	0.08	0.09	0.09
	107	0.27	0.30	0.44	0.40	0.18	0.18	0.24	0.22
	160	0.59	0.55	0.72	0.69	0.35	0.27	0.35	0.32

Tab. 12-14 Dynamický koeficient zatížení DLC vyhodnocený ze simulace průjezdu tratí



Obr. 12-29 Porovnání DLC pro tare a laden

Sensor	Jednotka	Vlastní hmotnost - tare				Přidaná zátěž - laden			
		max	min	mean	rozkmít	max	min	mean	rozkmít
T1	$\varepsilon$ [mm·m <sup>-1</sup> ]	102.7	-131.8	-0.4	234.5	13.0	-390.7	-0.4	403.7
T2	$\varepsilon$ [mm·m <sup>-1</sup> ]	86.9	-85.2	0.0	170.4	133.0	-39.6	0.0	170.2
T3	$\varepsilon$ [mm·m <sup>-1</sup> ]	97.7	-84.5	0.0	175.7	72.5	-70.6	0.0	141.6
Ra	$\varepsilon$ [mm·m <sup>-1</sup> ]	39.4	-30.2	0.0	65.3	15.8	-44.2	0.0	59.8
Rb	$\varepsilon$ [mm·m <sup>-1</sup> ]	159.4	-165.8	1.0	309.4	131.3	-200.6	1.0	299.8
Rc	$\varepsilon$ [mm·m <sup>-1</sup> ]	109.9	-147.6	1.5	257.5	77.5	-153.8	1.5	231.4
DS1	d [mm]	12.2	-14.7	0.0	25.5	19.9	-18.7	-0.2	38.6
DS2	d [mm]	11.9	-16.1	0.1	25.4	19.3	-19.0	-0.1	34.8
DS3	d [mm]	12.7	-8.2	-0.1	20.7	14.6	-10.5	-0.3	23.1
DS4	d [mm]	17.4	-12.0	0.2	29.4	17.0	-11.6	0.0	28.6
VAW1	a [m·s <sup>-2</sup> ]	270.2	-214.1	0.0	484.3	317.2	-248.4	0.0	565.5
VAW2	a [m·s <sup>-2</sup> ]	184.6	-173.6	-0.1	358.2	178.8	-183.0	0.1	361.8
VAW3	a [m·s <sup>-2</sup> ]	263.4	-213.9	0.0	467.0	142.9	-97.9	0.2	233.6
VAW4	a [m·s <sup>-2</sup> ]	333.1	-309.7	0.1	627.4	199.2	-172.5	0.0	371.6
VACH13	a [m·s <sup>-2</sup> ]	11.3	-7.8	0.0	19.2	8.5	-8.3	0.0	16.9
VACH24	a [m·s <sup>-2</sup> ]	11.8	-9.4	0.0	20.4	9.3	-8.8	0.0	18.1
BACH13	a [m·s <sup>-2</sup> ]	7.5	-7.2	0.1	14.7	5.8	-6.6	0.0	12.0
BACH24	a [m·s <sup>-2</sup> ]	8.0	-7.0	0.1	14.5	6.1	-5.7	0.0	11.4

Tab. 12-15 Vybrané parametry získané při simulaci průjezdu tratí

## 12.2.4 Diskuze výsledků dynamických testů

Následující efekty byly pozorovány a vyhodnoceny po ukončení testů:

- přestože byl GFRP podvozek konstruován s cílem dosáhnout vnitřního tlumení cca 20%, testy prokázaly přibližně jen pětinou hodnotu. Z drop testů vyplývá, že na rozdíl od konvenčních nákladních podvozků, používajících pro svoje prvotní vypružení listové nebo šroubové ocelové pružiny, je vnitřní tlumení reprodukovatelné a navíc fungující již pro malé pádové výšky 5 mm, tj malé nerovnosti tratí. Konstrukce GFRP podvozku však dává velký potenciál pro výrazné zvýšení vnitřního tlumení, čímž by došlo k významné optimalizaci jeho jízdních vlastností. Efektivní drop testy se zkorodovanými ocelovými pružinami je možné provádět od minimální pádové výšky cca 20 mm a výše. Tak velké výškové rozdíly tratí však převážně neexistují, při nižších není zase dynamické vnitřní tlumení možno změřit v důsledku velkého tření mezi zkorodovanými listy pružnice. Ta se pak chová spíše jako tuhý nosník a vozidlo s tímto vypružením nadměrně poškozují infrastrukturu
- amplitudy měřených zdvihů indukčními snímači DSi se zvyšují při přidání zátěže. Tento jev lze pozorovat jednak při drop testech, tak i při simulaci jízdních úseků tratí BQi. Podobně je tomu také při sweepových testech, kde se při snížení rezonanční frekvence u naloženého vagónu zvyšuje amplituda zdvihu DSi o cca 20%. Tato skutečnost dává určitou nejistotu, zda by vozidlo, vybavené GFRP podvozkem této generace, bylo

stabilní za všech jízdních podmínek a situací. Byly identifikovány tři významné rezonanční frekvence odpružených hmot, náprav a skříně vagónu

