

UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA  
KATEDRA DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ

**Struktura prahů osobních vozidel – konstrukční  
řešení a metodika zkoušení**

Bc. Tomáš Jelínek

Diplomová práce  
2008

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Katedra dopravních prostředků  
Akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš JELÍNEK**

Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Struktura prahů osobních vozidel - konstrukční řešení  
a metodika zkoušení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Analýza prahů dle daného problému.

Zkouška prahů tříbodovým ohybem.

Interpretace naměřených výsledků.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**Literatura dle doporučení a pokynů vedoucího práce**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Dr. Ing. Libor Beneš**

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce:

**18. února 2008**

Termín odevzdání diplomové práce:

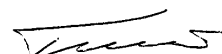
**26. května 2008**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

## **SOUHRN**

Práce je zaměřena na metodiku zkoušení samostatných struktur prahů. Obsahuje jejich konstrukční uspořádání, přípravu a uskutečněný experiment, interpretaci a zhodnocení naměřených výsledků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

karoserie; prahy; EuroNCAP; tříbodový ohyb

## **TITLE**

Passenger vehicles door-sill structure – design solutions and testing metedics

## **ABSTRACT**

The work is focused on testing procedures of separate door-stills structures. It contains their design lay-out, preparation of real experiment, interpretations and evaluation of measurement results.

## **KEYWORDS**

Carbody; door-sill; EuroNCAP; three-point bending

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat firmě Škoda Auto a.s. za umožnění odborné praxe.

Dále bych chtěl poděkovat všem osobám, které přispěly k tomu, aby byla tato diplomová práce realizována.

Především pracovníkům firmy Škoda Auto a.s. Ing. Daliboru Hellerovi koordinátorovi vývoje svařené karoserie, za konzultace, vedení mé odborné praxe a pomoci i cenných rad při návrzích a vyhodnocení experimentů a také panu Ing. Květoslavu Zdražilovi zaměstnanci dynamické zkušebny za vedení při experimentu. Dále bych chtěl poděkovat za vstřícnou pomoc a sympatický přístup mému vedoucímu doc. Dr. Ing. Liboru Benešovi a také Ing. Janu Krmelovi Ph.D. za odbornou pomoc a realizaci výpočtové části.

OBSAH:

<b>Seznam používaných symbolů a značek.....</b>	<b>7</b>
<b>1. Úvod.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Teoretická část.....</b>	<b>9</b>
2.1 Struktura karoserie osobního automobilu.....	9
2.1.1 Deformační vlastnosti struktury karoserie .....	10
2.1.2 Tuhost struktury .....	10
2.2 Pasivní bezpečnost.....	12
2.3 Program EuroNCAP .....	12
2.3.1 Hlavní cíle .....	12
2.3.2 Testy EuroNCAP .....	13
2.3.3 Hodnocení EuroNCAP .....	13
2.3.4 Boční náraz.....	14
2.3.5 Boční náraz na sloup .....	14
2.4 Struktura prahů .....	16
2.5 Teoretické základy pro experiment .....	18
2.5.1 Plastická deformace .....	18
2.5.2 Ztráta stability .....	18
2.5.2.1 Stabilitní analýza .....	19
2.5.2.2 Bifurkace a imperfekce.....	19
2.5.2.3 Postkritické chování .....	20
2.5.3 Tenzometrické měření mechanického napětí.....	22
2.5.3.1 Odporové tenzometry .....	22
2.5.3.2 Princip tenzometrie.....	22
2.5.4 Snímače síly .....	24
2.5.5 Deformační energie (práce).....	25
2.5.6 Tuhost.....	25
2.5.7 Numerická integrace .....	26
2.5.7.1 Lichoběžníkové pravidlo .....	26
2.5.8 Měření deformace při crash testu .....	27
2.5.8.1 Princip měření .....	27
2.5.9 Třibodový ohyb .....	28
2.6 Příprava prahů pro experiment .....	29
<b>3. Praktická část .....</b>	<b>30</b>
3.1 Úvod .....	31
3.2 Experiment .....	32
3.2.1 Zkušební zařízení .....	34
3.2.2 Vyhodnocení experimentu .....	35
3.2.3 Struktura prahu 1 .....	36
3.2.3.1 Výpočet deformační energie.....	39
3.2.3.2 Výpočet tuhosti.....	39
3.2.3.3 Tenzometr T1 .....	40
3.2.3.4 Tenzometr T2 .....	41
3.2.3.5 Tenzometr T3 .....	42
3.2.3.6 Tenzometr T4 .....	43
3.2.4 Struktura prahu 2 .....	44

3.2.4.1 Výpočet deformační energie.....	46
3.2.4.2 Výpočet tuhosti.....	46
3.2.4.3 Tenzometr T1 .....	47
3.2.4.4 Tenzometr T2 .....	48
3.2.5 Struktura prahu 3 .....	50
3.2.5.1 Výpočet deformační energie.....	52
3.2.5.2 Výpočet tuhosti.....	52
3.2.5.3 Tenzometr T1 .....	53
3.2.5.4 Tenzometr T2 .....	54
3.2.5.5 Tenzometr T3 .....	55
3.2.6 Porovnání výsledků .....	57
3.3 Diskuze .....	59
3.3.1 Závěr diskuze .....	61
<b>4. Výpočtová část.....</b>	<b>62</b>
4.1 FEM simulace experimentu.....	63
4.2 Výsledky simulace.....	67
<b>5. Závěr .....</b>	<b>71</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>72</b>
<b>Použitá literatura.....</b>	<b>73</b>

## Seznam používaných symbolů a zkratek

F, Q	[N; kN]	síla
R	[ $\Omega$ ]	elektrický odpor
$\rho$	[ $\Omega \cdot m$ ]	měrný odpor
l	[m]	délka vodiče
A	[m <sup>2</sup> ]	průřez vodiče
$\varepsilon$	[-]	poměrná deformace (přetvoření)
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
$\sigma$	[MPa]	mechanické napětí
W	[J]	deformační energie (práce)
x	[m]	dráha (posuv)
K	[N·m <sup>-1</sup> ]	tuhost
t	[m]	tloušťka
J <sub>0</sub>	[m <sup>4</sup> ]	moment setrvačnosti
EHK		Evropská hospodářská komise
SBR		Upozornění zapnutí bezpečnostního pásu
R <sub>m</sub>	[MPa]	mez pevnosti
R <sub>p0,2</sub>	[MPa]	smluvní mez kluzu při 0,2 % délky
R <sub>e</sub>	[MPa]	mez kluzu



## **1. Úvod**

Silniční motorová vozidla poskytují nenahraditelné služby, které přinášejí i řešení mnoha problémů. Je to především velký počet dopravních nehod a negativní vliv na životní prostředí.

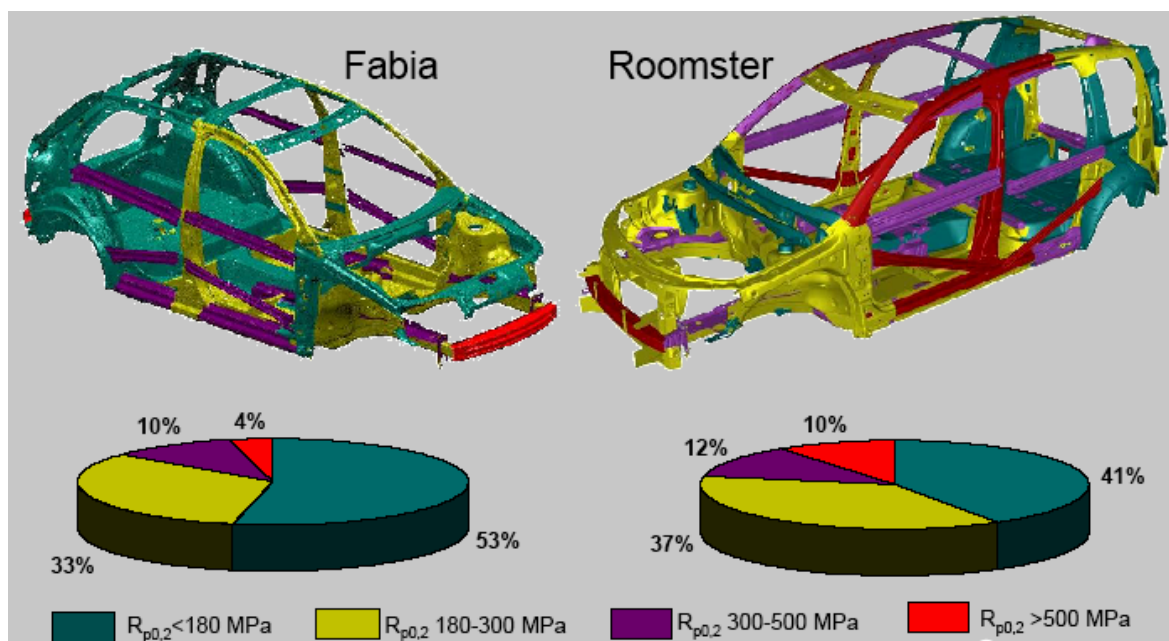
Zvyšující se nároky na bezpečnost a hospodárnost silniční dopravy vede k neustálému vývoji jednotlivých částí automobilu. Nejsložitější konstrukční skupinou, které se tyto nároky týkají, je vedle pohonu karoserie automobilu. Na karoserii je kladeno řada požadavků ze širokého spektra různých vlastností. Nejdůležitější jsou z hlediska hmotnosti, aktivní a pasivní bezpečnosti, které ovlivňují hlavně materiálové a konstrukční návrhy omezené pracností a investičními náklady na výrobu. K ověření správného návrhu slouží výpočetní a experimentální zkoušení. Členitost a materiálová rozmanitost karoserie vede k vývoji nových zkoušek dílčích částí této konstrukční skupiny, aby se docílilo co nejefektivnější řešení kladených požadavků.

Úkolem této diplomové práce je navrhnout metodiku experimentu pro zkoušení samostatných struktur prahů osobních vozidel.

## 2. Teoretická část

### 2.1 Struktura karoserie osobního automobilu

Ochrana cestujících vlastního vozidla v případě nehody závisí na struktuře karoserie, vnitřním vybavení karoserie, vlastnostech zadržovacích systémů a zabránění vzniku požáru. Struktura karoserie musí z hlediska pasivní bezpečnosti splňovat dvě důležité funkce. Nosná struktura musí mít při kolizi podle druhu namáhání dostatečnou schopnost absorpce energie, která zaručuje nepřekročení biomechanických tolerančních limitů. To znamená, že nosná struktura karoserie musí mít při své deformaci takovou silovou charakteristiku, aby zpoždění člověka ve vozidle nepřekročilo mezní hodnoty. Na druhé straně nesmí být deformace nosné struktury tak velká, aby byl narušen vnitřní prostor pro posádku. Moderní vozidla do své konstrukce včleňují konstrukční prvky z nových materiálů, které mají posílit pevnost struktury, aniž by radikálně ovlivnily její prostorové uspořádání nebo její hmotnost. Speciální technologie lisování konstrukčních částí, která umožňuje kombinaci různých vlastností kovů, umožňuje výrobcům cíleně umístit mimořádně pevné materiály do exponovaných míst (obr. 1), aniž by celá kostra musela být vyrobena z jednoho materiálu stejné pevnosti [1].



Obr. 1 Pevnostní uspořádání struktury karoserie [4]

### 2.1.1 Deformační vlastnosti struktury karoserie

Velikost kinetické energie nárazu, která musí být přeměněná v deformační práci strukturou obklopující prostor pro cestující, závisí na intenzitě srážky a směru srážky. K absorpci nárazové energie jsou vhodné přední a zadní části vozidla vzhledem k dostatečným délkám deformačních zón. Boční struktura umožňuje jen malé množství absorpce energie, neboť potřebné deformační délky jsou velmi malé (obr. 2).

Požadované deformační vlastnosti předě vozidla je možné docílit vhodným vytvořením přední struktury vozidla, např. prvky, které se při čelním nárazu zlomí nebo prolomí. Tím je pak možné vytvořit vozidlo, které zaručuje bezpečnost nejen vlastních cestujících, ale i bezpečnost chodců. V popředí pozornosti nyní stojí boční náraz, který je z hlediska četnosti nehod také velmi závažný. K tomuto druhu srážky dochází zejména na křižovatkách, kdy předek jednoho vozidla narazí do boku vozidla druhého. Na rozdíl od přední a zadní struktury, u kterých je deformační zóna 300 až 800 mm, je boční struktura karoserie schopna vzhledem k malým deformačním zónám cca 100 až 150 mm pohltit jen malé množství energie vznikající nárazem. Při bočním nárazu jsou vnější nosné díly struktury v oblasti prostoru pro cestující (prahy dveří a nosníky dveří) namáhány zejména ve směru příčné osy vozidla, tzn. na ohyb. Tím vznikají ve vazbě struktury tahové a tlakové síly. Tento druh namáhání umožňuje mnohem menší specifickou absorpci energie než např. stlačování nosníku při čelním nebo zadním nárazu. Příčnými traverzami ve střeše a v podlaze může být zvýšená boční tuhost prostoru pro posádku. K tomu musí být struktura dveří pevná na tah a tuhá na ohyb a vytvářet uzavřenou vazbu s boční strukturou [1].

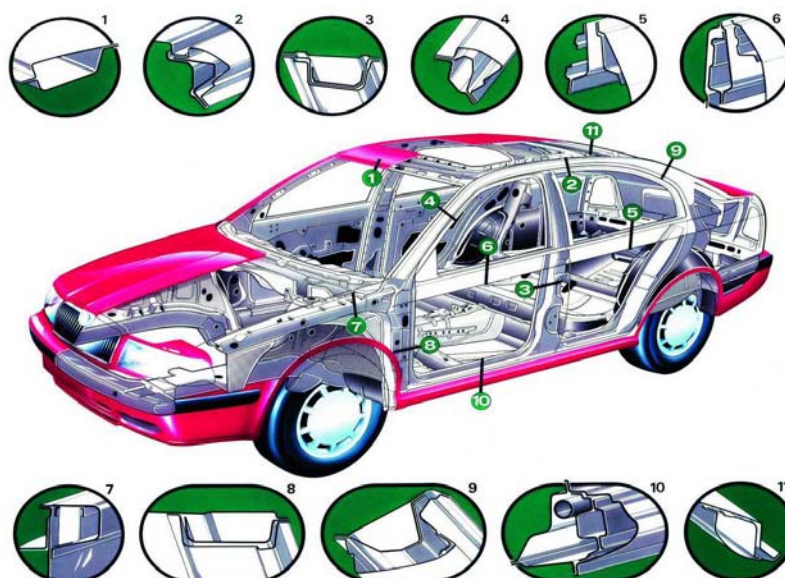


Obr. 2 Deformace karoserie [4]

### 2.1.2 Tuhost struktury

Prostorové omezení karoserie je dáno panely a strukturními částmi. Struktura karoserie může být rozdělena do dvou skupin:

- Spojovací prvky (střeška, boční díly, podlahové části);
- Nosné prvky (sloupky, práh, podélníky, příčníky, střešní rám).



Obr. 3 Ocelové profily v konstrukci vozu Škoda Octavia [6]

Vhodně navržená karoserie má schopnost řízeně odklonit síly vzniklé při deformaci vozu (obr. 3). Velice tvrdé a pevné materiály umístěné do strategických míst ve vozidle umožňují vést nárazovou energii mimo prostor pro cestující.

Velmi nebezpečný je boční náraz na úzkou překážku (strom, sloup), protože dochází k bočnímu lámání vozidla setrvačnými silami od přečnávajících částí vozidla. Možnost úrazu je v této situaci značná, neboť boční deformace karoserie může být jen malá, a proto zpoždění cestujících velké. Zároveň jsou vyšší možnosti vniknutí překážky do prostoru pro cestující (obr. 4). Možnost ochrany je jen dostatečným vyztužením boků vozidla [1].



Obr. 4 Boční náraz na sloup [12]

## **2.2 PASIVNÍ BEZPEČNOST**

Pasivní bezpečnost znamená soubor takových opatření, které chrání posádku vozidla (řidiče a spolucestující), jakož i okolní osoby mimo vozidlo, před poraněním v neočekávané situaci, kterou nemůže účastník aktivně ovlivnit. Tato opatření mají zabránit přímým důsledkům nehody, tj. zraněním či ztrátám na životech cestujících a dalších účastníků nehody. Nejvýznačnější prvky pasivní bezpečnosti automobilů jsou předepsány předpisy EHK. Všechny nové typy automobilů před uvedením na trh musí být schváleny k provozu a homologovány na specializovaných nezávislých pracovištích. To znamená, že musí splňovat všechny zákonné předpisy a normy dané legislativou. Kromě toho existují nezávislé spotřebitelské testy, které jsou obvykle přísnější než platné předpisy a umožňují přímé porovnání vozidel rozdílných výrobců. V Evropě je to nejprestižnější program zkoušek pasivní bezpečnosti vozidel EuroNCAP (European New Car Assessment Programme) pro nové automobily. Zkoušené automobily jsou podrobeny nárazům (klasický přesazený čelní i boční), které ve svých důsledcích simulují statisticky nejčastější případy dopravních nehod při nichž dochází k nejvážnějším poraněním. Ve vozidle jsou instalovány zkušební figuríny vybavené senzory, jejichž údaje se vyhodnocují a porovnávají s možnými poraněními jednotlivých částí lidského těla. Rizika poranění se bodově hodnotí a výsledek určuje celkovou míru bezpečnosti konkrétního automobilu.

## **2.3 Program EuroNCAP**

### **2.3.1 Hlavní cíle**

- prosadit pasivní bezpečnost na čelní místo mezi faktory ovlivňující výběr nového vozu
- poskytnout spotřebiteli informaci o míře bezpečnosti konkrétních vozů
- tlačit výrobce osobních automobilů k neustálému zlepšování pasivní bezpečnosti jejich produktů
- snížit riziko poranění pro posádku vozu i ostatní účastníky provozu
- být nezaujatým a nezávislým pozorovatelem evropského automobilového trhu
- vyvíjet nové druhy zkoušek pro komplexnější hodnocení vozu (child protection, whiplash, knee mapping atd.)

### 2.3.2 Testy EuroNCAP

- Přesazený čelní náraz
- Boční náraz
- Boční náraz na sloup
- Střet s chodcem

### 2.3.3 Hodnocení EuroNCAP

Prezentuje se celkové hodnocení pro ochranu před čelním a bočním nárazem. Hodnocení je založeno na bodování řidiče (pokud spolujezdec neobdrží nižší ohodnocení). Při čelním nárazu jsou části těla seskupeny a tato skupina se hodnotí podle části těla nebo končetiny s nejmenším výsledkem. Skupiny představují: – hlava a krk

- hrudník
- koleno, stehno, pánev
- noha a chodidlo

Při bočním nárazu a při testech pro chodce jsou použity všechny jednotlivé části. Při testu bočního nárazu na sloup je v současnosti uvažováno pouze o části hlavy. K dosažení celkového hodnocení jsou body získané pro každou část a sečteny dohromady. Čelní náraz a boční náraz mají čtyři části z nichž každá může obdržet až 4 body. Boční náraz na sloup může přispět dalšími 2 body. Výsledkem je celkově 34 bodů. Další 3 body je možno získat pokud je vozidlo opatřeno SBR (Seat Belt Reminder), tedy celkové hodnocení 37 bodů.

Celkové výsledky a vyváženost mezi čelními a bočními výsledky jsou poté použity k vytvoření hvězdného ohodnocení (obr. 5). Vozidla s velmi špatnými výsledky čelních a bočních testů mají hvězdné ohodnocení omezeno aby bylo zřejmé že neposkytují dobrou celkovou ochranu [17].

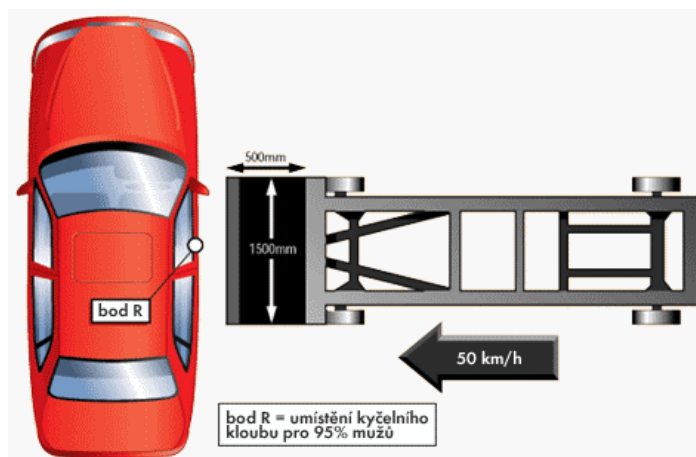
★ ★ ★ ★ ★	33-40 bodů
★ ★ ★ ★ ☆	25-32 bodů
★ ★ ★ ☆ ☆	17-24 bodů
★ ★ ☆ ☆ ☆	9-16 bodů
★ ☆ ☆ ☆ ☆	1-8 bodů

Obr. 5 Vztah mezi body a hvězdami při čelních a bočních testech [17]



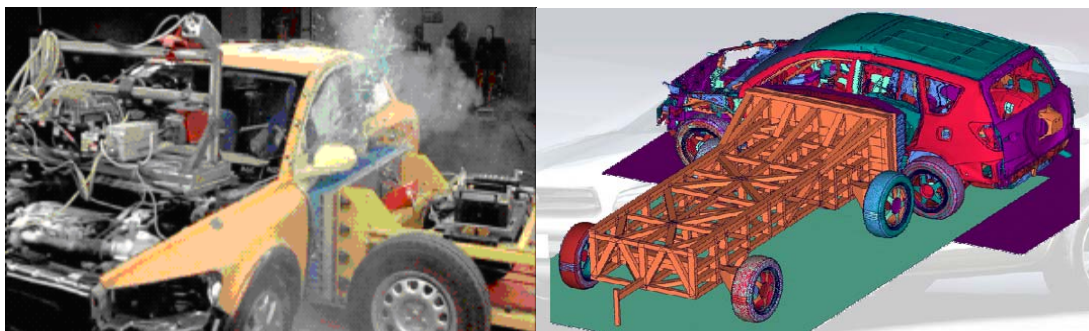
### 2.3.4 Boční náraz

Při bočním nárazu vozík jedoucí rychlostí  $50 \text{ km/h} \pm 1 \text{ km/h}$  narazí do boku stojícího vozidla (obr. 6). Vozík má v přední části deformovatelnou bariéru simulující přední část automobilu (obr. 7). Náraz je veden na straně řidiče do tzv. bodu R. V tomto bodě má 95% mužů kyčelní oblast.



Obr. 6 Boční náraz [12]

Umístění bodu R vzhledem k jednotlivým dílům konstrukce vozidla je dáno výrobcem. Zajistí se bod R a narýsuje svislá přímka na boku vozidla bodem R (max. tolerance  $\pm 1 \text{ mm}$ ). Nalepí se kontrastní páska přes celý bok až na střechu podél svislé přímky vedoucí bodem R. Cílové místo nárazu je osa bariéry na osu procházející R bodem  $\pm 25 \text{ mm}$  [17].

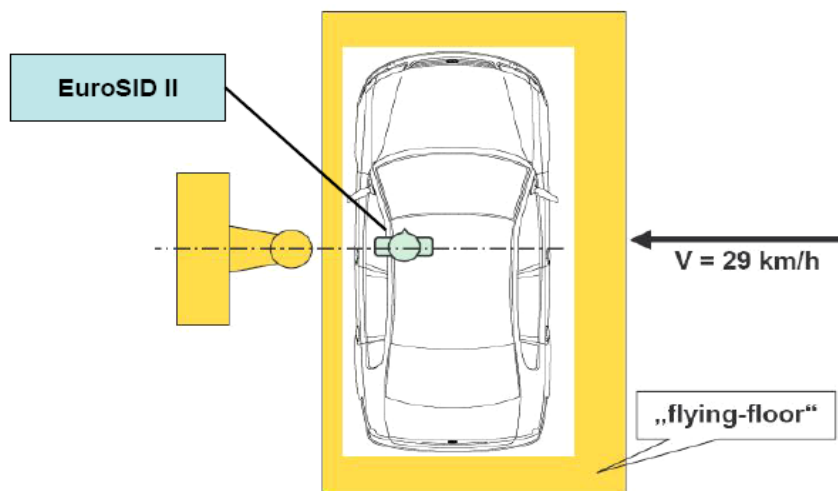


Obr. 7 Deformace vozidla při bočním nárazu [4]

### 2.3.5 Boční náraz na sloup

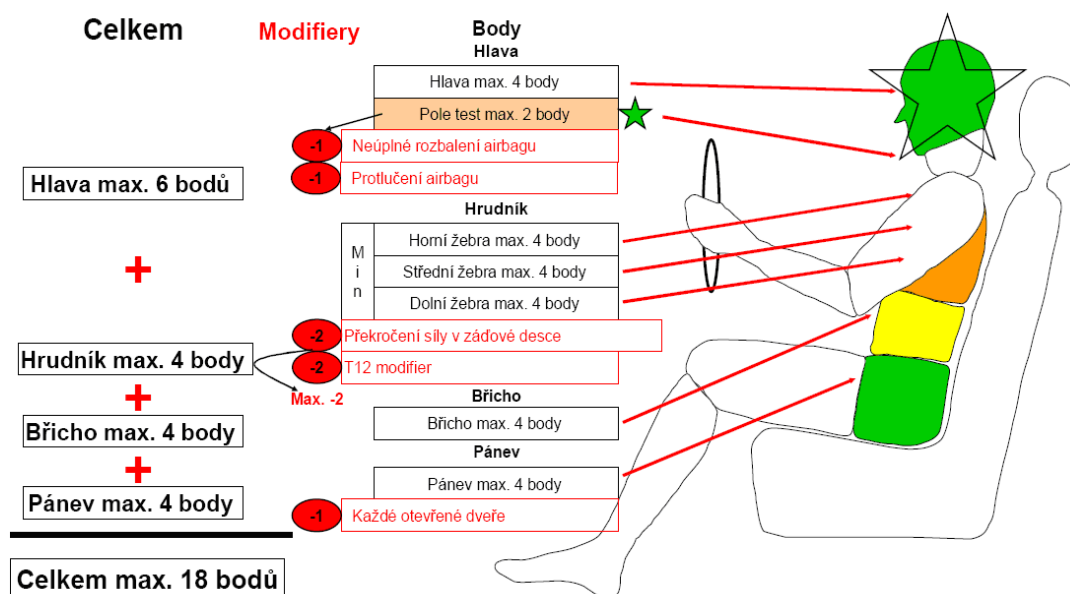
Náraz na sloup je test zjišťující riziko poranění hlavy při bočním nárazu do překážky malých rozměrů, jako je strom, sloup pouličního osvětlení apod. Zde je zkoušený automobil umístěný na vozíku, s kterým se bočně pohybuje rychlostí  $29 \pm 0.5 \text{ km/h}$  a narazí

do pevného sloupu o průměru  $254 \pm 3\text{mm}$  (obr. 8). Sloup pronikne do boku vozu a test je určen pro zkoumání účinnosti bočních hlavových (okenních) airbagů.



Obr. 8 Boční náraz na sloup [17]

Úhel nárazu mezi podélnou osou vozidla a osou směru pohybu unášedce činí  $90^\circ \pm 3^\circ$ . Přesnost horizontálního nárazu by měla dosáhnout  $\pm 38\text{ mm}$ . Osa kůlu se kryje se svislou osou procházející těžištěm hlavy figuríny. Boční náraz na sloup se neprovádí, není-li automobil standardně vybaven hlavovými airbagy. Při bočním nárazu i bočním nárazům na kůl jsou ve vozidlech figuríny EuroSID II. Hodnocení bočních nárazů je na obr. 9.

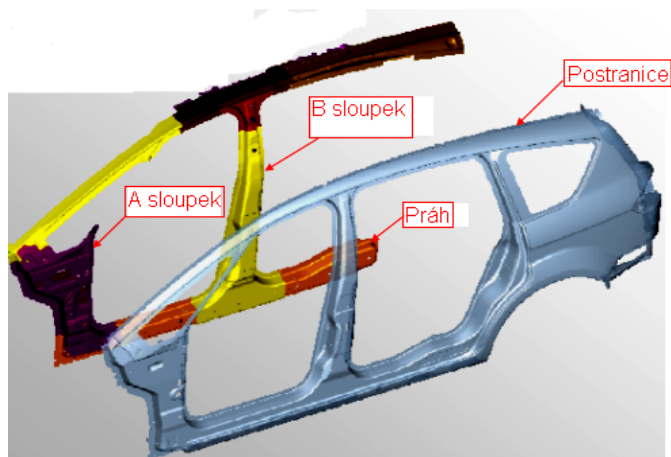


Obr. 9 Hodnocení bočního nárazu a bočního nárazu na kůl [17]



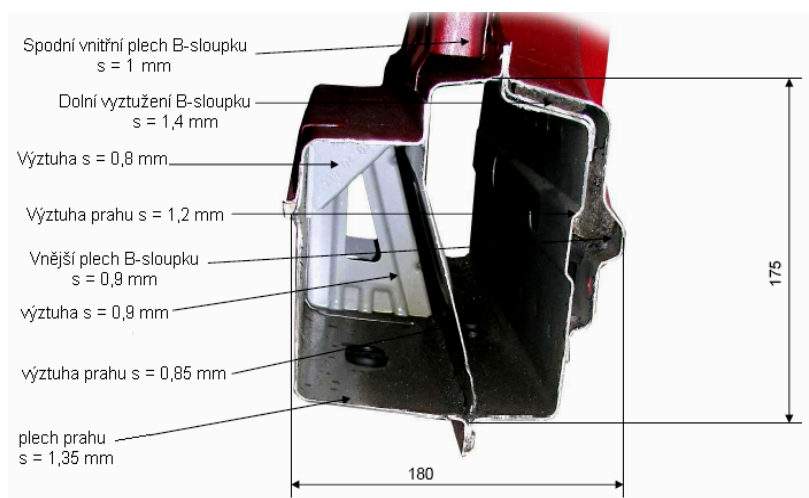
## 2.4 Struktura prahů

Prahy jsou nosné podélné díly karoserie ke kterým jsou připevněny jednotlivé sloupky (např. A sloupek, B sloupek) a na vnitřní straně také platforma (podlaha vozidla). Nachází se na spodních bočních stranách a svoji délkou jsou umístěny od podběhu přední nápravy k podběhu zadní nápravy tzn. každé osobní vozidlo je vybaveno dvěma prahy. Celou boční strukturu karoserie zakrývá tzv. postranice, která je vrchní konturou karoserie (obr. 10).



Obr. 10 Díly připevněné k prahu [4]

Vlastní struktura prahu se skládá z několika dílů tvořících jeden celek (obr. 11). Jednotlivé díly se liší svým konstrukčním, materiálovým a pevnostním uspořádáním tak, aby bylo docíleno požadavků kladených na karoserii. Struktura i materiálové uspořádání prahů jsou odlišné u jednotlivých výrobců, tříd i značek osobních automobilů a dochází k neustálému vývoji.



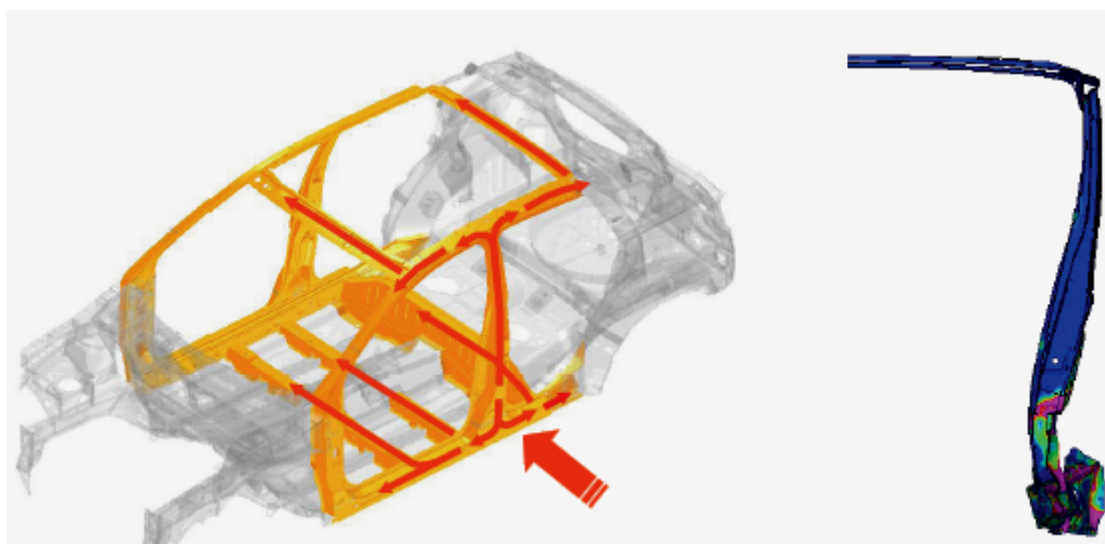
Obr. 11 Příčný řez prahem v místě upevnění B sloupku [18]

Nejčastěji používané díly prahů u ocelových karoserií jsou:

- výztuhy prahu
- pásnice prahu
- výztuha B sloupku (jeho spodní část)
- výztuha A sloupku (jeho spodní část)
- plech uzavírací
- postranice (její spodní část)
- další díly podle konstrukčního uspořádání

Jednotlivé díly se liší svojí tloušťkou (většinou od 0,7 do 2 mm) a materiálovými vlastnostmi (mez pevnosti, mez kluzu, tažnost apod.). Dominantními z hlediska tuhosti a pevnosti jsou většinou výztuha prahu a výztuha B sloupku, jejichž tloušťka je min. 1,3 mm a mez pevnosti přesahuje 500 MPa.

Při bočním nárazu nebo bočním nárazu na sloup je práh jednou z nejvíce namáhaných částí karoserie (obr. 12). Síly vzniklé při nárazu se přenášejí přes bok vozidla na další části (např. příčné nosníky pro upevnění sedadel), dochází nejen k namáhání ohybem a tlakem, ale u některých dílů také krutem. Proto jsou konstrukční práce na karoserii prováděny pomocí nejmodernějších matematických výpočtů, aby se docílilo kompromisu mezi nízkou hmotností karoserie a tuhostí hlavně z hlediska pasivní bezpečnosti.



Obr. 12 Přenos sil a namáhání prahu při bočním nárazu [4]

## 2.5. Teoretické základy pro experiment

### 2.5.1 Plastická deformace

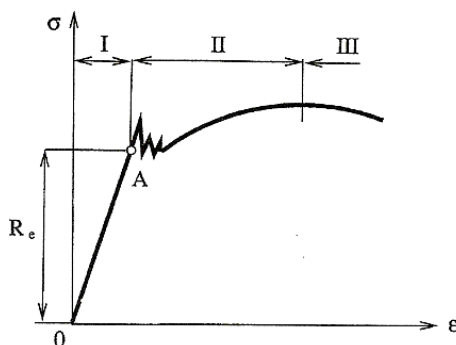
Působením vnějších vlivů se těleso deformuje. Z mechanického hlediska lze chování těles a deformace rozdělit na pružné (elastické) a trvalé (plastické). Pružná přetvoření těles vznikají za normálních podmínek jen do jisté úrovně působících napětí. Toto přetvoření je charakterizováno vratností děje a jednoznačnou závislostí mezi silami a deformacemi. Plastické přetvoření je charakteristické nevratností děje, tzn., že závislost mezi působícími silami a deformacemi je jiná při zatěžování a odlehčování.

Na obr. 13 je pracovní diagram na kterém jsou jednotlivé oblasti znázorněny:

Oblast I – jde o oblast pružných deformací. U řady materiálů je tato závislost lineární nebo je pro výpočty touto závislostí nahrazována. Závislost napětí a deformace je při zatěžování i odlehčování vyjádřena Hookeovým zákonem. Lineární závislost je uvažována až do meze kluzu  $R_e$ .

Oblast II – jde o oblast rovnoměrné plastické deformace (malé plastické deformace). Tato oblast začíná na mezi kluzu  $R_e$  a končí maximálně dosaženou silou (tedy mezí pevnosti  $R_m$ ). Bod A nám tedy určuje mez plasticity.

Oblast III – oblast nerovnoměrné plastické deformace (velké plastické deformace).