- z měření torzní tuhosti vyplývá, že GFRP podvozek splňuje podle očekávání podmínky TSI oblasti změny kolové síly při vychýlení jednoho kola z roviny ostatních o hodnotu 1% z rozvoru náprav podvozku. Ještě příznivější jsou výsledky měření torzní tuhosti pro naložený vagón, kde procentní odchylky změn kolových sil od normálových nepřesahují poloviční povolenou hodnotu. Doposud používané konvenční podvozky pro nákladní dopravu mají tyto parametry téměř dvojnásobné oproti GFRP a překračují povolenou mez. Vertikální tuhost těchto konvenčních podvozků je srovnatelná s hodnotami pro GFRP podvozek. Torzní tuhost, která často bývá příčinou extrémního poškozování infrastruktury, má GFRP podvozek téměř poloviční. To je dáno možností účinné optimalizace struktury nosných dílů kladením skelných vláken v určitých směrech s cílem získat požadované pevnostní a tuhostní parametry konstrukčního dílu. Spolu se samořiditelností jeho dvojkolí, tj. proměnným rozvorem náprav při průjezdu oblouků, dává tento podvozek velký potenciál stát se tzv. „track friendly“
- po nezbytném zvýšení vnitřního tlumení GFRP podvozku na, z pohledu zlepšení jízdních vlastností, optimální hodnotu, bude nezbytné zakončit jeho vývoj pevnostní únavovou zkouškou. Ta případně odhalí kritická místa konstrukce nebo technologie jeho výroby. Nezbytným závěrem tohoto vývojového procesu musí být také ověření všech klíčových provozních parametrů GFRP podvozku měřením těchto charakteristik na reálné trati či zkušebním okruhu

## 13 Splnění cílů disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je výzkum vybraných vlastností kompozitové konstrukce při stavbě podvozku kolejového vozidla. V kapitole č. 6 této práce jsou ukázány vybrané experimentální prostředky, které tento funkčně i pevnostně náročný konstrukční díl musí splňovat. Navíc pokud není schválen a homologován není možné ho na reálné trati provozovat ani ve zkušebním provozu, tj. není možné jeho pevnostní a dynamické vlastnosti, vzhledem k přísné regulaci železniční dopravy, ověřit na reálné trati.

V rámci mezinárodního projektu Eureka Eurobogie E!1841 OE10017 – Pokroková vypružení železničních vozidel s použitím vláken vyztužených kompozitů, jehož koordinátorem za ČR byl autor této práce, byl vyvinut kompozitní podvozek pro nákladní vagóny. Jedná se o speciální konstrukci lehkého, revolučně inovativního podvozku, který byl navržen tak, aby minimalizoval hluk a vibrace, vznikající z interakce vozidla s kolejovým svrškem. Konstrukce podvozku redukuje statické i dynamické síly, akusticky izoluje skříně vozidla od podvozku a poskytuje vlastní řízení (self-steering) prostřednictvím rozdílných rozvorů kol při průjezdu zatáčkami. Vypružení a částečně tlumící funkce byly integrovány do sklolaminátového rámu podvozku. Zatížení se přenáší ze skříně vagónu na podélníky horního, ale zejména spodního rámu podvozku. Silový tok se dále transmittuje přes ložiskové komory a dvojkolí do kolejového svršku. Podvozek byl navržen pro 22,5 t zatížení nápravy. Konstrukce využívá standardních komponent a je modulární charakteru.

V první fázi se disertační práce věnuje výzkumu dynamickému chování pětínového modelu kompozitového podvozku, který byl v rámci projektu Eurobogie E!1841 navržen a vyroben se všemi detaily za účelem získání dynamických vlastností použitých sklolaminátových kompozitů. Podvozek byl instrumentován sadou snímačů a testován ve třech nejvýznamnějších úsecích trati výletní železnice v Eastleigh. Těmi byly přejezdy křížení kolejí,

výhybek a průjezdy oblouky. Z ucelené sady naměřených veličin byly zpracovány výsledky, které daly obraz o jízdních vlastnostech kompozitního podvozku v porovnání s jeho konvenčním ocelovým duplikátem.

Výzkum vybraných vlastností pokračoval ve své další etapě na dílčích prvcích GFRP podvozku, kterými byly podélník spodního rámu podvozku a příčnický spodního rámu podvozku se dvěma integrovanými pomocnými brzdovými rámy. Za tímto účelem byly vyvinuty zkušební metody a sestaveny zkušební standy, pomocí nichž byly provedeny rozsáhlé testy.

Podélník byl podroben výzkumu vlastností jak při statickém, tak i dynamickém zatěžování. Získaná experimentální data byla zpracována v podobě tuhostních a deformačních charakteristik, byly vyhodnoceny rezonanční frekvence podélníků pro různé úrovně statického předpětí. Podobně byl rozsáhlý experimentální program sestaven a zrealizován na příčnicku spodního rámu podvozku se dvěma integrovanými pomocnými brzdovými rámy. V předložené disertační práci jsou porovnány dvě varianty provedení a dále také ověřeny jeho vlastnosti v oblasti únavové pevnosti.

Cíle práce jsou naplněny i v oblasti výzkumu vlastností GFRP podvozku v měřítku 1:1, které byly experimentálně získány s pomocí vyvinutého a zbudovaného shaker rig standu. Ten umožňuje laboratorně provádět dynamické testy kolejových vozidel. V rámci této etapy byla identifikována vertikální tuhost podvozku, jeho vnitřní tlumení, rezonanční frekvence odpružených hmot, šásí vozidla a nápravy. Její součástí byly také simulace úseků reálné trati, ze kterých byly vyhodnoceny dynamické součinitele zatížení. Pomocí shaker rig byla rovněž identifikována torzní tuhost GFRP podvozku. Některé klíčové parametry zejména dynamických vlastností jsou v disertační práci porovnány s doposud používanými konvenčními podvozky, které jsou vyrobené z ocelových materiálů.

## 14 Závěr

Tato práce shrnuje dosavadní rozvoj kompozitních materiálů v různých průmyslových odvětvích. Na vybraných příkladech dokumentuje podíl kompozitních materiálů na hotových výrobcích či celých energetických či dopravních systémech.

V úvodních kapitolách disertační práce jsou uvedeny příklady uplatnění kompozitních materiálů ve strojírenských oborech včetně energetiky a dopravních systémů. S rostoucí cenou ocelových materiálů a zdokonalováním technologií výroby kompozitů roste podíl využití kompozitových konstrukcí prakticky ve všech oblastech lidské činnosti. K masivnímu rozvoji kompozitních materiálů došlo v leteckém průmyslu, kde u vybraných typů nově vyvinutých letadel přesahuje využití kompozitů 50%. Společným znakem pro použití kompozitních materiálů jsou snížení hmotnosti při současném zachování či zvyšování pevnostních vlastností konstrukcí, redukce emisí vibrací a hluku a snížení celkových výrobních nákladů. Protipólem leteckému průmyslu ve využití kompozitových materiálů je železniční průmysl, velmi konzervativní a k výrazným skokovým změnám jen málo ochotné odvětví, spoléhající na významnou regulaci v podobě rozsáhlé standardizace.

Kolejová vozidla, některé jejich klíčové části a prvky s ohledem na současné využití kompozitních materiálů či jeho potenciál, jsou předmětem samostatné kapitoly věnované železničnímu průmyslu. Jednotlivé kategorie železničních vozidel se zaměřením na jejich funkci a stupeň využití kompozitních prvků při jejich konstrukci jsou popsány v další části zprávy. Je patrné, že k největšímu rozvoji kompozitních materiálů v tomto průmyslovém odvětví došlo u monorailů a samořízených vlaků místní přepravy, ale první významnou

aplikací na napěťově i funkčně exponovaném konstrukčním díle je také náhrada oceli CFRP při výrobě podélníků podvozku pro osobní vagón Kawasaki. Dynamické chování železničního vozidla významně souvisí s jeho systémem vypružení a tlumení. Některé současně používané typy vypružení klasickým způsobem a možnosti využití pokrokových sklolaminátových řešení, jsou popsány v příslušné kapitole této disertační práce v návaznosti na základní vlastnosti kompozitů vhodných pro použití u kolejových vozidel a jejich způsob výroby.

Práce od začátku směřuje k využití sklolaminátových kompozitů ke stavbě železničních podvozků. Práce dále popisuje nutné vlastnosti u jednotlivých železničních vozidel při zaměření zejména na podvozkové rámy a jejich pevnostní ověřování. Hlavním zdrojem zmiňovaných informací jsou znalosti, vědomosti a zkušenost autora práce s prováděním experimentálních činností v oblasti zkoušení rámu podvozku doplněné o odborné články ve sbornících z konferencí, týkající se této problematiky a zpráv některých výzkumných projektů provedených mezinárodními řešitelskými konsorcií.

Nosným tématem vědecko výzkumné činnosti je výzkum a posouzení vybraných vlastností sklolaminátového podvozku a jejich porovnání s vlastnostmi klasické konvenčně konstrukce. Součástí práce je hledání procedur, nástrojů a metodik pro získání těchto vlastností a jejich praktického využití. Práce se může stát dobrým podkladem pro budoucí výzkum provozních parametrů nákladního vagónu se sklolaminátovými podvozky, případně rozšíření jejich použití pro další typy kolejových vozidel.

Dynamické vlastnosti byly nejdříve studovány na pětinovém modelu podvozku na trati výletní železnice v Eastleigh, UK. Výsledky tohoto výzkumu naznačují, že GFRP podvozek v měřítku 1:1 bude „track friendly“ s významnou redukcí kontaktní únavy dvojkolí. Další výhodou bude bezesporu nízká hmotnost umožňující větší užitečné zatížení vozidla. Z analýzy maximální hodnoty zrychlení je zřejmé, že horizontální zrychlení jsou menší u vagónu, který byl vybaven GFRP podvozky. Tato skutečnost je velmi důležitá z pohledu údržby tratí, neboť velká boční zrychlení u neodpružených hmot mají devastující účinky na tratě. Ve vertikální rovině jsou zrychlení obou zkoumaných typů podvozků srovnatelná, i když obecně je odezva na vagón s GFRP podvozky nižší. Je třeba poznamenat, že vertikální tuhost GFRP podvozku byla 1,2 kN/mm a ocelového podvozku 0,83 kN/mm, příčné tuhosti byly 4 kN/mm pro GFRP a 2,1 kN/mm pro ocelové podvozky, hmotnost vagónu s ocelovými podvozky byla pouhých 85 kg, zatímco pro GFRP podvozky 380, resp. 600 kg.

Nejvíce pevnostně exponovanou částí GFRP podvozku jsou podélníky spodního rámu podvozku, kterými je transmitováno svislé zatížení vagónu a jeho nákladu do kolejového svršku. Výzkumu vlastností byly podrobeny dva podélníky. V průběhu testů byly pozorovány dvě hlavní rezonanční frekvence. První nevýrazná pravděpodobně ohybového tvaru kmitu, druhá významně větší s poměrně ostrým ohraničením frekvence.

Důležitým prvkem konstrukce sklolaminátového podvozku je příčník jeho spodního rámu, na kterém jsou připevněny dva pomocné brzdové rámy. Na tyto rámy jsou připevněny dvě brzdové jednotky na každém dvojkolí. V průběhu výzkumu únavových vlastností příčníku s brzdovými rámy došlo k únavovým lomům několika spojovacích prvků, což ukazuje na jejich jistou poddimenzovanost. Toto je však velmi snadné optimalizovat. V průběhu zkoušek došlo rovněž k delaminaci příčníku spodního rámu GFRP podvozku. To ukazuje na ne zcela dobré zvládnutí technologie jeho výroby. S ohledem na poměrně velký průhyb brzdových konzol v průběhu zatěžování je třeba příčník zesílit o další vrstvy sklolaminátu tak, aby došlo k omezení tohoto průhybu. Tím by se předešlo nepříznivému chování brzdového systému při jeho provozu a zároveň by došlo k roznesení mezilamelárního napětí do více vrstev a tedy k jeho snížení, potažmo delší životnosti. Okrajové podmínky tohoto zkušebního uspořádání nemusely odpovídat přesně variantě, kdy je příčník celistvě integrován do podélníku. Mezi pozitivní faktory patří prokázání bezpečného charakteru dosažení mezního stavu při únavové zkoušce



kompozitního dílu. Vlivem cyklického zatížení došlo k delaminaci příčnicku spodního rámu GFRP podvozku. Při tomto mezním stavu konstrukce však i nadále zůstala zachována její funkce, i když poddajnost brzdových konzol se zvětšila. Nicméně vlak by s tímto typem uložení brzdových jednotek byl schopen zastavit. Podobná nehoda při použití konvenčních materiálů má charakter rostoucí trhliny, kde po dosažení její mezní hodnoty dochází k úplnému dolomení, brzdový systém není schopen fungovat. Pomocné brzdové rámy, určené pro zavěšení brzdových jednotek, odolaly aplikovanému počtu cyklů při daném cyklickém zatěžování. To ukazuje na jejich dostatečné nadimenzování i technologické zvládnutí jejich výroby.