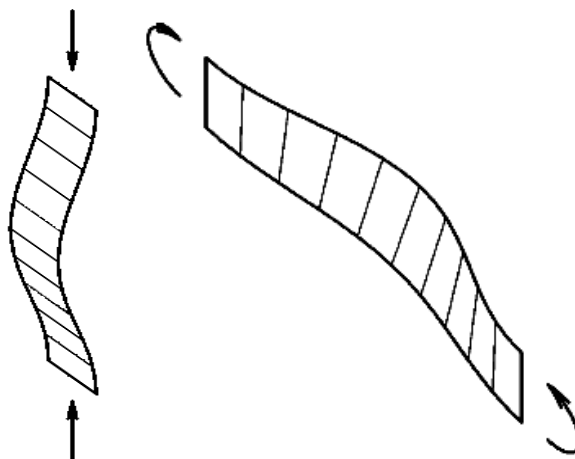


Obr. 13 Pracovní diagram tahové zkoušky [3]

### 2.5.2 Ztráta stability

Tlakové hodnoty osových a membránových složek napětí mohou vést u tenkostěnných konstrukcí (pruty, stěny či skořepiny) ke ztrátě stability. Je to okamžik, kdy se výchozí geometrická konfigurace stává nestabilní, přechod do nové stabilní konfigurace je spojen kromě přerozdělení napětí zpravidla s velkými, funkčně nepřijatelnými deformacemi a ztrátou únosnosti celé konstrukce nebo její části. Z hlediska energetického můžeme na celý

jev pohlížet jako na přeměnu akumulované energie napjatosti membránových složek napětí v energii napjatosti ohybových složek napětí (obr. 14). Protože membránová a ohybová tuhost jsou u tenkostěnných konstrukcí řádově rozdílné, je tento proces doprovázen právě zmíněnými velkými průhyby – boulením střednicové plochy konstrukce [13].



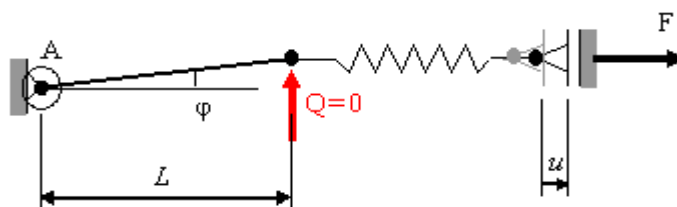
Obr. 14 Ztráta stability při tlaku a při ohybu [13]

### 2.5.2.1 Stabilitní analýza

Stabilitní analýza (buckling analysis) je označováno pro určení:

- Limitní zatížení, při kterém dochází ke ztrátě stability.
- Změny tvaru konstrukce, který je spojen s přechodem do nové stabilní konfigurace.
- Řešení postkritického chování konstrukce, tato analýza je potřebná v případech, kdy je třeba z důvodu bezpečnosti důležitá i znalost chování konstrukce po ztrátě stability (např. chování karoserie vozu při crash testu).

### 2.5.2.2 Bifurkace a imperfekce



Obr. 15 Vysvětlení pojmů bifurkace a imperfekce [13]

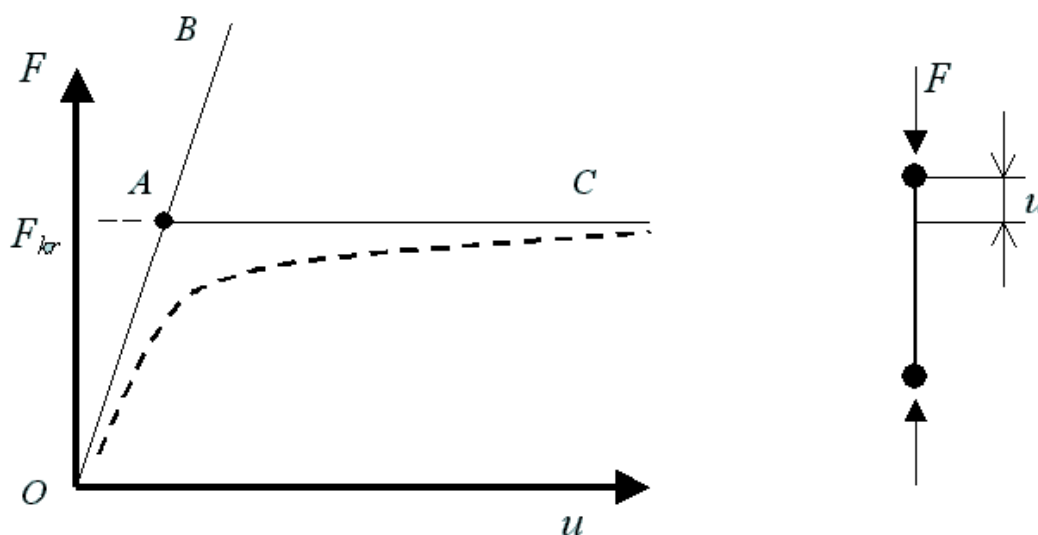
Bifurkace (linear buckling) je vysvětlena podle obr. č. 15.

V okamžiku dosažení kritické osové síly  $F$  jsou z hlediska rovnic rovnováhy teoreticky možné dvě geometricky odlišné rovnovážné konfigurace. Původní přímá, která se stává

nestabilní, a nová vychýlená, stabilní (soustava sama sice zůstává v přímém směru, ale nepatrný impuls v příčném směru způsobí nevratnou změnu tvaru s nenulovým natočením  $\varphi$ ). Proto se v takovém případě hovoří o bifurkaci, neboli rozdělení rovnováhy [13].

Imperfekce (nonlinear buckling) je vysvětlena podle obr. č. 15.

Soustava je nejprve zatížena malou příčnou silou  $Q$ , která způsobí malé natočení  $\varphi$ . Teprve poté zatížíme soustavu tlakovou osovou silou  $F < 0$ . Při postupném zvyšování tlakového zatížení bude vzrůstat i hodnota  $\varphi$  a při  $F \rightarrow F_{kr}$  poroste nade všechny meze. Je zřejmé, že v tomto případě nedochází k bifurkaci, křivka zatížení-natočení je hladká bez zlomů a větvení. Síla  $Q$  zde představuje imperfekci (odchylku, nepřesnost) od ideálního osového zatížení. Velikost  $Q$  přitom rozhoduje, nakolik je tato hladká křivka vzdálena od bifurkačního chování [13].



Obr. 16 Imperfekce (čárkovaná křivka) a bifurkace (plná křivka) [13]

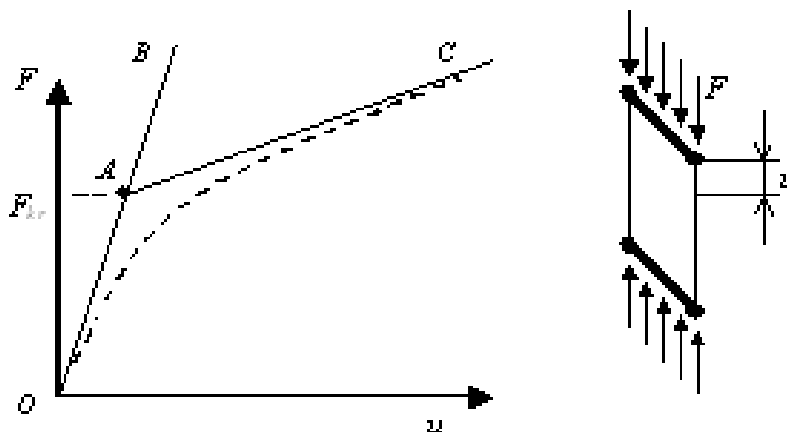
### 2.5.2.3 Postkritické chování

Odezva konstrukce na další zatěžování za bifurkačním bodem bývá označována jako postkritické chování. Z hlediska směrnice zatěžovací dráhy za bifurkačním bodem můžeme rozlišit tři základní případy:

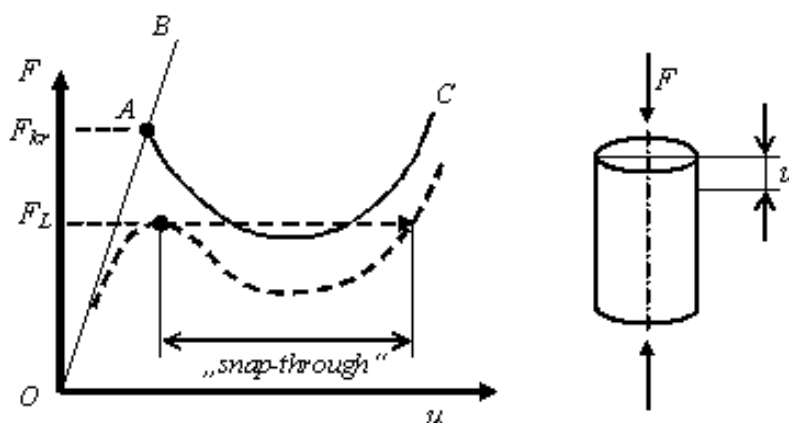
*Indiferentní rovnováha* – postkritická větev AC má nulovou derivaci (obr. 16).

*Postkritické chování je stabilní* – pozitivní směrnice sekundární větve zatěžovacího diagramu u rovinné stěny charakterizuje konstrukci, která je schopna přenášet zatížení větší než kritické bez kolapsu – i po vybočení a boulení je nutno k dalšímu nárůstu deformace nutno zvyšovat zatížení (obr. 17).

*Snap-through* (zborcení) – je typický pro chování axiálně zatížené válcové skořepiny: negativní směrnice sekundární větve AC zde charakterizuje konstrukce, u kterých hrozí v okamžiku bifurkace náhlé zhroucení, ztráta únosnosti (obr. 18).



Obr. 17 Stabilní postkritické chování [13]



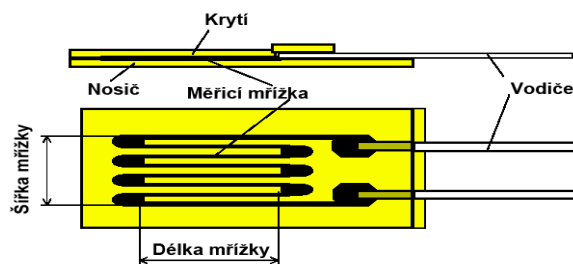
Obr. 18 Postkritické chování Snap-through (zborcení) [13]

### 2.5.3 Tenzometrické měření mechanického napětí

Tenzometrický rezistor (tenzometr) je odporový senzor, u něhož je změna odporu závislá na změně deformace tenzometru (tj. změny geometrických rozměrů, případně změna krystalografické orientace tenzometru) a na změně teploty prostředí.

#### 2.5.3.1 Odporové tenzometry

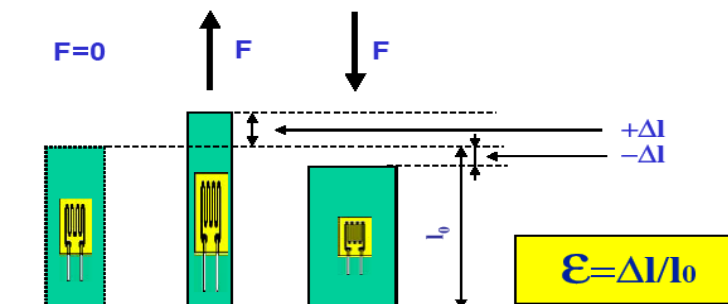
Odporové tenzometry se vyrábějí z materiálu, který je málo citlivý na teplotě. Nejčastěji konstantan. Tenzometr se skládá z nosné folie (obvykle papírové), na níž je upevněn tenký odporový drátek. Aby citlivost snímače byla vyšší je drátek uspořádán do smyček (meandrů) buď v jednom nebo více směrech. K měřenému materiálu je tenzometr v celé ploše nosné folie přilepen předepsaným lepidlem. Na konce odporového drátku jsou naletovány přívodní kabely, které jsou připojeny k aparatuře měřící změny elektrického odporu (obr. 19).



Obr. 19 Schéma foliového tenzometru [9]

#### 2.5.3.2 Princip tenzometrie

Vlivem zatížení materiálu dochází k deformaci. Deformace se projevuje i na povrchu materiálu. Tato změna se přenáší na tenzometr, který takto mění svůj odpor, jež je lineárně úměrný prodloužení na povrchu materiálu (obr. 20). Prodloužení (deformaci) je možno přepočítat na mechanické napětí.



Obr. 20 Princip tenzometrického měření mechanického napětí [9]

Na svorky tenzometru se přivede napětí a se změnou délky se mění odpor vodiče R:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1)$$

Vyjádření poměrné deformace v závislosti na změně odporu:

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right)^{\frac{1}{k_T}} - 1 \quad (2)$$

$k_T$  (k-faktor) je deformační citlivost tenzometru, výrobce ho dokládá jako jeden z parametrů tenzometru.

V oblasti pružných deformací lze podle Hookeova zákona, při znalosti modulu pružnosti E převést výsledky měřené deformace  $\varepsilon$  na normálové napětí  $\sigma$  :

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (3)$$

Měřicí řetězec (obr. 21) je tvořen tenzometry, kabely propojujícími tenzometry se zesilovači dynamická měřicí ústředna kabely propojujícími ústřednu s měřícím počítačem, měřícím počítačem a softwarem sloužícím ke sběru dat, jejich vizualizaci a následnému vyhodnocení získaných dat.



Obr. 21 Měřicí řetězec [9]

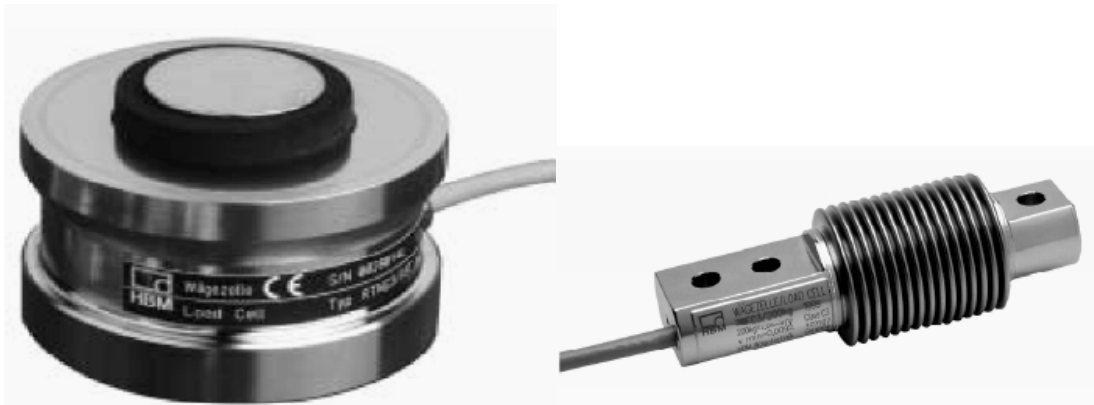


## 2.5.4 Snímače síly

Určování velikosti sil se téměř výhradně realizuje nepřímými metodami, s využitím snímačů sil (obr. 22). Tyto snímače se skládají z čidla a měniče. Funkce čidla je založena na tom, že silové působení na čidlo způsobuje jeho deformaci. Tato se v měniči (převodníku) mění na signál jiné fyzikální povahy (elektrického signálu).

Typy snímačů síly:

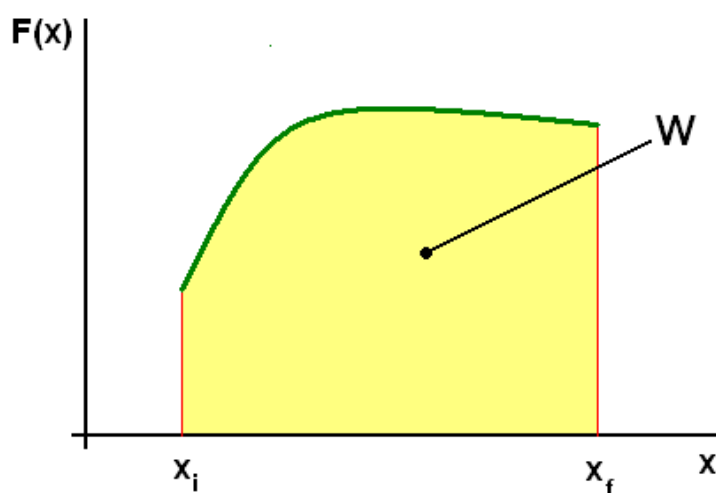
- Indukční
- Kapacitní
- Piezoelektrické
- Magnetoelastické
- Tenzometrické odporové



Obr. 22 Snímače síly [9]

### 2.5.5 Deformační energie (práce)

Při přetváření pružného tělesa rostou vnější síly přímo úměrně s jeho deformací a podle principu akce a reakce rostou přímo úměrně s deformací i vnitřní síly v tělese, jimiž se těleso brání vnucené deformaci (elastická deformace po odlehčení zcela vymizí, plastická deformace zcela nevymizí). Při přetváření tělesa konají tedy vnější síly práci proti vnitřním silám, kterou nazýváme prací přetvárnou čili deformační. Tedy přetvárná práce, správněji mechanická energie spotřebovaná na přetvoření, se v deformovaném tělese mění v potenciální energii deformační. Energie (práce) vykonaná působící silou je dána vztahem a geometricky reprezentována vybarvenou plochou, omezenou osou  $x$  a grafem funkce  $F(x)$  mezi hodnotami  $x_i$  a  $x_f$  (obr. 23).



Obr. 23 Geometricky znázorněná energie

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x) dx \quad (4)$$

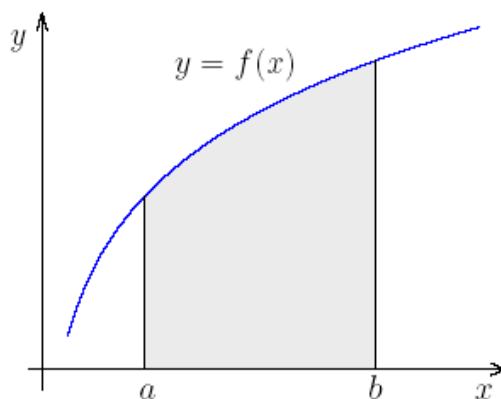
### 2.5.6 Tuhost

Tuhost je schopnost tělesa nebo konstrukce odolávat působení vnějších sil pokud možno s nejmenším přetvořením. Měřítkem tuhosti je síla potřebná k deformaci tělesa o délkovou jednotku.

$$K = \frac{F}{x} \quad (5)$$

### 2.5.7 Numerická integrace

Geometrický význam integrálu  $I(f)$  (viz. obr 24) je obsah plochy mezi grafem funkce  $f$  a osou  $x$  na intervalu  $\langle a, b \rangle$ .



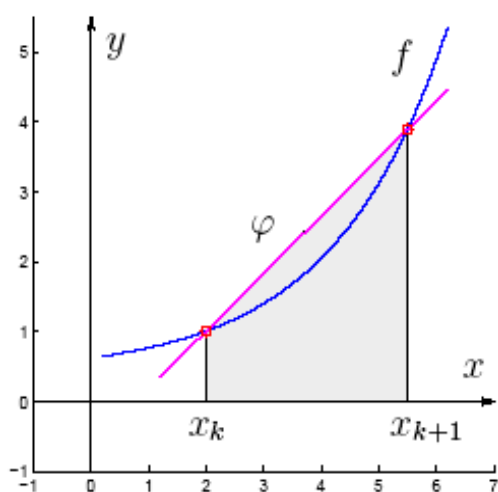
Obr. 24 Význam integrálu [10]

Numerické metody výpočtu integrálu užíváme zejména tehdy, když  $I(f)$  není možno spočítat analyticky (velmi častý případ) nebo je sice analytické řešení možné, ale je velmi pracné. V případě, že máme zadanou funkci  $f$  tabulkou, není ani jiný přístup možný.

Tři nejjednodušší základní metody řešení:

1. Obdélníkové pravidlo (funkci  $f$  nahrazujeme konstantní funkcí  $\varphi$ ).
2. Lichoběžníkové pravidlo (funkci  $f$  nahrazujeme lineární funkcí  $\varphi$ ). Viz. obr. 25.
3. Simpsonovo pravidlo (funkci  $f$  nahrazujeme kvadratickou funkcí  $\varphi$ ).

#### 2.5.7.1 Lichoběžníkové pravidlo



$$\int_{x_k}^{x_{k+1}} f(x) \cdot dx \approx \frac{h}{2} \cdot [f(x_k) + f(x_{k+1})]$$

Obr. 25 Nahrazení křivky přímkou a výpočet pro Lichoběžníkové pravidlo [10]

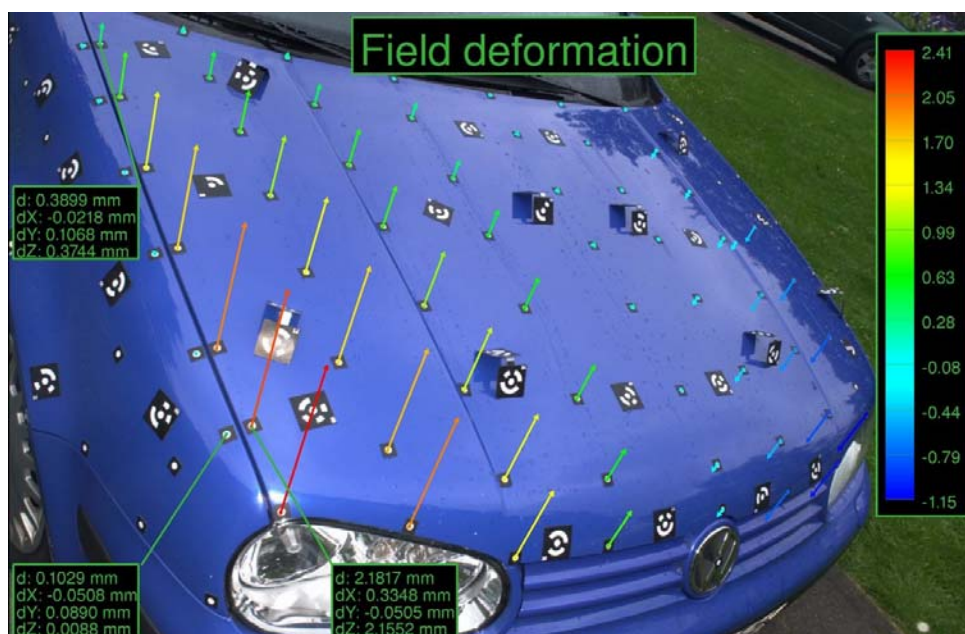
## 2.5.8 Měření deformace při crash testu

Existuje řada metod pro měření velikosti deformace. V rámci této práce se zaměříme jen na princip měření, kterým se určuje nejčastěji deformace na prazích vozidel po crash testu bočního nárazu nebo bočního nárazu na kůl. Tato deformace vychází z tzv. intruze, což je proniknutí deformovatelné bariéry resp. kůlu do boku vozidla.

### 2.5.8.1 Princip měření

Proces měření je založen na principech fotogrammetrie. Měřený objekt je označen optickými body (samolepícími, magnetickými nebo speciálními adaptéry). Připravený objekt je snímán digitálním fotoaparátem z různých pozic v prostoru. Na základě digitálních snímků systém vypočítá pozice fotoaparátu při jednotlivých snímcích a souřadnice měřených bodů na objektu (obr. 26).

Tato deformační analýza se provádí systémem TRITOP (3D optical digitizing deformation). Zařízení umožňuje měřit, vyhodnocovat a zobrazovat statické zatížení objektu. V diskretních bodech vyhodnocuje velikost a směr vektorů deformace. Pro každý stav zátěže vznikne samostatný projekt. Tyto projekty jsou následně transformovány do společného souřadného systému. Nakonec jsou vypočteny deformace jednotlivých bodů, které jsou přímo znázorněny v digitální fotografii a výstupním protokolu [19].

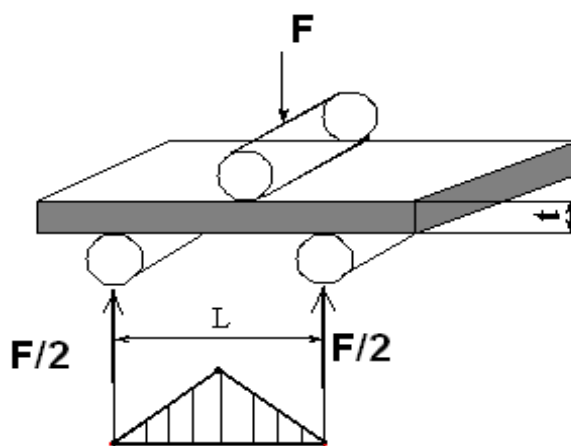


Obr. 26 Měření deformace pomocí fotogrammetrie [19]

### 2.5.9 Tříbodový ohyb

Zkouška ohybem dává důležité konstrukční podklady pro materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, což je velmi častý případ. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti  $E$  u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek. Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové.

Při tříbodové zkoušce (obr. 27) je zkušební těleso podepřeno jako nosník dvěma podpěrami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty (ČSN EN ISO178).



Obr. 27 Tříbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu [11].

S ohledem na platnost vztahů používaných pro výpočet ohybových charakteristik je nutné především dodržet korelaci mezi vzdáleností podpěr a tloušťkou zkušebního tělesa. U kovových materiálů se zpravidla používá minimální poměr 4:1 ( $L \geq 4 \cdot t$ ). Pod touto hodnotou se již nejedná o ohybovou zkoušku, ale o zkoušku stříhem.

Oblast elastických deformací při zkoušce tříbodovým ohybem je dána:

$$E = \frac{F}{t} \cdot \frac{L^3}{48 \cdot J_0} \quad (6)$$

Ve srovnání s tahovou zkouškou má tyto nevýhody:

- Zjištěný modul  $E$  je střední hodnotou mezi modulem v tlaku a v tahu.
- Riziko, že vyhodnocujeme nejen průhyb zkušebního tělesa, ale i zamačkování opor.

## 2.6 Příprava prahů pro experiment

Získání konceptu prahů z jednotlivých karoserií bylo navrženo tak, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění dílů i spojů prahu (max. působící teplota 300 °C). Díly připevněné či obklopující práh (platforma, jednotlivé sloupky, držák sedačky apod.) se vyřízly co nejblíže konceptu prahu, s ohledem na to, aby nedošlo k poškození jeho dílů a dostali jsme celistvou strukturu tvořící práh (obr. 28 a 29).

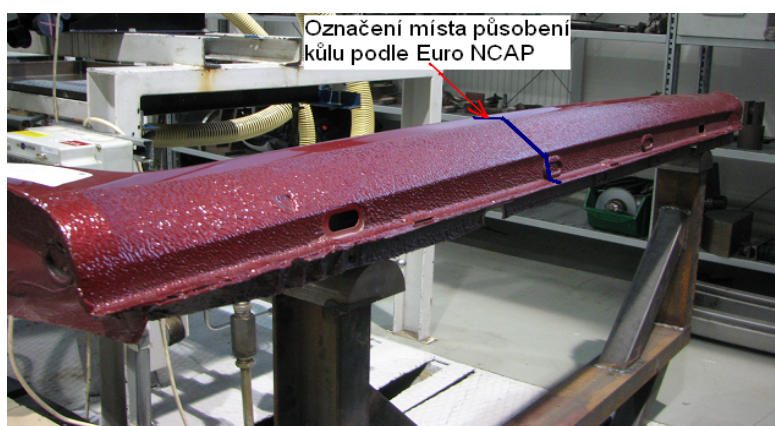


Obr. 28 Vrchní část vyříznutého prahu [5]



Obr. 29 Spodní část vyříznutého prahu [5]

Pro jednotlivá vozidla, ze kterých se prahy vyřezaly, byly získány souřadnice (počátek bývá v oblasti přední nápravy, v jejím středu, zpravidla pod osou rotace předních kol) těžiště hlavy figuríny tj. místo, kde působí kůl při bočním nárazu v crash testu. Hodnota osy x tj. podélná osa vozidla byla přenesená na jednotlivé prahy, kde se svislou čarou vytvořila značka potřebná pro označení místa, kde bude působit kůl v daném experimentu (obr 30).



Obr. 30 Označení prahu příčnou značkou (modrá čára) [5]

## **3. Praktická část**

### **3.1 Úvod**

Cílem této práce je první velké přiblížení metodiky zkoušení samostatných struktur prahů. Zkouška musí být koncipována na největší namáhání této části a tím je boční náraz a boční náraz na sloup celého vozidla. Jedná se o složitou záležitost, protože na strukturu prahu navazuje řada dílů, kterou se přenášejí síly při nárazu. Dalším problémem je kombinované namáhání při globálním bočním nárazu automobilu. Proto musí být zahrnuta řada zjednodušení pro docílení výsledku.

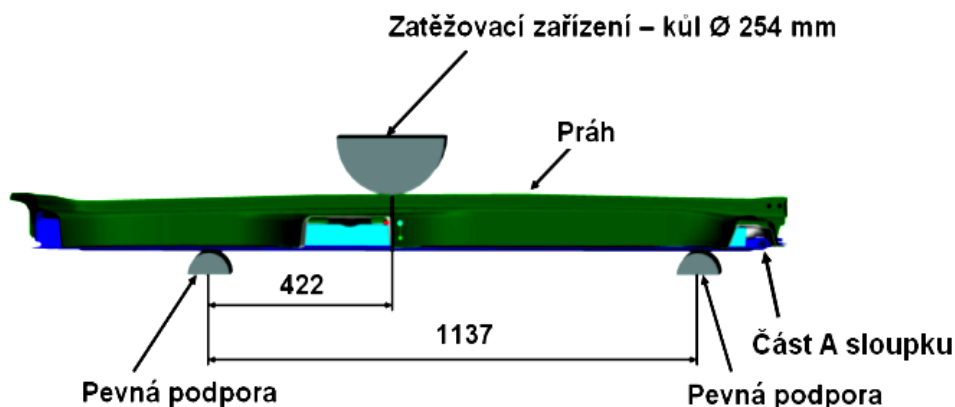
Zjednodušující předpoklady pro zkoušení prahu v porovnání s bočním nárazem celého vozu:

- Zanedbání platformy, držáků pro upevnění sedačky i jiných příčníků a dalších dílů, kterými se přenášejí síly.
- Struktura prahu je namáhána jen ohybem.
- Vzdálenost mezi podporami se přizpůsobí na jednotnou hodnotu, aby se daly jednotlivé struktury porovnávat.
- Musí být na obou podporách podepřena výztuha prahu, aby nedocházelo k velkému zamačávání podpor do struktury prahu.

### 3.2 Experiment

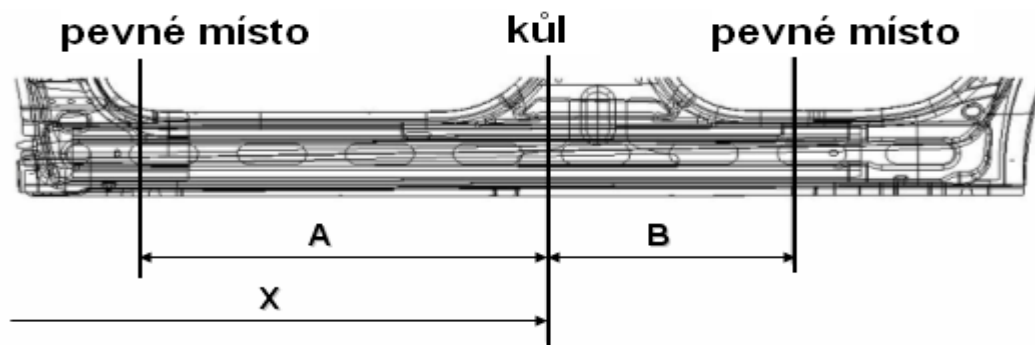
Zkoušeny byly tři různé struktury prahů používaných u vozidel značky Škoda získané viz. kap. 2.6.

Byla navržena zkouška kvazistatickým tříbodovým ohybem. Dvě podpory o průměru 100 mm a zatěžující kůl o průměru 254 mm, který pro jednotlivé prahy působil do míst jako při crash testu (tzn. stejný průměr i poloha jako při bočním nárazu na kůl podle EuroNCAP). Vzdálenost a uspořádání podpor vycházelo z pevných míst na vnitřní straně prahu, tím byl příčník v zadní části a zesílení platformy či výztuha v přední části. Vzdálenost podpor byla pro všechny tři prahy stejná, i když skutečné hodnoty se pro jednotlivé automobily (prahy) lišily. Rozteč podpor byla 1137 mm (obr. 31). Vzdálenost podpor od místa působení kůlu byla 422 mm (podpora umístěná v zadní části prahu) a 715 mm (podpora v předu).



Obr. 31 Rozměry a uspořádání prahu pro experiment

Skutečné umístění pevných míst se pro jednotlivé automobily odlišoval z důvodu jiného konstrukčního uspořádání, typu karoserie a tím odlišnými rozvory náprav. Různé byly i vzdálenosti místa působení kůlu od přední nápravy.



Obr. 32 Umístění pevných míst na zadní straně prahu



A je skutečná vzdálenost pevného místa na prahu v přední části od místa působení kúlu, B je skutečná vzdálenost pevného místa na prahu v zadní části od místa působení kúlu, X je vzdálenost místa působení kúlu od středu přední nápravy, přičemž tolerance při bočním nárazu na kúl činí  $\pm 38$  mm. Hodnota X se nebude zveřejňovat z důvodu utajení pro jednotlivé automobily.

Rozdíl umístění pevných míst na prahu mezi skutečnou hodnotou a experimentem je vyjádřen pro jednotlivé struktury v následujících tabulkách.

Tab. 1 Struktura prahu 1

Skutečná A [mm]	Skutečná B [mm]	Rozdíl skutečná A – experiment A [mm]	Rozdíl skutečná B – experiment B [mm]
715	422	0	0

Tab. 2 Struktura prahu 2

Skutečná A [mm]	Skutečná B [mm]	Rozdíl skutečná A – experiment A [mm]	Rozdíl skutečná B – experiment B [mm]
850	472	135	50

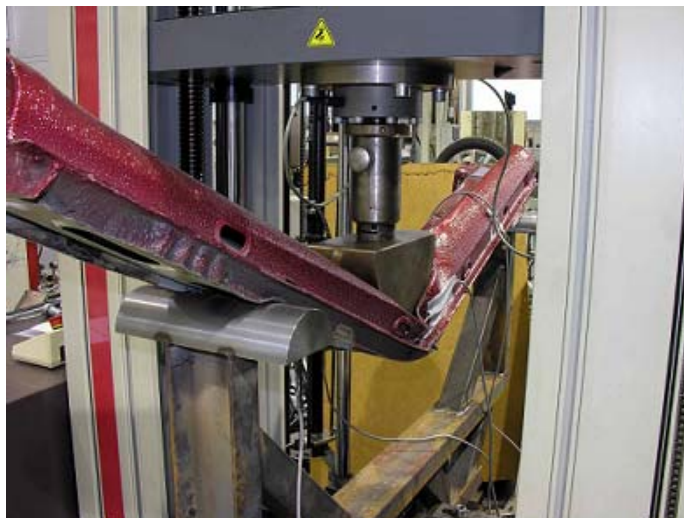
Z této tabulky vyplývá, že rozteč podpor v experimentu oproti skutečným pevným místům je celkově o 185 mm menší. Tato skutečnost zvyšuje tuhost tohoto prahu a mění průběh síly na posuvu v daném experimentu. Tím je tento práh v porovnání se zkoušenými prahy zvýhodněn a má „lepší“ závislosti než kdyby se zkoušel na skutečnou rozteč.

Tab. 3 Struktura prahu 3

Skutečná A [mm]	Skutečná B [mm]	Rozdíl skutečná A – experiment A [mm]	Rozdíl skutečná B – experiment B [mm]
726	411	11	-11

Tento práh má ve skutečnosti stejnou rozteč jako struktura prahu 1, ale jednotlivé vzdálenosti od místa působení kúlu k podporám se nepatrně liší. Tyto vzdálenosti jsou v toleranci působícího kúlu při bočním nárazu ( $\pm 38$  mm).

Prahy se ohýbaly do úplného zborcení (obr. 33), kdy již nevykazovaly žádnou tuhost (posuv zatěžovacího zařízení byl 500 mm).



Obr. 33 Foto ohnutého prahu [5]

Vytipovaná místa na prazích byla opatřena tenzometry pro měření mechanického napětí (obr. 34). Výsledné záznamy z tenzometrů se zpracovávají do grafů jako závislost přetvoření na posuvu, jelikož se jednalo o velké plastické přetvoření a platnost Hookeova zákona byla jen v malé omezené oblasti.