Významnou etapou výzkumu vybraných vlastností sklolaminátového podvozku byly experimentální práce jeho prototypu v měřítku 1:1 pomocí shaker rig testů. Přestože byl GFRP podvozek konstruován s cílem dosáhnout vnitřního tlumení cca 20%, testy prokázaly přibližně jen pětinou hodnotu. Z drop testů vyplývá, že na rozdíl od konvenčních nákladních podvozků, používajících pro svoje prvotní vypružení listové nebo šroubové ocelové pružiny, je vnitřní tlumení reprodukovatelné a navíc fungující již pro malé pádové výšky 5 mm, tj. malé nerovnosti tratí. Konstrukce GFRP podvozku však dává velký potenciál pro výrazné zvýšení vnitřního tlumení, čímž by došlo k významné optimalizaci jeho jízdních vlastností. Efektivní drop testy se zkorodovanými ocelovými pružinami je možné provádět od minimální pádové výšky cca 20 mm a výše. Tak velké výškové rozdíly tratí však převážně neexistují, při nižších není zase dynamické vnitřní tlumení možno změřit v důsledku velkého tření mezi zkorodovanými listy pružnice. Ta se za těchto podmínek chová spíše jako tuhý nosník a vozidlo s tímto vypružením nadměrně poškozují infrastrukturu.

Amplitudy měřených zdvihů indukčními snímači DSi se zvyšují při přidání zátěže. Tento jev lze pozorovat jednak při drop testech, tak i při simulaci jízdních úseků tratí BQi. Podobně je tomu také při sweepových testech, kde se při snížení rezonanční frekvence u naloženého vagónu zvyšuje amplituda zdvihu DSi o cca 20%. Tato skutečnost dává určitou nejistotu, zda by vozidlo, vybavené GFRP podvozkem této generace, bylo stabilní za všech jízdních podmínek a situací.

Z měření torzní tuhosti vyplývá, že GFRP podvozek splňuje podle očekávání podmínky TSI v oblasti změny kolové síly při vychýlení jednoho kola z roviny ostatních o hodnotu 1% z rozvoru náprav podvozku. Ještě příznivější jsou výsledky měření torzní tuhosti pro naložený vagón, kde procentní odchylky změn kolových sil od normálových nepřesahují poloviční povolenou hodnotu. Doposud používané konvenční podvozky pro nákladní dopravu mají tyto parametry téměř dvojnásobné oproti GFRP a překračují povolenou mez. Vertikální tuhost těchto konvenčních podvozků je srovnatelná s hodnotami pro GFRP podvozek, torzní tuhost, která často bývá příčinou extrémního poškozování infrastruktury, má GFRP podvozek téměř poloviční. To je dáno možností účinné optimalizace struktury nosných dílů kladením skelných vláken v určitých směrech s cílem získat požadované pevnostní a tuhostní vlastnosti konstrukčního dílu. Spolu se samořiditelností jeho dvojkolí, tj. proměnným rozvorem náprav při průjezdu oblouků, dává tento podvozek velký potenciál stát se tzv. „track friendly“.

Po nezbytném zvýšení vnitřního tlumení GFRP podvozku na, z pohledu zlepšení jízdních vlastností optimální hodnotu, bude nezbytné zakončit jeho vývoj pevnostní únavovou zkouškou, která případně odhalí kritická místa konstrukce nebo technologie jeho výroby. Nezbytným závěrem tohoto vývojového procesu musí být také ověření všech klíčových provozních parametrů GFRP podvozku měřením těchto charakteristik na reálné trati či zkušebním okruhu.

## 15 Literatura

[UIC Kodex] Kolektiv autorů UIC 510-3: *Strength testing of 2 and 3-axle bogies on test rig. (Public version)*. Paris, July 1994.

[UIC Kodex] Kolektiv autorů UIC 515-4: *Passenger cars - bogies, running gear - Strength tests of bogie. (Public version)*. Paris, November 1992.

[UIC Kodex] Kolektiv autorů UIC 615-4: *Motive power units – Bogies and running gear - Bogie frame structure tests. (Public version)*. Paris, November 1992.

[KOMISE EU] KOMISE EU 2013: *Nariadení Komise (EU) č. 321/2013 ze dne 13. března 2013 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla – nákladní vozy“ železničního systému v Evropské unii*.

[ČSN EN 13749] ČSN EN 13749:2011, *Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky-Metody specifikování požadavků na rámy podvozků*. Listopad 2005.

[(280320) ČSN EN 12663-1+A1] (280320) ČSN EN 12663-1+A1, *Železniční aplikace - Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel - Část 1: Lokomotivy a vozidla osobní dopravy (a alternativní metoda pro nákladní vozy)*, Červenec 2015

DOSTÁL J., HELLER P.: *Kolejová vozidla I*. Plzeň, ISBN 978-80-7043-52-5, 2007.

DOSTÁL J., HELLER P.: *Kolejová vozidla II*. Plzeň, ISBN 978-80-7043-641-7, 2009.

DOSTÁL J., HELLER P.: *Kolejová vozidla III*. Plzeň, ISBN 978-80-261-0028-7, 2011.