Parametry tenzometrů: – označení: CEA – 06 – 250UW – 120

– rezistence:  $120 \Omega \pm 0,5\%$

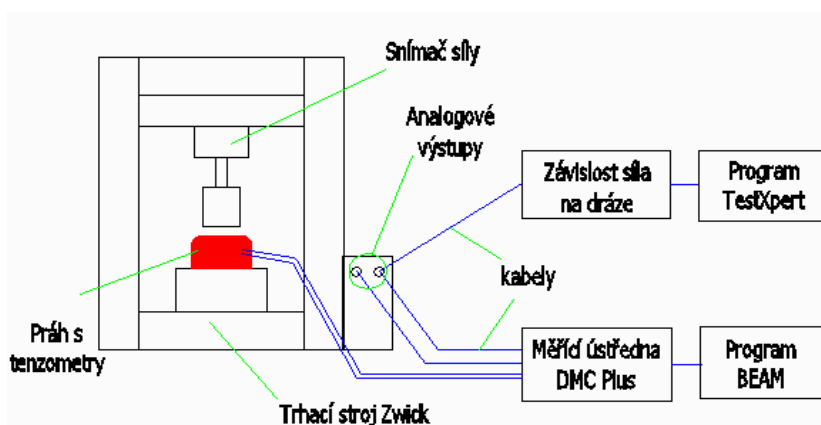
– koeficient citlivosti:  $2,045 \pm 0,5\%$



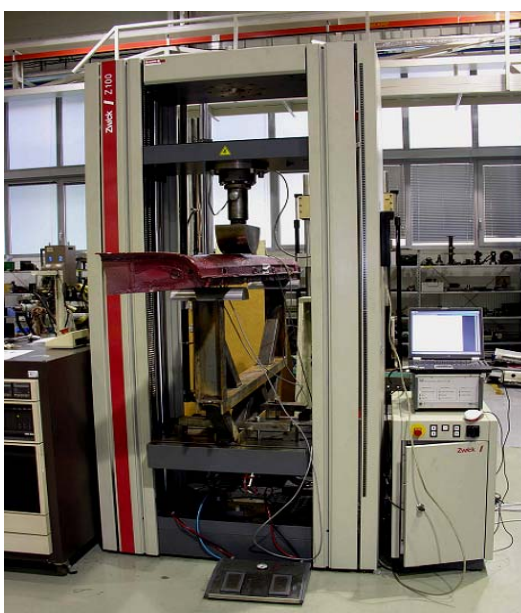
Obr. 34 Tenzometry na prahu [5]

### 3.2.1 Zkušební zařízení

Zkouška se prováděla na stroji od firmy Zwick pro měření mechanických vlastností materiálu. Zařízení je vybaveno siloměrem GTM 100 kN, jehož analogové výstupy se zpracovávají v měřicím a data zpracujícím software testXpert od firmy Zwick. Výsledkem byla závislost síly na dráze ohýbaného prahu. Zkoušený práh byl opatřen tenzometry od firmy VISHAY Measurement Group. Z nich byly jednotlivé signály vedeny do měřicí ústředny DMC Plus od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, na jejíž kanály byly napojeny i analogové výstupy snímače síly v závislosti na posuvu. Signály se zpracovávají v programu BEAM od výrobce AMS. Výstupem byla závislost napětí na posuvu jednotlivých tenzometrů a opět také síla na posuvu. Kompletní měřicí řetězec je znázorněn na obr. 35. Foto pracoviště pro měření na obr. 36.



Obr. 35 Schéma měřicího zařízení

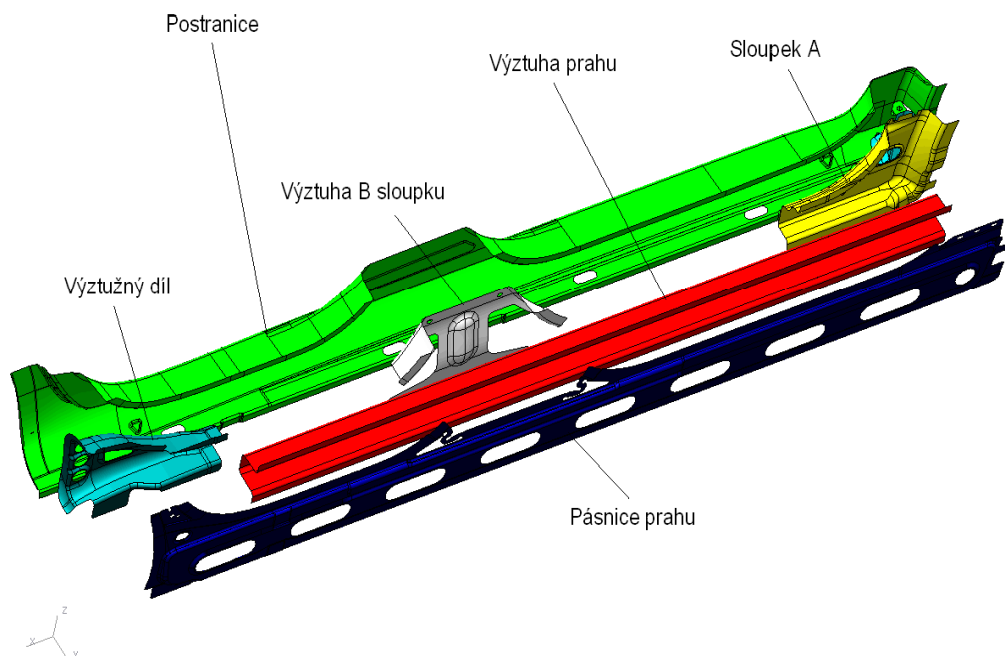


Obr. 36 Foto uzpůsobení pracoviště pro měření

### **3.2.2 Vyhodnocení experimentu**

- Závislosti síly na posuvu pro jednotlivé prahy se omezila maximální hodnotou intruze, měřenou na prazích, která byla způsobená na vozidle při crash testu na boční náraz na sloup. Po tuto délkovou hodnotu se spočítala numerickou integrací plocha pod křivkou. Velikost této plochy udává hodnotu deformační energie. Tyto hodnoty se spočítaly pro jednotlivé prahy, tím se dostaly tři vypovídací hodnoty, které je možno porovnávat.
  
- Závislosti síly na posuvu pro jednotlivé prahy se omezila maximální hodnotou intruze, měřenou na prazích, která byla způsobená na vozidle při crash testu na boční náraz. Po tuto délkovou hodnotu byla křivka síly na posuvu nahrazena přímkou (nebo přímkami) a z ní spočítána tuhost. Tuhosti se opět určily pro jednotlivé prahy a dostaly se hodnoty k porovnání.
  
- Pro jednotlivé struktury prahů se pomocí softwarového programu spočítaly hmotnosti dílů, ze kterých jsou prahy tvořeny. Ty se pro danou strukturu sečetly. Hmotnosti prahů se dají mezi sebou porovnávat.
  
- Závislosti přetvoření na posuvu změřené tenzometry se pro jednotlivé signály zhodnotily komentářem, jak se v místě nalepení tenzometrického čidla chová struktura prahu. Jedná se o názorový předpoklad podle experimentu a průběhu naměřeného grafu.

### 3.2.3 Struktura prahu 1

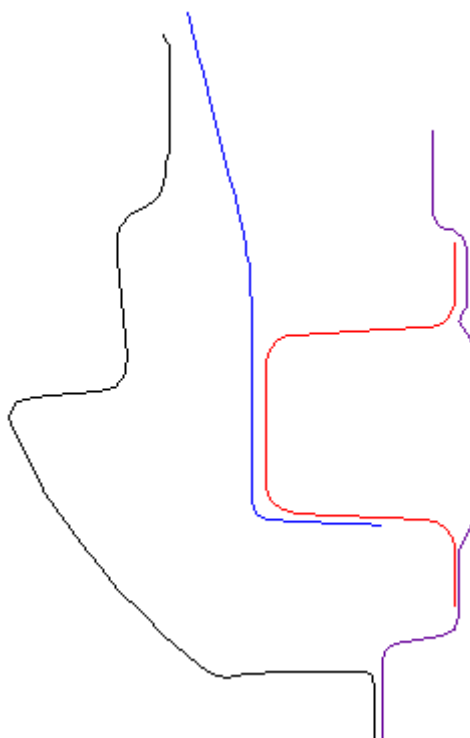


Obr. 37 Rozpad zkoušeného prahu

Tato struktura se konstrukčně skládá z nejméně dílů. Výztuha prahu je profil U s protaženými konci do venku. Pásnice zavírá celou strukturu po celé délce. Celý práh je znázorněn na obr. 37 a 38.

Tab. 4 Materiálové vlastnosti jednotlivých dílů

Název dílu	Tloušťka plechu [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]
Výztuha prahu	2	1000 – 1160	1200 – 1400
Výztuha sloupku B	2	min. 1100	1400– 1800
Díl výztužný	1	220 – 260	320 – 400
Pásnice prahu	1	220 – 260	320 – 400
Sloupek A	1,4	220 – 260	320 – 400
Postranice	0,75	120 – 160	270 – 340



Obr. 38 Řez prahem v místě působení kúlu



Obr. 39 Výsledný graf

První část grafu (posuv do 40 mm) vykazuje síla téměř nulovou hodnotu je to zapříčiněno jednak vymezením minimální vůle mezi kúlem a prahem a také docházelo k zamačkávání (deformaci) spodní částí v místě umístění podpor.

Druhá část grafu (posuv od 40 do 75 mm) – kůl působí na postranici, která vykazuje malou ohybovou tuhost a i tvarovou složitost, takže kůl nepůsobí celou svojí šířkou na práh a síla narůstá jen pozvolna.

Třetí část grafu (posuv od 75 do 110 mm) – kůl působí celou svojí šířkou na postranici a dochází k vymezení vůle mezi postranici a B sloupkem, který obepíná výztuhu. Kůl tak začíná působit na tuhé místo a tím dojde k úplnému zamáčknutí měkčích míst na spodní straně v místě umístění podpor. Síla narůstá již strměji.

Čtvrtá část grafu (posuv od 110 do 147 mm) – kůl již plně působí přes zborcenou postranici na B sloupek s výztuhou, jde o strmý nárůst síly. Práh zde vykazuje největší tuhost. Při posuvu 147 mm vykazuje práh maximální sílu 39,54 kN.

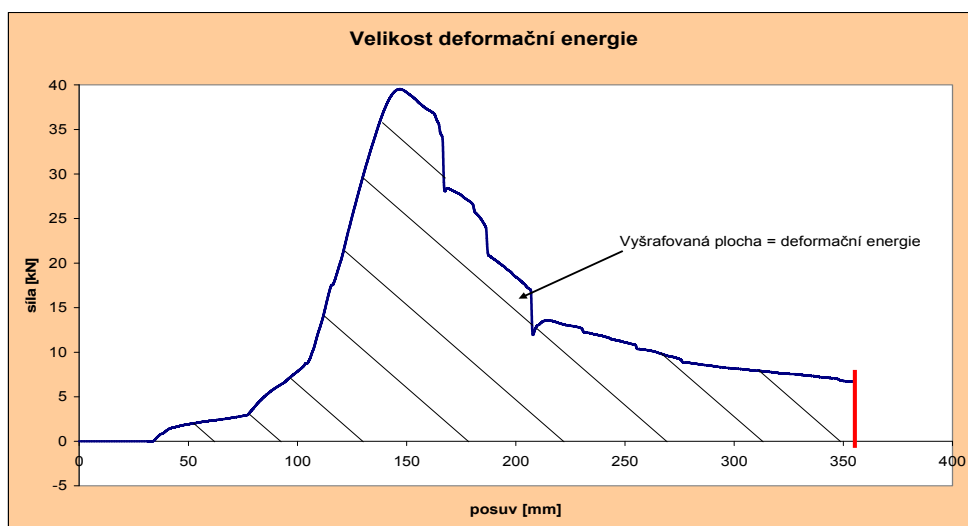
V další části dochází k proplastizování celého průřezu, ke ztrátám stability a k praskání spojů (svarů), což dokazují atypické špičky. U tohoto prahu došlo i k prasknutí výztuhy a pásnice (obr. 40). Práh se ohýbal až do okamžiku, kdy nevykazoval žádnou ohybovou tuhost.



Obr. 40 Prasklá výztuha po zkoušce [5]

### 3.2.3.1 Výpočet deformační energie

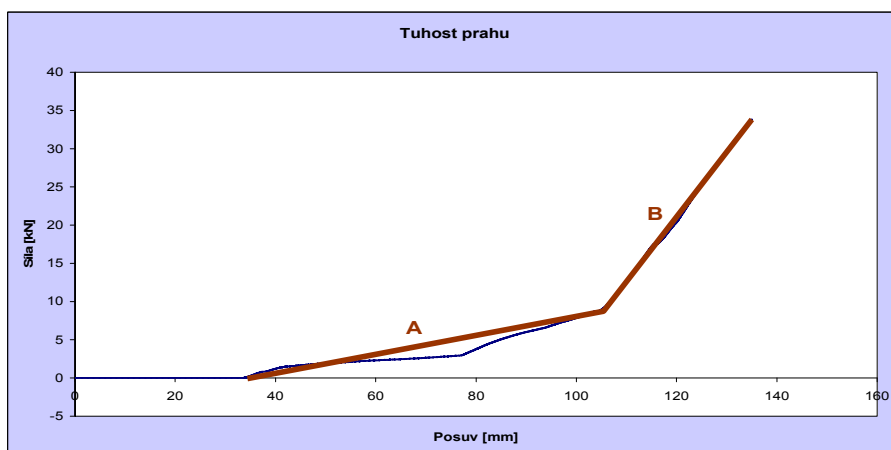
Po maximální hodnotu intruze při bočním nárazu na kúl (355 mm) se spočítala plocha pod křivkou, což je deformační energie (obr. 41). Její velikost je 4420 J.



Obr. 41 Plocha znázorňující deformační energii

### 3.2.3.2 Výpočet tuhosti

Tuhost se spočítala po maximální hodnotu intruze na boční náraz (135 mm). U tohoto prahu byla rozdělena na dvě přímky (větve), které lépe vystihují (aproximují) nárůst síly u tohoto prahu (obr. 42). Tuhost se začala počítat od místa, kdy u prahu začínala narůstat síla. Tuhost přímky A je  $126220 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ . Tuhost přímky B je  $832323 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ .



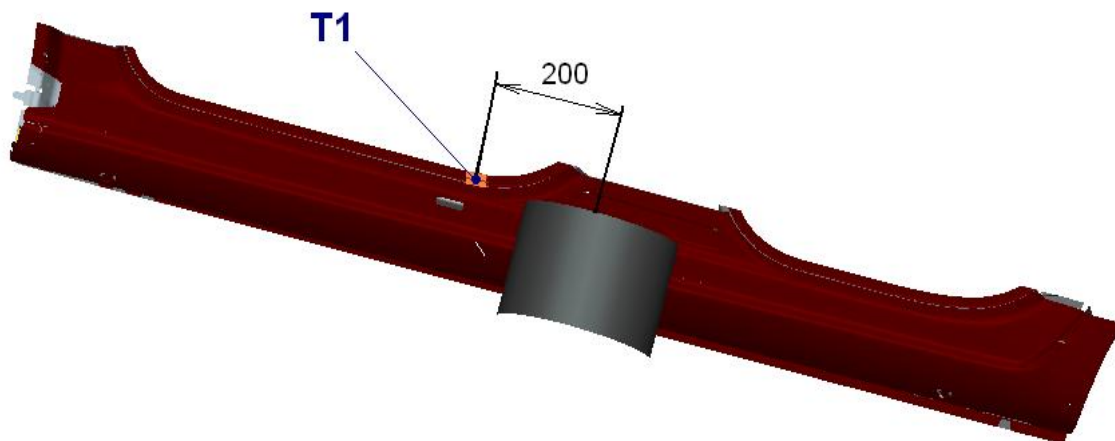
Obr. 42 Nahrazení křivky přímkami pro výpočet tuhosti

Hmotnost celkové struktury tohoto prahu je 11,9 kg.

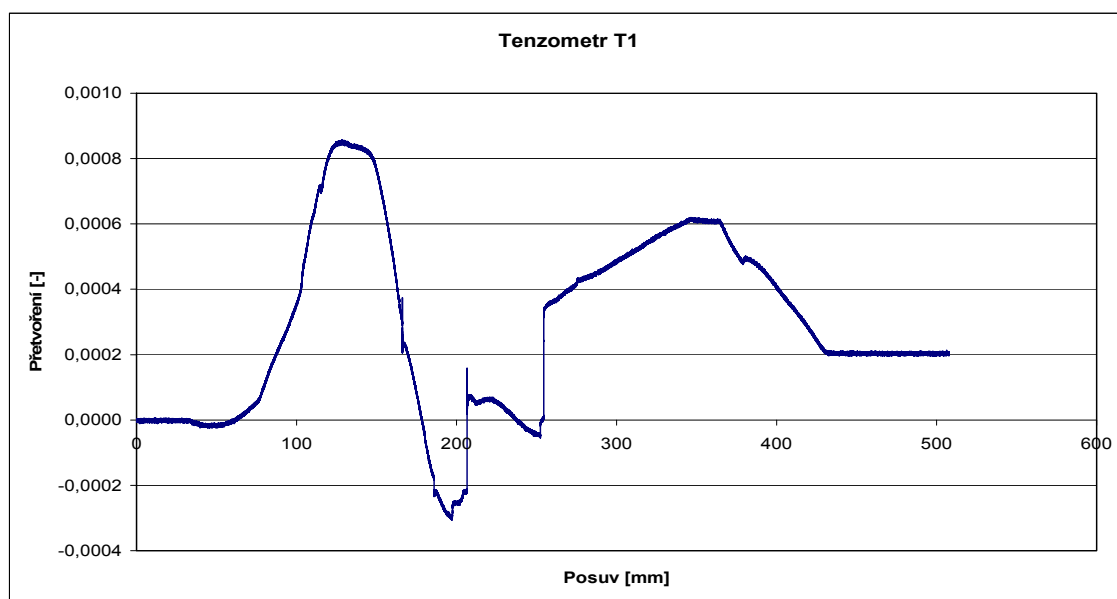


### 3.2.3.3 Tenzometr T1

Tento tenzometr se nacházel 200 mm od působení zatěžujícího kúlu na vrchním okraji postranice. Místo nalepení T1 je na obr. 43.



Obr. 43 Umístění tenzometru T1

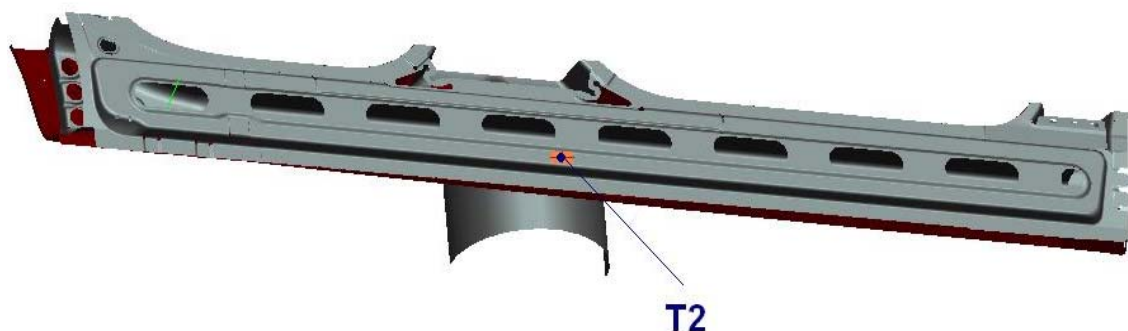


Obr. 44 Výsledný signál z tenzometru T1

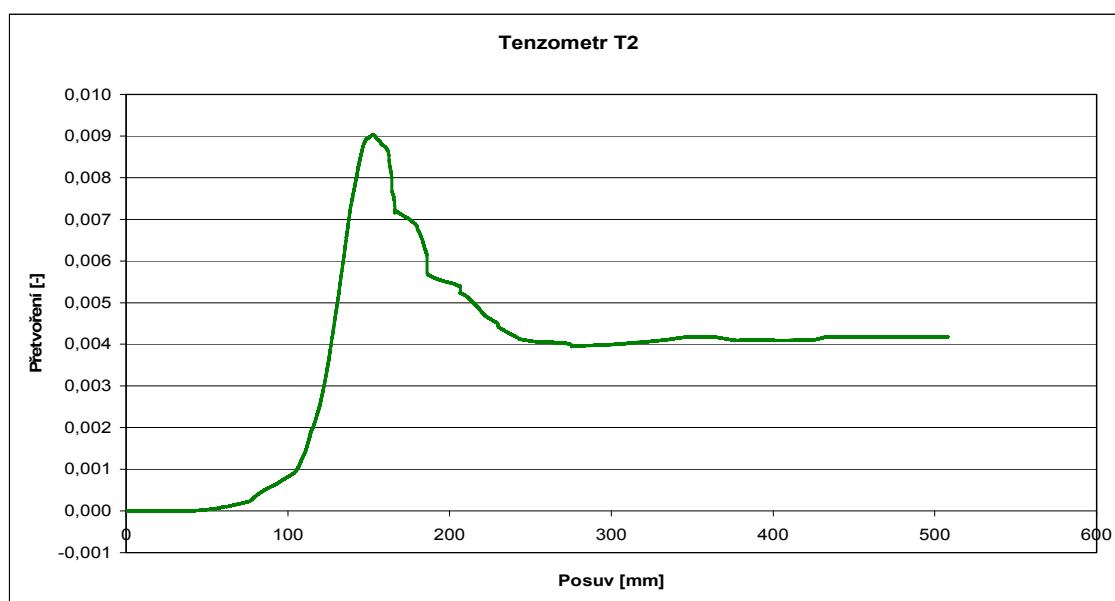
V místě nalepení tenzometru dochází zpočátku k nárůstu tahového napětí a po dosažení určitého přetvoření dochází k přechodu do nové oblasti, krátce i do tlakových napětí. Jedná se o ztráty stability (zborcení) postranice v celém průběhu signálu až do konstantního průběhu přetvoření (napětí). Celé je to způsobeno slabým plechem postranice (skořepina) a velkým ohybovým a membránovým napětím.

### 3.2.3.4 Tenzometr T2

Tenzometr T2 se umístil na spodní plochu pásnice prahu v místě působení kůlu. Místo nalepení T2 je na obr. 45.



Obr. 45 Umístění tenzometru T2

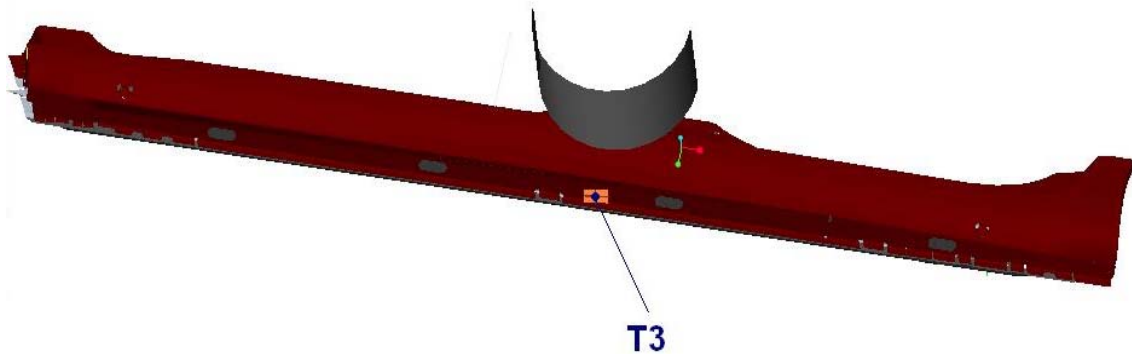


Obr. 46 Výsledný signál z tenzometru T2

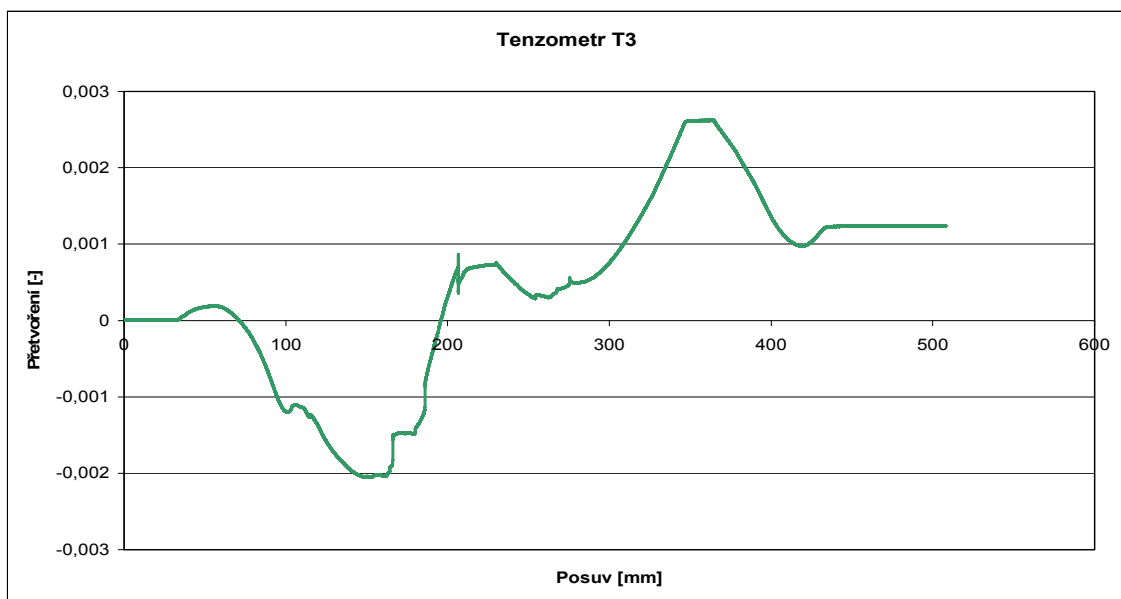
Tento tenzometr vykazuje předpokládané tahové napětí. Po dosažení přetvoření 0,009 dochází ke vzniku plastického kloubu a vybočení tenzometru z jeho vrcholu. Tato skutečnost se projevuje klesáním křivky až do míst, kdy vznikne na výztuze a pásnici trhlinka. Další zatížení způsobuje růst trhlinky a konstantní přetvoření v místě nalepení tenzometru.

### 3.2.3.5 Tenzometr T3

Tenzometr T3 se umístil na boční stranu postranice v místě působení kůlu. Místo nalepení T3 je na obr. 47.



Obr. 47 Umístění tenzometru T3

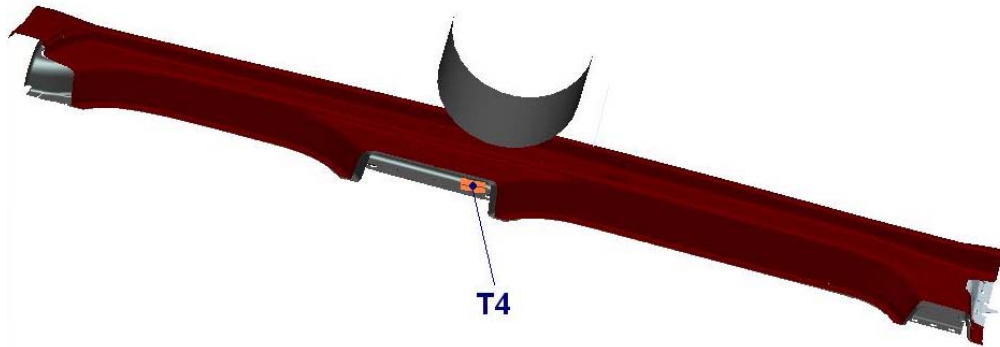


Obr. 48 Výsledný signál z tenzometru T3

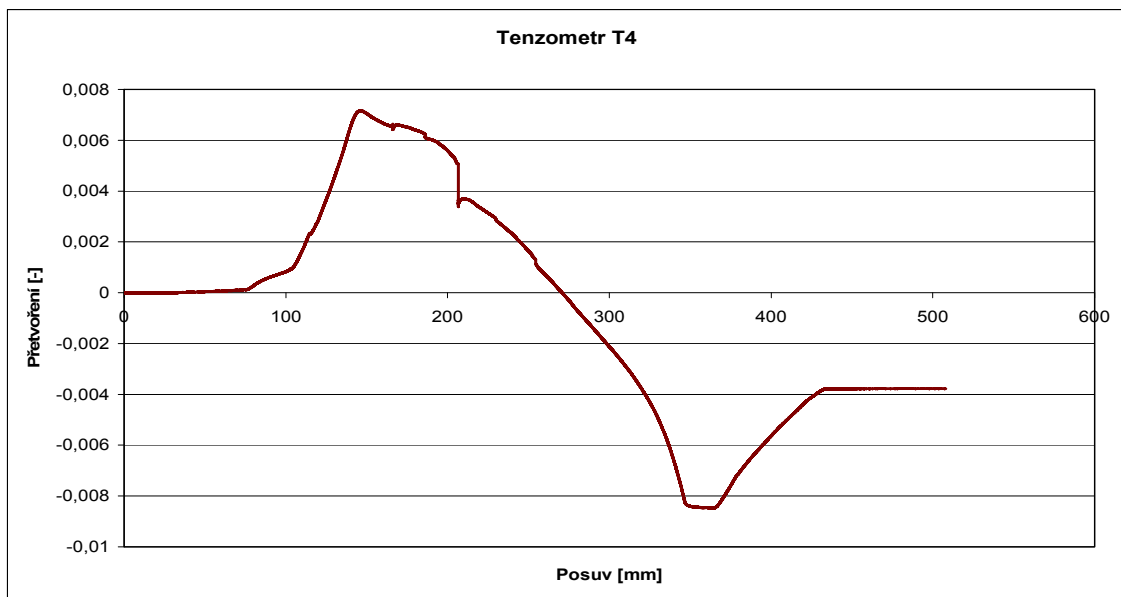
Tento tenzometr je opět na postranici ze slabého plechu (tloušťka plechu 0,75 mm), proto se jedná o deformaci skořepiny. Docházelo ke ztrátám stability, což je patrné z měnícího se průběhu. Při posuvu okolo 210 mm je patrné „zakolísání“ křivky přetvoření znázorňující prasknutí výztuhy prahu.

### 3.2.3.6 Tenzometr T4

Tenzometr T4 se umístil na výztuhu prahu na její prodloužený konec z vrchní části v místě působení kůlu. Místo nalepení T4 je na obr. 49.



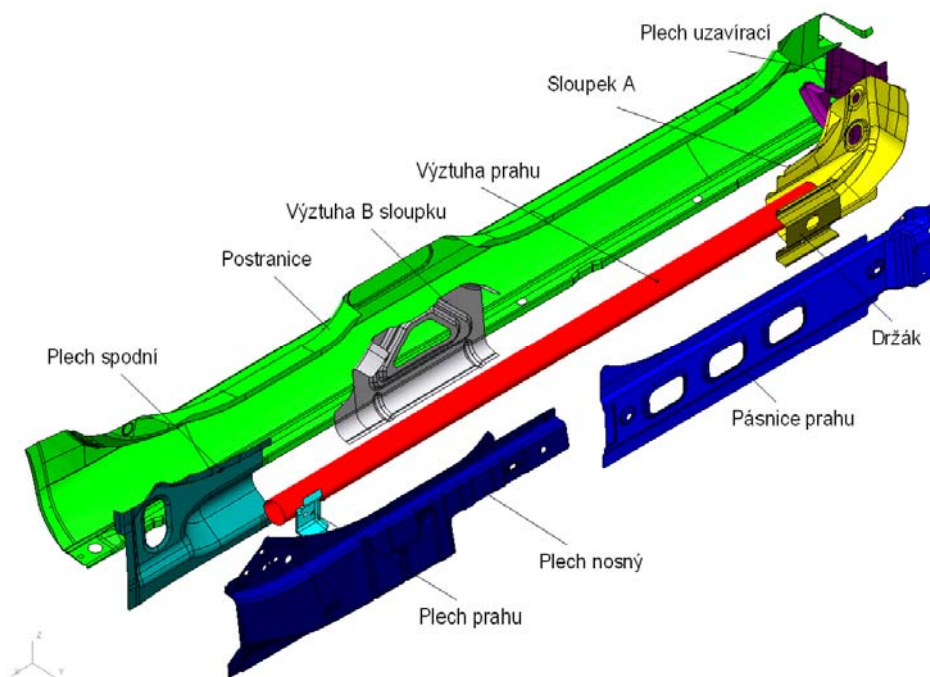
Obr. 49 Umístění tenzometru T4



Obr. 50 Výsledný signál z tenzometru T4

V místě nalepení tenzometru dochází zpočátku k nárůstu tahového napětí. Při přetvoření 0,0067 (napětí 1400 MPa dle Hookeova zákona) odpovídající mezi pevnosti materiálu, ze kterého je výztuha vyrobená, dojde k velké plastické deformaci a klesání křivky. V místě posuvu okolo 210 mm je opět patrná špička vzniku praskliny na výztuze a pásnici. Dalším zatěžováním začíná vznikat plastický kloub celé struktury prahu a na tenzometru je naměřeno tlakové přetvoření.

### 3.2.4 Struktura prahu 2

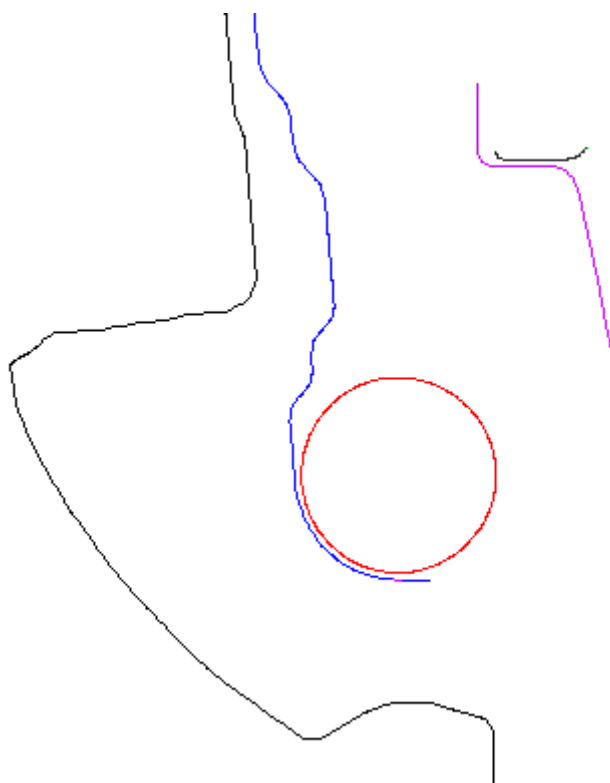


Obr. 51 Rozpad zkoušeného prahu

Tento práh má výztuhu kruhového průřezu (trubka). Pásnice uzavírá jen přední část prahu, zadní část je zakrytá nosným plechem. V místě působení kúlu je tento práh na zadní straně otevřený. Celý práh je znázorněn na obr. 51 a 52.

Tab. 5 Materiálové vlastnosti jednotlivých dílů

Název dílu	Tloušťka plechu [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]
Výztuha prahu	1,7	min. 1100	1400 – 1800
Výztuha B sloupku	1,75	min. 1100	1400 – 1800
Sloupek A	1,4	260 – 340	350 – 430
Postranice vnější	0,75	120 – 190	270 – 340
Plech uzavírací	0,6	220 – 270	340 – 400
Díl nosný	1,1	260 – 330	350 – 430
Pásnice prahu	0,75	380– 420	min. 600
Držák	1,25	340 – 420	410 – 510
Plech prahu	2	420 – 520	470 – 590
Plech spodní	0,8	220 – 260	320 – 400



Obr. 52 Řez prahem v místě působení kůlu



Obr. 53 Výsledný graf

První část grafu (posuv do 30 mm) vykazuje síla téměř nulovou hodnotu je to zapříčiněno jednak vymezením minimální vůle mezi kůlem a prahem a také docházelo k částečnému zamačkávání (deformaci) spodní částí v místě umístění podpor.

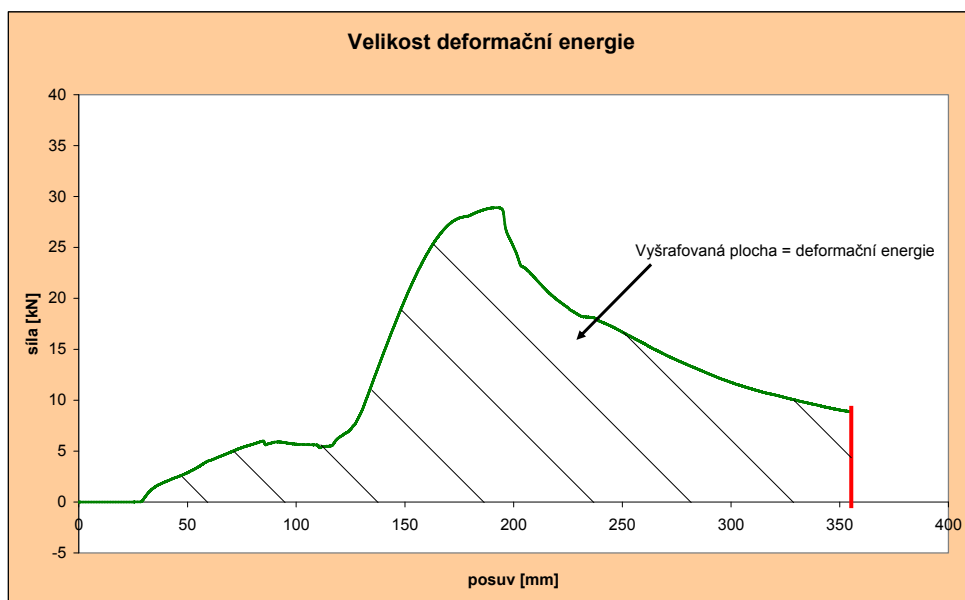
Druhá část grafu (posuv od 30 do 120 mm) docházelo k deformaci postranice, která vykazuje malou ohybovou tuhost a tudíž mírný nárůst síly. V této oblasti je patrné, že od určitého místa síla nepatrně klesá, což je zapříčiněno ztrátou stability slabého plechu postranice, k většímu poklesu nedošlo zřejmě tím, že zborcená postranice se opřela o B sloupek.