### Seznam prací autora

Chvojan J., Jozefy, R.: *Analyses of maximum acceleration and displacement amplitudes measured on Eastly track the both 1/5<sup>th</sup> scale GRP and standart bogie*. Technical report VYZ-0654-0108-03N, 2006.

Chvojan J., Václavík, J.: *Static loading test of GRP boogie EB 25-1 with Smms wagon*. Technická zpráva VYZ/TZ54/39/2009.

Chvojan J., Václavík, J.: *One side composite beam set for composite bogie*. Technical report VYZ-0654-0108-06N, 2010.

Chvojan J., Václavík, J.: *Tests of the thickened transom with brake subframes*. Technical report VYZ/TZ54/382/2011.

Chvojan J., Václavík, J.: *Methodology of track test with GRP bogie EB25*. Výzkumná zpráva VYZ/1485/2012.

Chvojan J., Sitař, L.: *Development, design a manufacturing of the Shaker rig functional sample*. Technologická zpráva VYZ/TGZ/54/26/2012.

Chvojan J., Václavík, J.: *Static, Fatigue and Dynamic Tests of GRP bogie EB25*. Výzkumná zpráva VYZ/1486/2012.

Chvojan J., Václavík, J.: *Further Static and Dynamic Tests of GRP bogie EB25 (Ecobogie)*. Výzkumná zpráva VYZ/1486b/2013.

Chvojan J., Mentl V., Vojtíšek J.: *Fatigue Life Assessment of a 1000 MW Turbo - Generator Rotor*. FATIGUE 96, Berlin, Německo, 1996, s. 1855-1860, ISBN: 0 08 042 2683.

Chvojan J., Kepka M., Hejman M.: *Verification of a Truck Cabin FEM – Model*. EAN 97 Olomouc.

Chvojan J., Ellinger J.: *Antikorozní návary a jejich vlastnosti*. WELDING 97, Bratislava, Slovensko.

Hejman, M. - Chvojan, J. - Némec, J. - Václavík, J.: *Proposal of Fatigue Tests of Welded Joints in Relation to FEM Calculations*. EAN 2002, Praha, 2002.

Chvojan J., Cherruault J.Y., Kotas M., Mayer R., Narcis N.M.G, Václavík J.: *Dynamic investigations on freight vagon suspensions*. ICEM12, Bari, Italy, 2004, s.566-567, ISBN: 88 386 6273-8.

Chvojan J., Václavík, J., Kotas M.: *Vyšetřování dynamického chování vypružení nákladních vagónů*. EAN2004, Kašperské Hory, ČR, 2004, s. 91-92, ISBN: 80-239-2964-X.

Chvojan J., Hou J., Cherruault J.Y., Jeronimidis G., Mayer R. - *Design, manufacturing, testing and simulation of fibre composite leaf spring for heavy loads*. ICCM-15, 2005, Durban, South Africa.

Chvojan J., Hampl V., Linhart V., Sigmundová J.: *Zvyšování únavové odolnosti náprav v místě nalisování povrchovým zpevněním*. PRORAIL 2007, Žilina, Slovensko.

Chvojan J., Mayer R., Polach P., Václavík J.: *Determination on vertical characteristics of rail vehikle suspensions by drop test on the track*. ICEM13, Alexandroupolis, Řecko, 2007, s. 683-684, ISBN: 978-1-4020-6238-4.

Chvojan J., Kepka M.: *Zkoušky únavové životnosti materiálu a provozní pevnosti komponent dynamicky namáhaných strojů*. MATE.O.D. – Forum 2007, Plzeň.

Chvojan J., Kepka M., Malkovsky Z.: *Strenght and fatigue life of bogies: Experience from calculations and tests*. BOGIE 07, Budapešť, Maďarsko, 2007. Publikováno v "Proceedings of the 7th International Conference on Railway Bogies and Running Gears".

Chvojan J., Sitař L.: *Ověření únavové pevnosti částí kolejových vozidel*. ŠKODA VÝZKUM pro inovace – 100 let výzkumu v Plzni, ISBN 80-239-9207-6, 2007.

Chvojan J., Kepka M., Malkovský Z.: *Strenght and fatigue life of bogies: Experience from calculations and tests, Materiál and komponent performance under variable amplitude loading*. Darmstadt, Německo, 2007, s.1175-1176, ISBN: 978-3-00-027049-9.

Chvojan, J., Kepka, M.: *Testing of railway structures at laboratories*. BOGIE'10, Budapešť, Maďarsko, 2010, s. 439-444, ISBN: 978-963-313-024-7.

Chvojan, J., Václavík, J., Mayer, R., Jozefy, R.: *Shaker rig tests of the EB25 GRP bogie*. ICEM14, Poitiers, Francie, 2010, s. 19007-19008. ISBN: 978-2-7598-0565-5.