Třetí část grafu (posuv od 120 do 193 mm) kůl působí přes zborcenou postranici na B sloupek s výztuhou, dochází ke strmému nárůstu síly. Maximální sílu tento práh vykazuje při posuvu kůlu o 193 mm, její velikost činí 28,9 kN.

V další části dochází k proplastizování a zborcení celého prahu, což má za následek mírné klesání průběhu síly. V klesajícím průběhu dochází k nepatrnému nárůstu síly (posuv okolo 400 mm) to je nejspíš zapříčiněno tím, že se bortící trubka (výztuha) opřela o plech nosný.

### 3.2.4.1 Výpočet deformační energie

Po maximální hodnotu intruze při bočním nárazu na kůl (355 mm) se spočítala plocha pod křivkou, což je deformační energie (obr. 54). Její velikost je 4329 J.

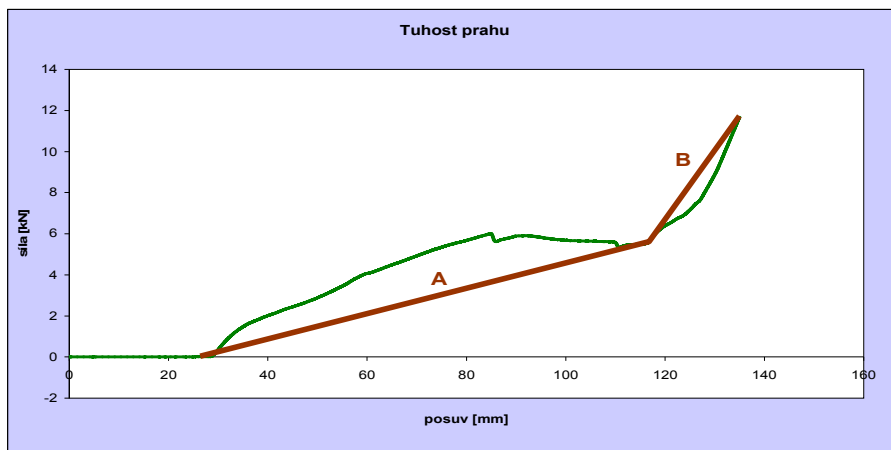


Obr. 54 Plocha znázorňující deformační energii

### 3.2.4.2 Výpočet tuhosti

Tuhost se spočítala po maximální hodnotu intruze na boční náraz (135 mm). U tohoto prahu byla rozdělena na dvě přímky (větve), které lépe vystihují (aproximují) nárůst síly u

tohoto prahu (obr. 55). Tuhost se začala počítat od místa, kdy u prahu začínala narůstat síla. Tuhost přímky A je  $64560 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ . Tuhost přímky B je  $674096 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ .

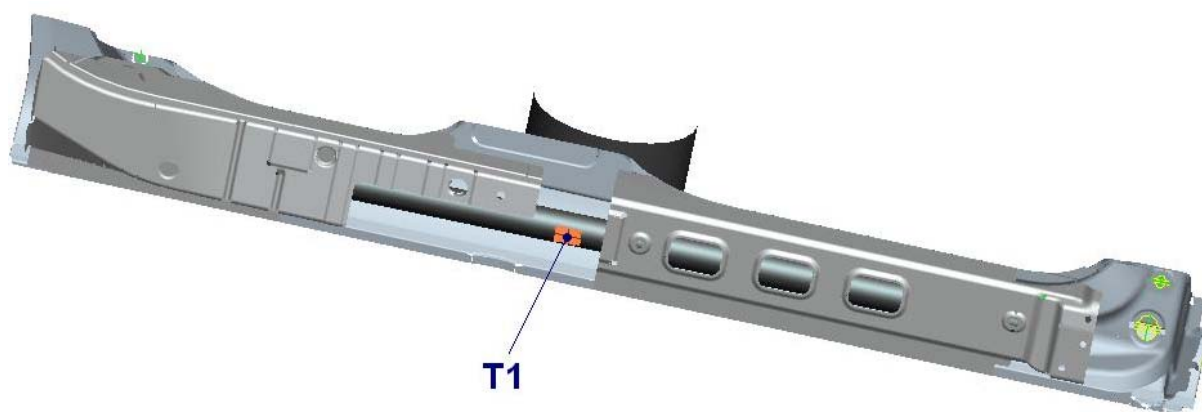


Obr. 55 Nahrazení křivky přímkami pro výpočet tuhosti

Hmotnost celkové struktury tohoto prahu je 11,6 kg.

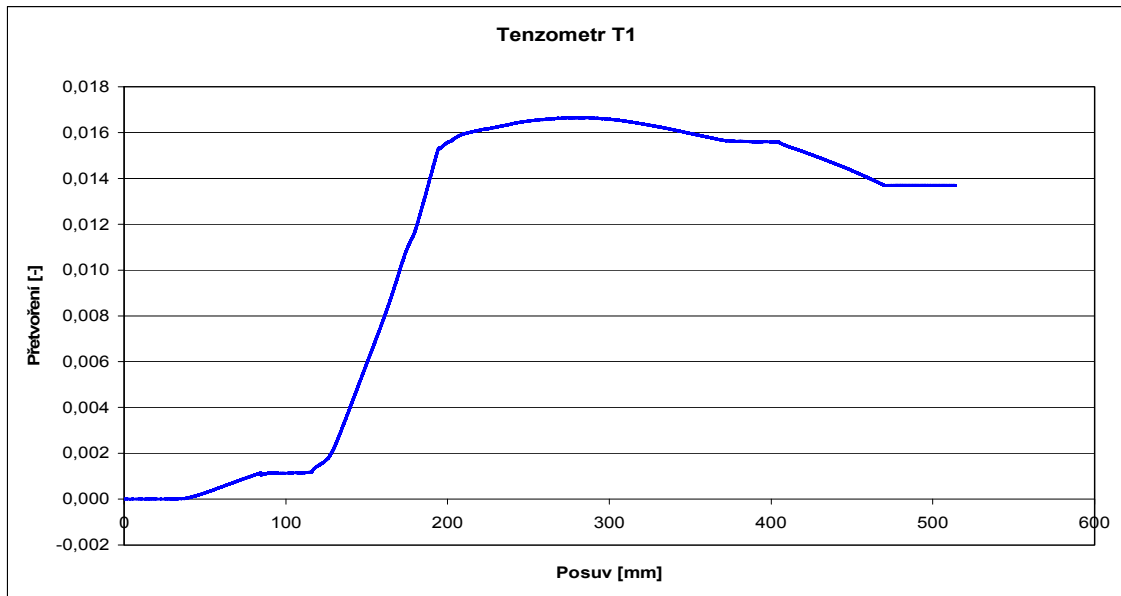
### 3.2.4.3 Tenzometr T1

Tenzometr T1 se umístil na spodní plochu výztuhy prahu (trubky) v místě působení kůlu. Místo nalepení T1 je na obr. 56.



Obr. 56 Umístění tenzometru T1



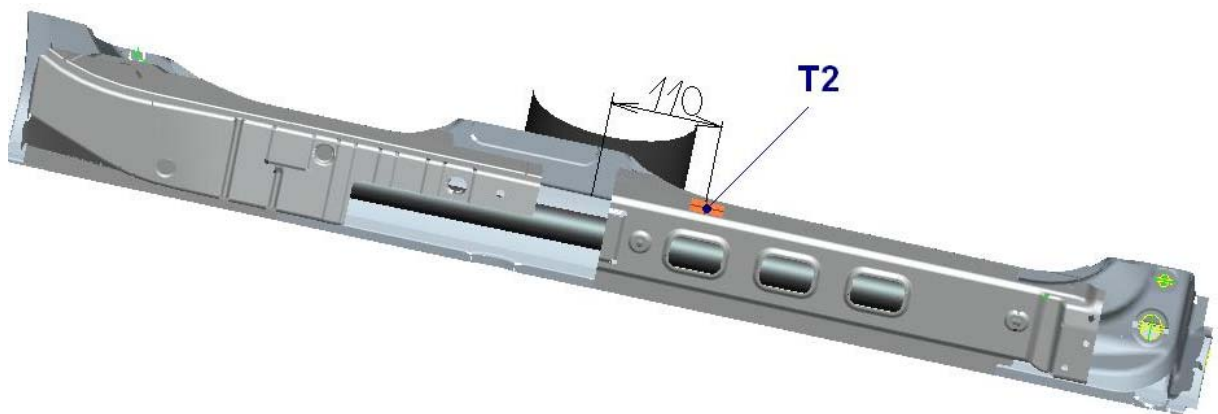


Obr. 57 Výsledný signál z tenzometru T1

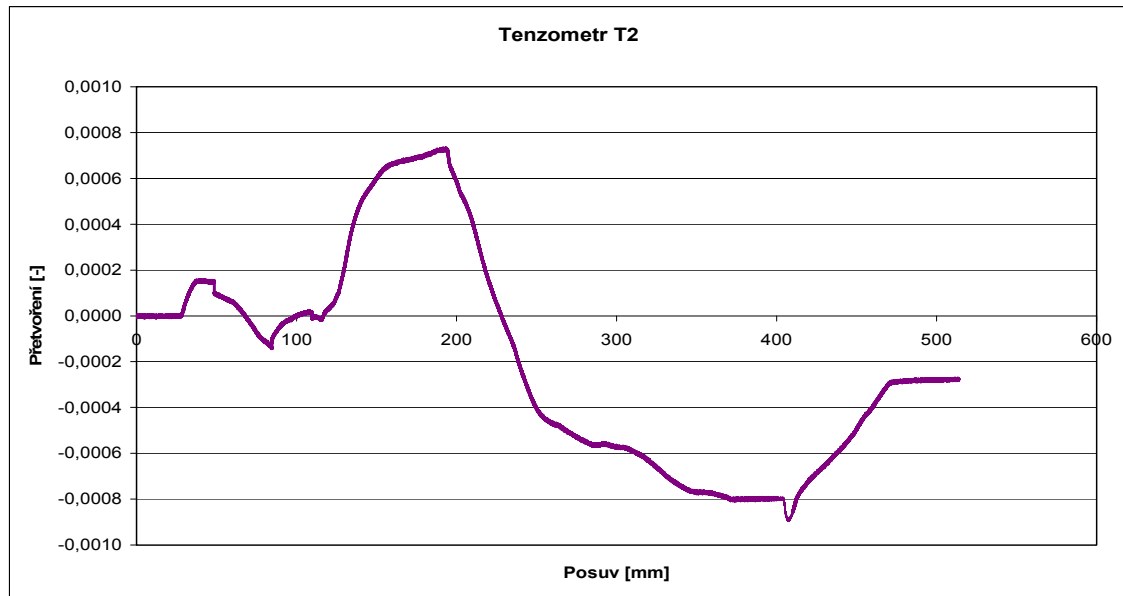
V místě nalepení tenzometru dochází k předpokládanému tahovému napětí a přetvoření. Vrchol plastického kloubu se vytvořil vedle tenzometru, proto dalším posuvem kůlu dochází ke konstantnímu přetvoření a následnému poklesu.

#### 3.2.4.4 Tenzometr T2

Tenzometr T2 se umístil na spodní plochu pásnice prahu 110 mm od působícího kůlu. Místo nalepení T2 je na obr. 58.



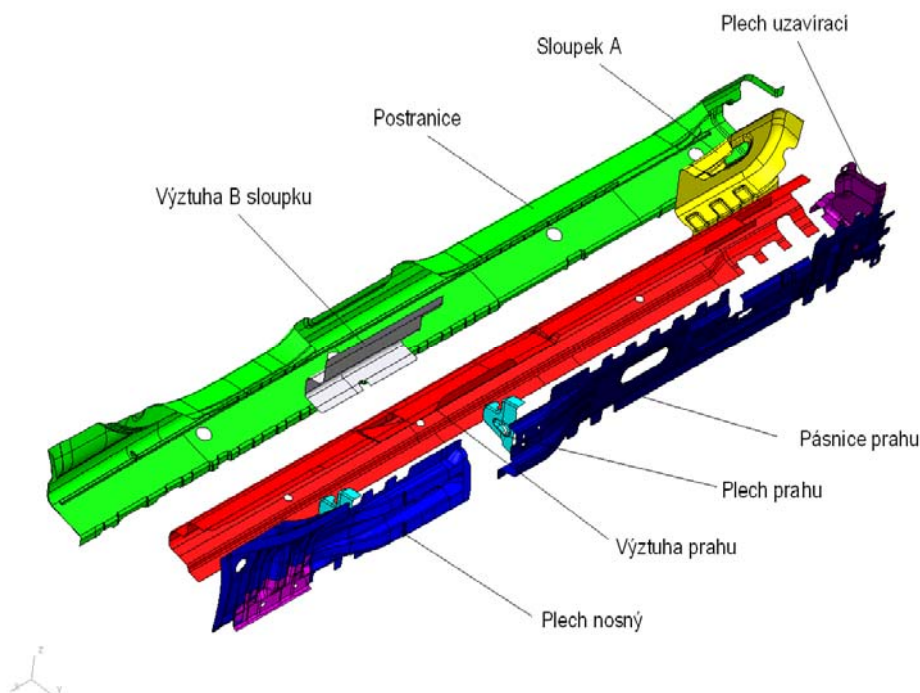
Obr. 58 Umístění tenzometru T2



Obr. 59 Výsledný signál z tenzometru T2

Na tomto tenzometru docházelo z důvodu větší vzdálenosti od působícího kúlu k nízkému přetvoření. Tenzometr je nalepený v místě, kde je pásnici bodovými svary připevněná k postranici. Tyto dva díly jsou vyrobené ze slabého plechu (tloušťka 0,75 mm), proto opět dochází ke ztrátám stability a přechodům do nových stabilních oblastí.

### 3.2.5 Struktura prahu 3

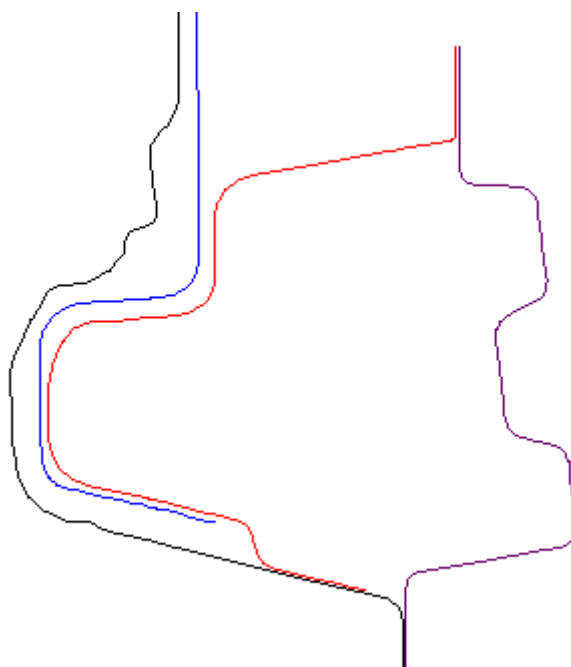


Obr. 60 Rozpad zkoušeného prahu

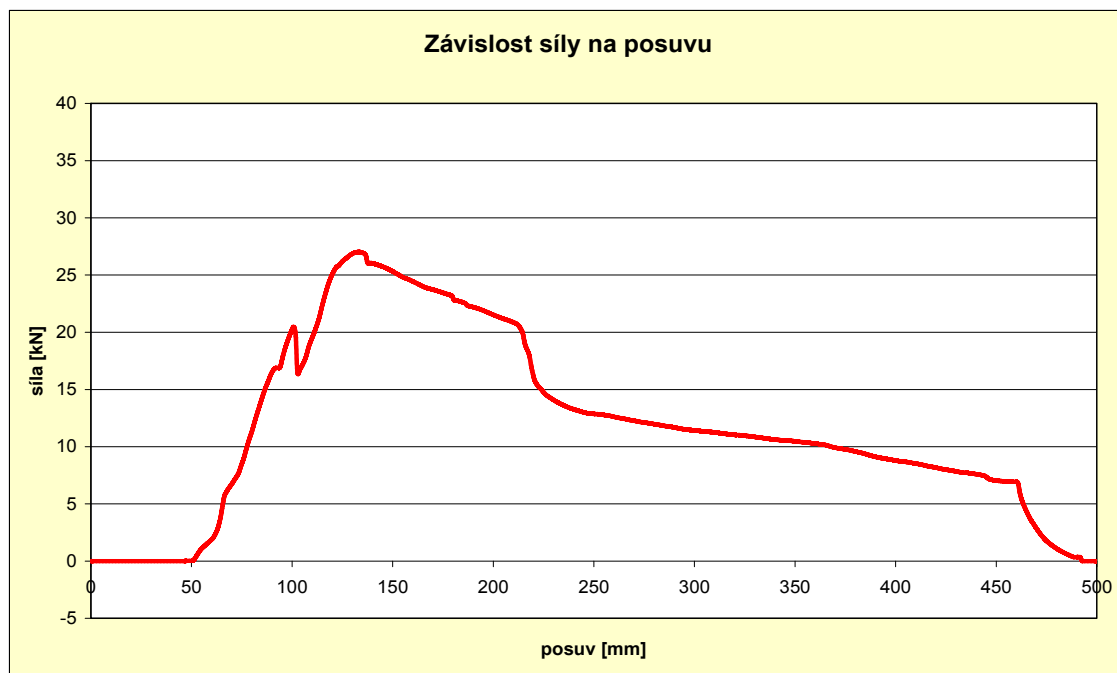
Tato struktura má tvarově složitější výztuhu, kterou ještě zpevňují plechy prahu. Pásnice uzavírá práh jen v přední části, v zadní části je plech nosný. V místě uložení B sloupku je tento práh na zadní straně otevřený. Celý práh je znázorněn na obr. 60 a 61.