- Chvojan, J., Václavík, J., Mayer, R.: *Static and dynamic tests of a glass reinforced plastic bogie*. ICEM15, Porto, Portugal, 2012, s. 757-758. ISBN: 978-972-8826-25-3.
- Chvojan, J., Václavík, J., Polach, P.: *Experimental verification of the hydrogen fuel cells bus MBS model*. ICEM15, Porto, Portugal, 2012, s. 561-562. ISBN: 978-972-8826-25-3.
- Chvojan, J., Václavík, J., Mayer, R.: *Experimental methods of the GRP bogie testing*. BOGIE'13, Budapešť, Maďarsko, 2013, s. 315-317, ISBN: 978-963-313-103-9.
- Chvojan, J., Václavík, J.: *Fatigue service life test of the triple hybrid hydrogen fuel cell bus structure*. MIRF2013, Funchal, Portugalsko, 2013, s. 395-396, ISBN: 978-972-8826-27-7.
- Chvojan, J., Heller, P., Kepka, M., Kořínek, J., Bek, S., Průcha, P.: *Výzkum a vývoj hybridní skříň kolejevého vozidla. XXI. Konference s mezinárodní účastí, Současné problémy v kolejových vozidlech*. Česká Třebová, Česká Republika, 2013.
- Chvojan, J., Heller, P., Kepka, M.: *Applications of new materials in design of rail vehicles and laboratory verification of their dynamic and fatigue properties*. Railway\_2014, Corsika, Francie, 2014, s. 326, ISSN: 1759-3433, ISBN: 978-1-905088-59-1.
- Chvojan, J., Václavík, J., Mayer, R.: *Dynamic and static behaviour of side beam SET for composite bogie*. ICEM16, Cambridge, UK, 2014.
- Chvojan, J., Kepka, M., Křížek, M., Mayer, R.: *GRP bogie characteristics evaluated by experimental methods*. ICCM20 – International conference of composite material. Kodaň, Dánsko, 2015.
- Chvojan, J., Kepka, M.: *Remarks on testing of strength and fatigue life of rail vehicles*. M2D2015 – International conference on mechanics and material in design, Ponta Delgada, Azory, Portugalsko, 2015, ref. 5544, s. 225-234, ISBN: 978-989-98832-3-9.
- Chvojan, J., Václavík, J., Mayer, R.: *Experimental methods for the GRP bogie structure integrity assessment*. ICSI - International conference on structure integrity, Funchal, Madeira, Portugalsko, 2015.
- Chvojan, J.: *Prínosy VZÚ Plzeň k řešení problémů kolejových vozidel. XXII. Mezinárodní konference. Současné problémy v kolejových vozidlech – Prorail 2015*. Žilina, Slovensko, září 2015.
- Chvojan, J., Kepka, M., Špirk, S.: *Laboratory fatigue tests as important part of design and development of new vehicles*. The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Cagliari, Sardinie, Itálie, 2016, ref. 193, s. 1-17, ISSN: 1759-3433.
- Chvojan, J., Václavík, J., Kepka, M., Kepka, M. jr.: *Engineering Approach for Vehicle structure Service Life Assessment under Combined Loading*. ICMFF11 – International conference of material fatigue and fracture, Sevilla, Španělsko, 2016.
- Chvojan, J., Václavík, J.: *Application of potential drop technique for investigation of large structure integrity*. IRF2016, International conference on integrity, reliability and fracture, Porto, Portugalsko, červenec 2016, ref. 6199, s. 79-80, ISBN: 978-989-98832-5-3.
- Chvojan, J., Kepka, M.: *Strength and fatigue testing of bogie parts – from 2 2 22 chanel*. Bogie 16, 10th International conference on railway bogies and running gears, Budapest, Maďarsko, září 2016.

Chvojan, J., Václavík, J.: *Force based system for alignment of an uniform loading of a hydrogenerator foot step bearing*. M2S2017, 7th International conference on mechanics and materials in design, Algarve, Portugalsko, 2017.

Chvojan, J., Václavík, J.: *Application of potential drop technoque for investigation of large structure integrity*. ICSI - International conference on structural integrity. Funchal. Portugalsko, 2017.

## Použité zkratky a pojmy

GFRP	Glass fibre reinforced plastic
CFRP	Carbon fibre reinforced plastic
GE	General Electric
VW	Volkswagen
BMW	Bayerische Moteren Werke AG
TF25	Track friendly bogie
Y25	Typ podvozku Y25
UIC	Union International des Chemins de fer
SMC	Sheet moulding compound
RTM	Rezin transfer moulding
BMC	Bulk moulding compound
TSI	Technical specification for Interoperability
LVDT	Linear variable differential transformer
IST	Instron System Testing
GRP	Glass fibre reinforced plastic
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik
DLC	Dynamic load coefficient
UK	United Kingdom
Tare	Zatížení podvozku vlastní hmotností vagónu
Laden	Zatížení podvozku vlastní hmotností vagónu + přídavné zatížení
Empty	Prázdný vagón
Drop	Pád dvojkolí z definované výšky skoku
Sweep	Test s plynule proměnou hodnotou frekvence a konstantní amplitudou exitace
Self-steering	Samořiditelné dvojkolí při průjezdech oblouky
ČR	Česká republika
EU	Evropská unie



## Seznam obrázků

Obr. 3-1 Podíl kompozitních materiálů u dopravních letadel .....	12
Obr. 5-1 Ocelová pětistavá parabolická pružnice .....	20
Obr. 5-2 Ocelové šroubovitě .....	21
Obr. 5-3 Vypružení pryžo-kovovými bloky a jeho charakteristika .....	21
Obr. 5-4 Pneumatické vypružení .....	22
Obr. 7-1 a) Jednosměrný tenzometr b) tenzometrická růžice .....	30
Obr. 7-2 Síly působící při simulaci mimořádného .....	31
Obr. 7-3 Mezní křivky Goodman diagramu .....	32
Obr. 7-4 Dílčí provozní simulace .....	33
Obr. 7-5 Sekvence únavové zkoušky .....	34
Obr. 7-6 Průběh sil při únavové zkoušce .....	35
Obr. 8-1 Podvozek Ecobogie .....	38
Obr. 8-2 Dvojitá tuhostní charakteristika .....	39
Obr. 9-1 Pětínový model GFRP podvozku .....	40
Obr. 9-2 Instrumentovaný vagón s GFRP podvozkem – výletní železnice v Eastleigh ....	40
Obr. 9-3 Použité přístroje .....	41
Obr. 9-4 Pozice LVDT snímačů a akcelerometrů na vagónu .....	42
Obr. 9-5 Použité přístroje .....	42
Obr. 9-6 Schéma rozmístění akcelerometrů na vagónech .....	43
Obr. 9-7 Jednotlivé sekvence tratě v Eastleigh .....	44
Obr. 9-8 Maximální vertikální zrychlení při drop testech .....	47
Obr. 9-9 Maximální horizontální zrychlení při drop testech .....	47
Obr. 9-10 Maximální vertikální zrychlení – vliv trati .....	48
Obr. 9-11 Maximální horizontální zrychlení – vliv trati .....	48
Obr. 9-12 Maximální vertikální zrychlení – L1 - vliv trati .....	49
Obr. 9-13 Maximální horizontální zrychlení – L1 - vliv trati .....	49
Obr. 9-14 Maximální vertikální zrychlení – L2 - vliv trati .....	50
Obr. 9-15 Maximální horizontální zrychlení – L2 - vliv trati .....	50
Obr. 9-16 Rozmístění snímačů posuvů .....	51
Obr. 9-17 Maximální amplitudy výchylek – vliv trati .....	51
Obr. 9-17 Maximální amplitudy výchylek – vliv trati .....	52
Obr. 9-18 Maximální amplitudy výchylek – L1 - vliv trati .....	52
Obr. 9-19 Maximální amplitudy výchylek – L2 - vliv trati .....	53
Obr. 10-1 Deformace vs. síla, #7 .....	61
Obr. 10-2 Dráha vs. síla, #7 .....	61
Obr. 10-3 Deformace vs. síla, #8 .....	62
Obr. 10-4 Dráha vs. síla #8 .....	62
Obr. 10-5 Statické předpětí $F = 30$ kN, #7 .....	63
Obr. 10-6 Statické předpětí $F = 50$ kN, #7 .....	63
Obr. 10-7 Statické předpětí $F = 70$ kN, #7 .....	63
Obr. 10-8 Statické předpětí $F = 90$ kN, #7 .....	63
Obr. 10-9 Spektrální výkonová hustota průběhů tenzometrů při sweep testu podélníku #7...64	64
Obr. 10-10 Statické předpětí $F = 30$ kN, #8 .....	65
Obr. 10-11 Statické předpětí $F = 50$ kN, #8 .....	65
Obr. 10-12 Statické předpětí $F = 70$ kN, #8 .....	65
Obr. 10-13 Statické předpětí $F = 90$ kN, # .....	65
Obr. 10-14 Spektrální výkonová hustota průběhů tenzometrů při sweep testu podélníku #8..66	66

Obr. 11-1	Pozice tenzometrů – pohled zhora	69
Obr. 11-2	Pozice tenzometrů – pohled zdola	69
Obr. 11-3	Deformace vs síla F1	70
Obr. 11-4	Deformace vs síla F2	70
Obr. 11-5	Vliv použití středového čepu na průhyb	70
Obr. 11-6	Zatěžovací program	71
Obr. 11-7	Reálný zatěžovací průběh	72
Obr. 11-8	Reálný zatěžovací průběh – detail	72
Obr. 11-9	Časový průběh záznamu tenzometrů	73
Obr. 12-1	Model shaker rig	76
Obr. 12-2	Rozmístění sensorů	77
Obr. 12-3	Testované traťové profily pro 4 kvalitativní skupiny BQ	81
Obr. 12-4	Spektrální výkonové hustoty nerovností traťových profilů	82
Obr. 12-5	Zatěžování podvozku	84
Obr. 12-6	Vertikální tuhost podvozku	85
Obr. 12-7	Okamžitá hmotnost vagónu vs. síla	85
Obr. 12-8	Deformace tenzometrů při statickém zatížení	86
Obr. 12-9	Relativní dráha DS1 kola 1 při 10 mm drop testu přední nápravy, tare	86
Obr. 12-10	Zrychlení šasí vagónu VACH13 při 10 mm drop testu přední nápravy, tare	87
Obr. 12-11	Posuv zatěžovacího servoválce DW1 při 10 mm drop testu přední nápravy, tare	87
Obr. 12-12	Zatížení zat. servoválce LW1 při 10 mm drop testu přední nápravy, tare	88
Obr. 12-13	Typický časový průběh při sweep testu	91
Obr. 12-14	Spektrum amplitud vertikálního zrychlení VACH13 při sweep testu, tare	91
Obr. 12-15	Spektrum amplitud vertikálního zrychlení BACH13 při sweep testu, tare	92
Obr. 12-16	Spektrum amplitud vertikálního zrychlení VAW1 při sweep testu, tare	92
Obr. 12-17	Spektrum amplitud posuvu DS1 při sweep testu, tare	92
Obr. 12-18	Spektrum amplitud kolové síly LW1 při sweep testu, tare	93
Obr. 12-19	Spektrum amplitud vertikálního zrychlení VACH13 při sweep testu, laden	93
Obr. 12-20	Spektrum amplitud vertikálního zrychlení BACH13 při sweep testu, laden	93
Obr. 12-21	Spektrum amplitud vertikálního zrychlení VAW1 při sweep testu, laden	94
Obr. 12-22	Spektrum amplitud vertikálního posuvu DS1 při sweep testu, laden	94
Obr. 12-23	Spektrum amplitud kolové síly LW1 při sweep testu, laden	94
Obr. 12-24	Procentní změna kolové síly při posunutí –20 mm jednoho kola DWi, tare	96
Obr. 12-25	Absolutní změna kolové síly při posunutí –20 mm kola 3, tare	96
Obr. 12-26	Časový průběh tenz. při změně kolové síly při posunutí –20 mm kola 3, tare	97
Obr. 12-27	Časový průběh posuvu podvozku DSi při změně kol. síly –20 mm kola 3, tare	97
Obr. 12-28	Procentní změna kolové síly při posunutí –20 mm jednoho kola DWi, laden	98
Obr. 12-29	Porovnání DLC pro tare a laden	99

## Seznam foto

Foto 3-2	Větrné farmy u pobřeží Velké Británie, zdroj: [Internet]	5
Foto 3-2	Větrná farma Roscoe, Texas, USA, zdroj: [Internet]	6
Foto 3-3	Karbonová motocyklová nádrž, zdroj: [Internet]	7
Foto 3-4	Hybridní automobily BMWi3 a BMWi8 s velkým podílem karbonových vláken	8
Foto 3-5	Vlevo pružina z kompozitu vyztuženého skl. vlákny, vpravo klasická ocelová	9
Foto 3-6	Dopravní letadlo Airbus A380 a podíl kompozitů na jeho konstrukci [Internet]	10
Foto 3-7	Dopr. letadlo Boeing 747-8 Intercontinental a nákladní Boeing 747-8 Freighter	10
Foto 3-8	Dopravní letadlo Boeing 787 Dreamliner a podíl kompozitů na jeho konstrukci	11
Foto 3-9	Dopravní letadlo Boeing 787 Dreamliner při výrobě a pevnostních	11
Foto 3-10	Dopravní letadlo Airbus A350, - testovací systém	12
Foto 3-11	Čelníky železničního vozidla, dříve a nyní	13
Foto 3-12	Hybridní skříň vozidla metra – složení, zdroj: [projekt MPO TIP: FR-TI3/449]	14
Foto 3-13	Dutý kompozitní GFRP hřídel – průběh zatížení	14
Foto 3-14	Track friendly podvozek a jeho testování	16
Foto 3-15	Osobní vozy, zdroj: [Internet]	16
Foto 3-16	Využití CFRP u podvozku osobního vozu, zdroj: [Internet]	16
Foto 3-17	Lehká kolejová vozidla	17
Foto 3-18	Elektrické lokomotivy	17
Foto 3-19	Deisell lokomotivy	17
Foto 3-20	DMU	18
Foto 3-21	EMU	18
Foto 3-22	Rychlovlaky	18
Foto 3-23	Monoraily	18
Foto 5-1	Netradiční formy vypružení	22
Foto 5-2	Kompozitový vnější ložiskový kroužek	23
Foto 5-3	Nekonvenční primární	23
Foto 5-4	Kompozitové pružnice	23
Foto 6-1	a) Forma – b) plnění formy pryskyřicí	27
Foto 9-1	Snímače zdvihů L1, L3, L7, L2 a L3	43
Foto 9-2	Snímače zdvihů L5, L6, akcelerometr A1H, A1V, A2H a A2V	43
Foto 9-3	Akcelerometr A3H, A3V, rychlost v1 a videokamera	43
Foto 9-4	Úroveň zatížení L1	44
Foto 9-5	Úroveň zatížení L2	44
Foto 9-6	Rozdílná výška kolejnic při drop testu	46
Foto 9-7	Snímač L7	51
Foto 10-2	Pozice tenzometrické růžice R1	60
Foto 10-3	Pozice tenzometrické růžice R2, #8	60
Foto 10-4	Delaminovaný podélník číslo 7	61
Foto 10-5	Podélník #8 při statickém zatížení $F = 250$ kN	62
Foto 11-1	Zatížení brzdové konzoly	68
Foto 11-2	Připojení středového čepu	68
Foto 11-3	Uspořádání zkušební sestavy	68
Foto 11-4	Příčnick se středovým čepem	68
Foto 11-6	Pozice tenzometrické růžice	69
Foto 11-7	Delaminace příčnicku při únavové zkoušce	73
Foto 12-1	Speciální zkušební stand pro výzkum dynamických vlastností	74
Foto 12-2	Šásí vagónu	75

Foto 12-3 Modifikace vagónového šasí pro transfer svislého zatížení, pívot .....	75
Foto 12-4 Shaker rig připraven pro spojení se šasí .....	77
Foto 12-5 Pozice tenzometrů T1, T2, T3 a R .....	78
Foto 12-6 Pozice tenzometrů T1 .....	78
Foto 12-7 Pozice tenzometrů T1 a R .....	78
Foto 12-8 Pozice tenzometrů T2 a R .....	78
Foto 12-9 Pozice tenzometru T3 .....	78
Foto 12-10 Sensory DS1,DS3,VAW1,VAW3 .....	78
Foto 12-11 Sensory DS1 a VAW1 .....	79
Foto 12-12 Sensory DS2,DS4,VAW2,VAW4 .....	79
Foto 12-13 Sensor VACH24 .....	79
Foto 12-14 Sensor BACH24 .....	79
Foto 12-6 Nakládání vagónu .....	84

## Seznam tabulek

Tab. 3-1 Deset největších větrných farem v USA .....	6
Tab. 3-2 Pět největších plánovaných větrných farem v USA .....	6
Tab. 7-1 Zatěžovací stavy pro statické zkoušky s vertikálními a příčnými silami .....	32
Tab. 8-1 Použité materiály .....	38
Tab. 8-2 Porovnání konstrukčních parametrů GFRP a Y25 podvozků .....	39
Tab. 9-1 Použité snímače .....	41
Tab. 9-2 Struktura tratí .....	45
Tab. 9-3 Výšky pádu .....	46
Tab. 9-4/1 Výsledky z průjezdů kříženými kolejemi .....	54
Tab. 9-4/2 Výsledky z průjezdů kříženými kolejemi.....	55
Tab. 9-5 Výsledky z průjezdů výhybkami .....	56
Tab. 9-6 Výsledky z průjezdů oblouky .....	57
Tab. 11-1 Poškození vzniklá v průběhu únavové zkoušky .....	72
Tab. 12-1 Experimentální program pro dynamické testy .....	82
Tab. 12-2 Kolové síly a průhyb podvozku .....	85
Tab. 12-3 Zatížení vs. deformace tenzometrů .....	85
Tab. 12-12 Změna kolových sil, LWi v důsledku posunutí kola DWi při torzním testu,tare...95	
Tab. 12-13 Změna kolových sil,LWi v důsledku posunutí kola DWi při torzním testu,laden.98	
Tab. 12-14 Dynamický koeficient zatížení DLC vyhodnocený ze simulace průjezdu .....	99
Tab. 12-15 Vybrané parametry získané při simulaci průjezdu .....	100