Tab. 6 Materiálové vlastnosti jednotlivých dílů

Název dílu	Tloušťka plechu [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]
Výztuha prahu	2	min. 500	min. 600
Výztuha B sloupku	2	140 – 260	270 – 380
Sloupek A	1,5	140 – 260	270 – 380
Postranice	0,75	140 – 180	270 – 330
Plech nosný	1	140 – 260	270 – 380
Plech prahu	1,5	140 – 260	270 – 380
Pásnice prahu	1	140 – 260	270 – 380
Plech uzavírací	0,75	140 – 260	270 – 380



Obr. 61 Řez prahem v místě působení kúlu



Obr. 62 Výsledný graf

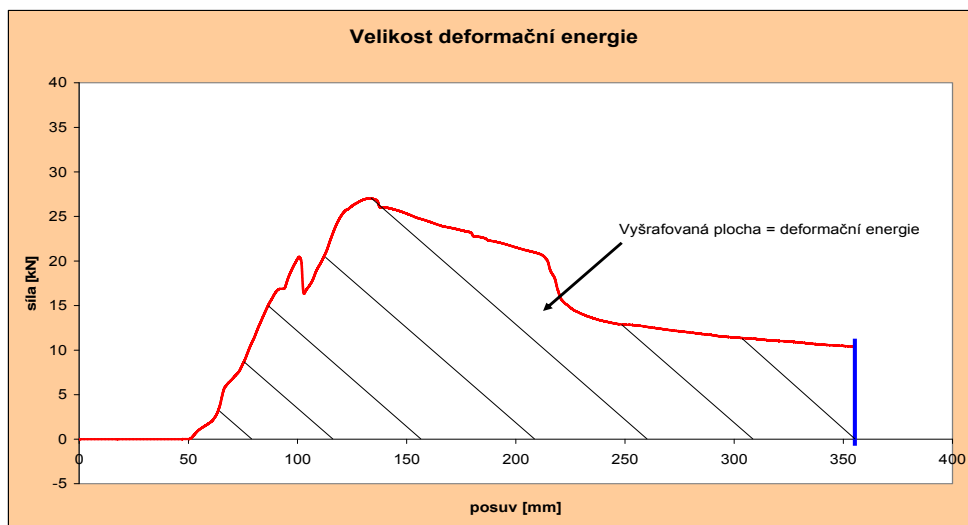
První část grafu (posuv do 50 mm) vykazuje síla téměř nulovou hodnotu je to zapříčiněno jednak vymezením minimální vůle mezi kúlem a prahem a také docházelo k zamačkávání (deformaci) spodní částí v místě umístění podpor.

Druhá část grafu (posuv od 50 do 132 mm) – dochází ke strmému nárůstu síly. Mezi postranicí, B sloupkem a výztuhou je minimální vůle, proto vykazuje práh ihned velkou tuhost. Tvarová členitost postranice a výztuhy způsobuje, že zatěžující kůl nepůsobí zpočátku celou svojí šířkou. Tento fakt způsobí pokles síly v okamžiku, kdy pod ne celou šířkou působícího kůlu ztrácí stabilitu postranice s B sloupkem a výztuhou. K opětovnému nárůstu síly dochází, když kůl dosáhne dotyku s prahem v celé své šířce. Tato struktura prahu vykazuje maximální sílu 27 kN při posuvu kůlu 132 mm.

V další části dochází k poklesům síly, ke zborcení struktury a k proplastizování celého průřezu. Nerovnoměrné klesání síly je nejspíše zapříčiněno plechem prahu a také, že se výztuha, při její velké plastické deformaci, opřela o plech nosný či pásnici. Práh se ohýbal až do okamžiku, kdy nevykazoval žádnou ohybovou tuhost.

### 3.2.5.1 Výpočet deformační energie

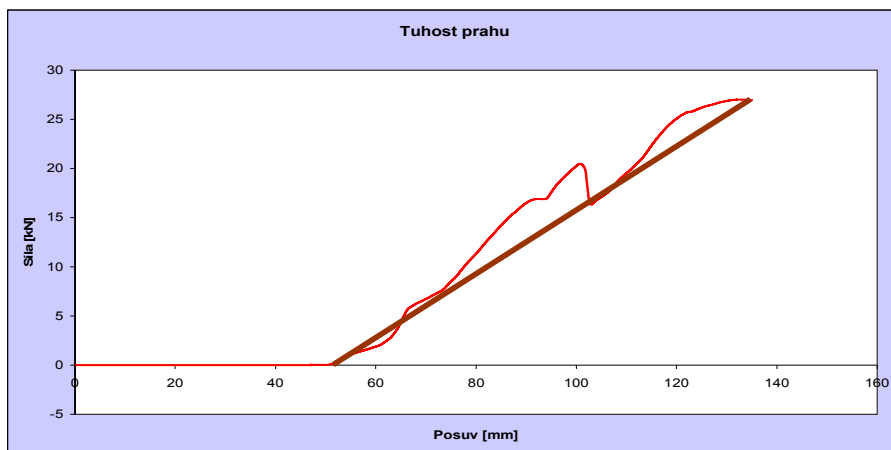
Po maximální hodnotu intruze při bočním nárazu na kůl (355 mm) se spočítala plocha pod křivkou, což je deformační energie (obr. 63). Její velikost je 2423 J.



Obr. 63 Plocha znázorňující deformační energii

### 3.2.5.2 Výpočet tuhosti

Tuhost se spočítala po maximální hodnotu intruze na boční náraz (135 mm). U tohoto prahu se průběh nahradil (aproximoval) jednou přímkou (obr. 64), která plně vystihuje nárůst síly. Tuhost se začala počítat od místa, kdy u prahu začínala narůstat síla. Velikost tuhosti je  $198657 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ .

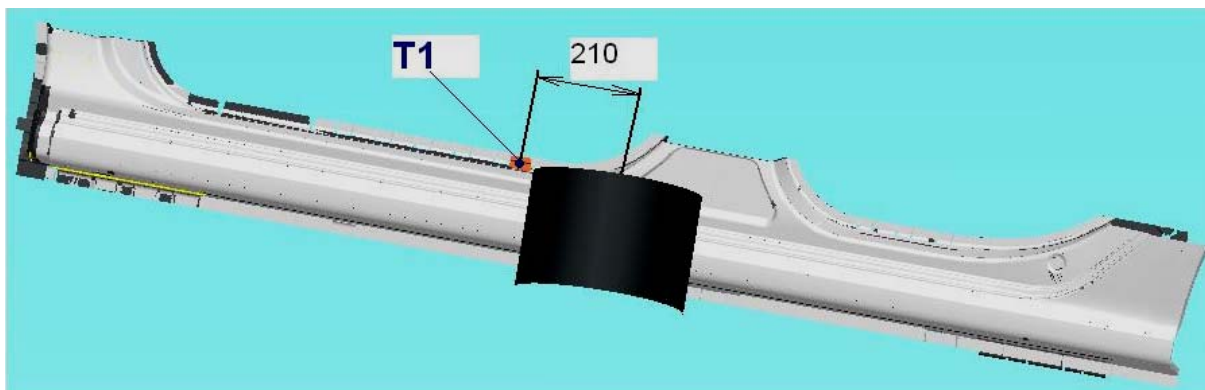


Obr. 64 Nahrazení křivky přímkou pro výpočet tuhosti

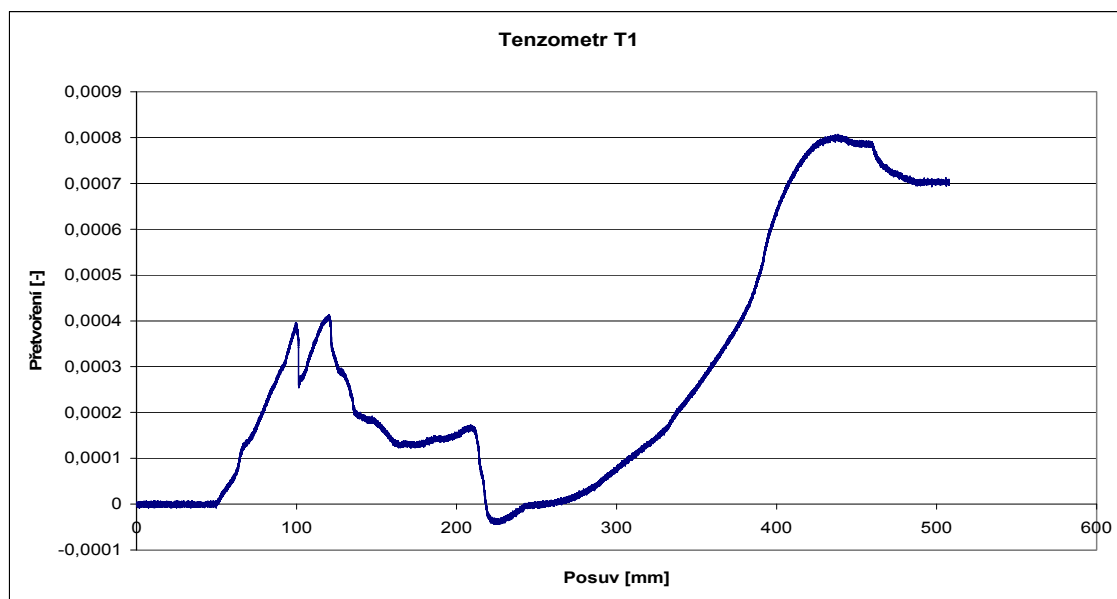
Hmotnost celkové struktury tohoto prahu je 14,1 kg.

### 3.2.5.3 Tenzometr T1

Tento tenzometr se nacházel 210 mm od působení zatěžujícího kúlu na vrchním okraji postranice. Místo nalepení T1 je na obr. 65.



Obr. 65 Umístění tenzometru T1

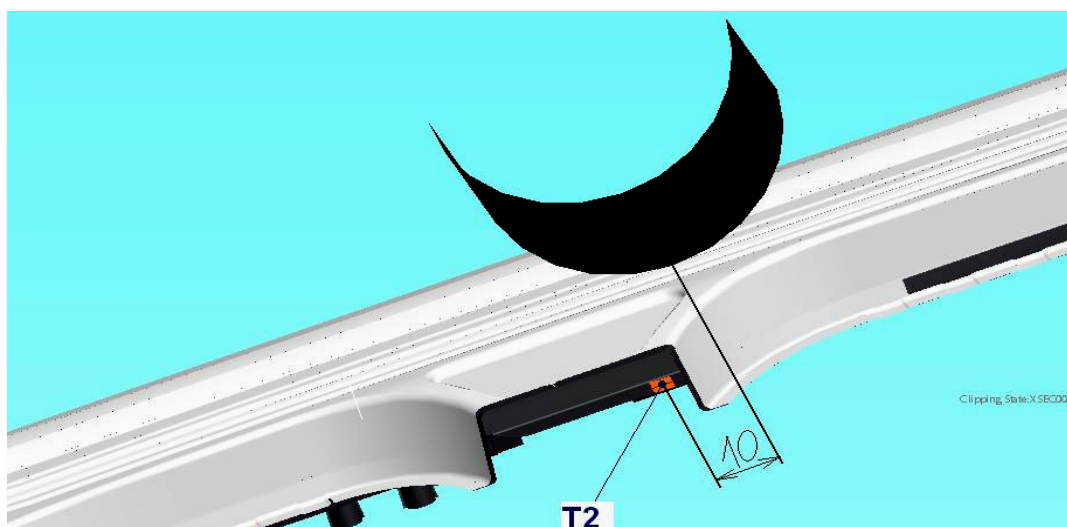


Obr. 66 Výsledný signál z tenzometru T1

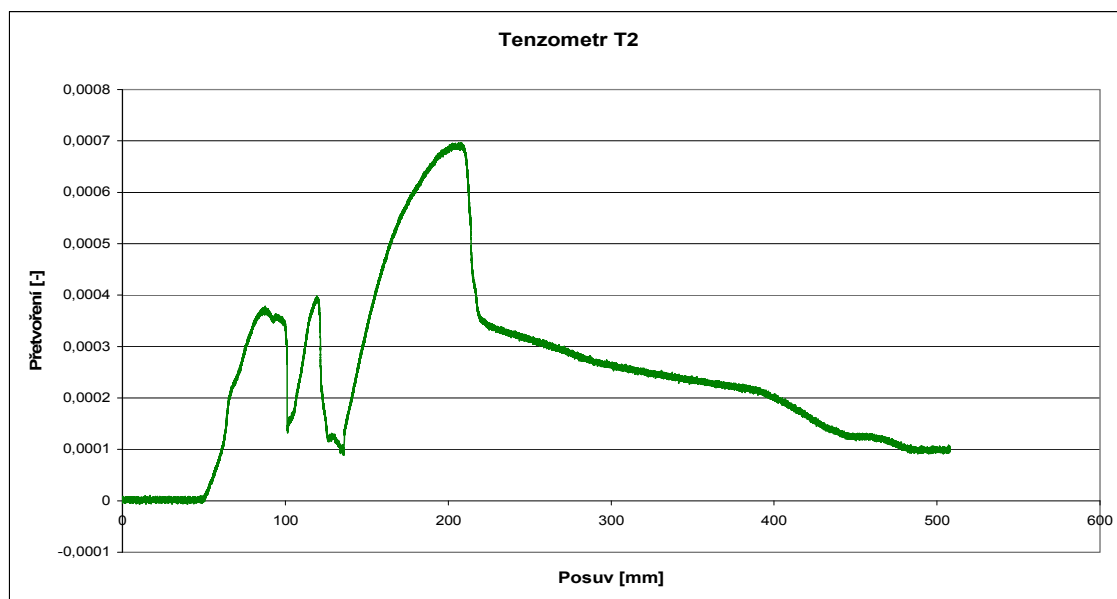
V místě nalepení tenzometru dochází zpočátku k nárůstu tahového přetvoření. Dále dochází ke ztrátě stability a po zpevnění opět k nárůstu napětí, následným posuvem kůlu dochází k poklesu do mírného tlakového napětí způsobené zborcením. Po prolomení struktury prahu dochází k natahování postranice i samotného tenzometru.

### 3.2.5.4 Tenzometr T2

Tento tenzometr se nacházel 10 mm od působení zatěžujícího kůlu, na výztuze prahu na jejím prodlouženém konci z vrchní části. Místo nalepení T2 je na obr. 67.



Obr. 67 Umístění tenzometru T2

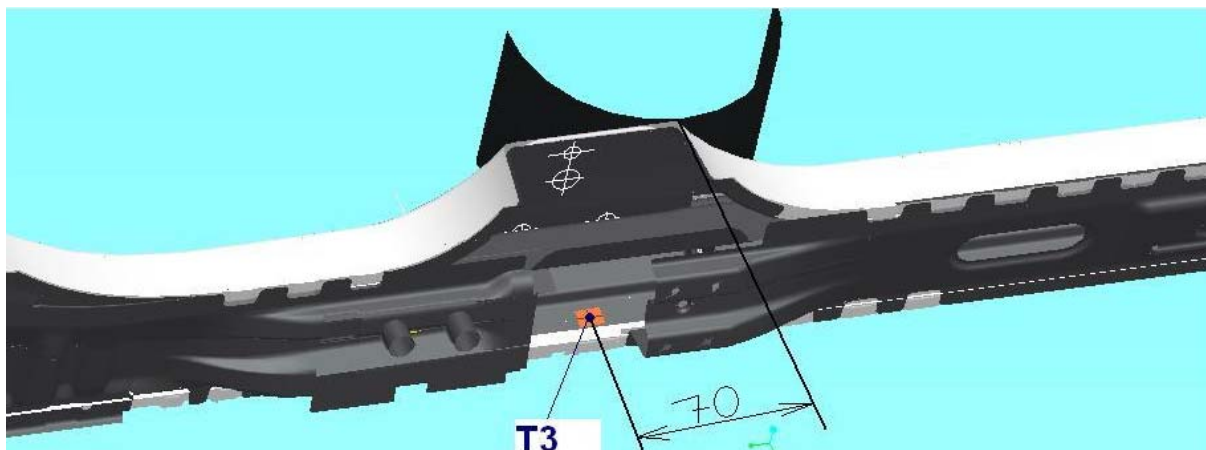


Obr. 68 Výsledný signál z tenzometru T2

Na tomto tenzometru je nejdříve nárůst nízké hodnoty tahového napětí. Následně dojde k odlehčení a k opětovnému zpevnění, tento stav se několikrát opakuje. Po prolomení prahu dochází ke zvětšování plastického kloubu a tahové přetvoření postupně klesá.

### 3.2.5.5 Tenzometr T3

Tento tenzometr se nacházel 70 mm od působení zatěžujícího kúlu na výztuze prahu, na její spodní tahové straně. Místo nalepení T3 je na obr. 69.



Obr. 69 Umístění tenzometru T3



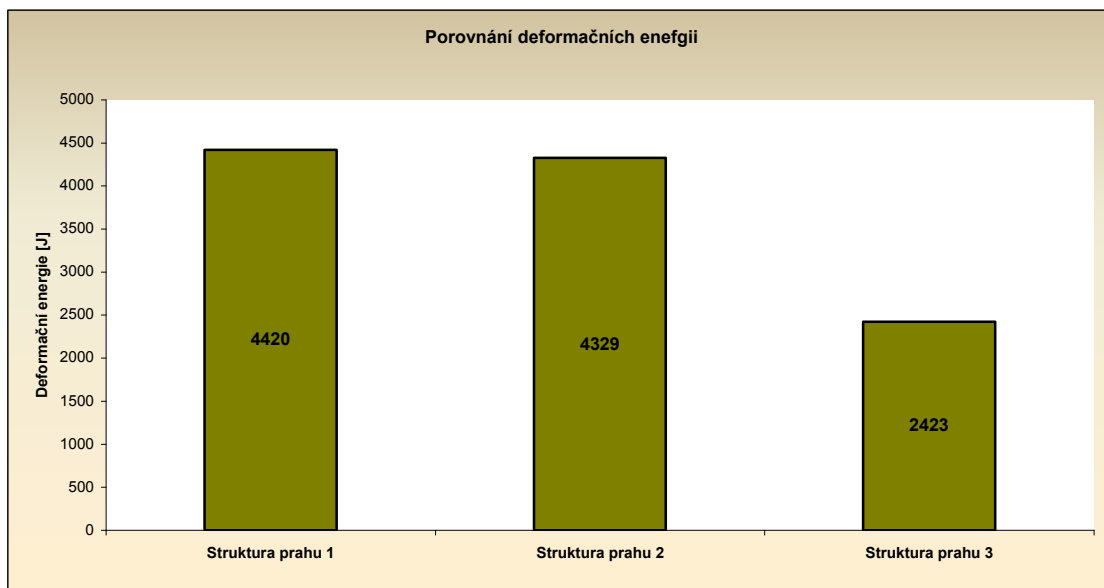


Obr. 70 Výsledný signál z tenzometru T3

V místě nalepení tenzometru docházelo v celém průběhu k tahovému přetvoření až do konstantního průběhu. Při vzniku plastického kloubu na výztuze v ose působícího kúlu došlo k natahování v místě tenzometru. Jakmile došlo ke vzniku trhliny na výztuze, dalším posuvem kúlu docházelo k jejímu šíření a od tohoto místa bylo přetvoření na tenzometru konstantní.

### 3.2.6 Porovnání výsledků

Velikosti deformačních energií jednotlivých struktur prahů jsou znázorněny v grafu 1.

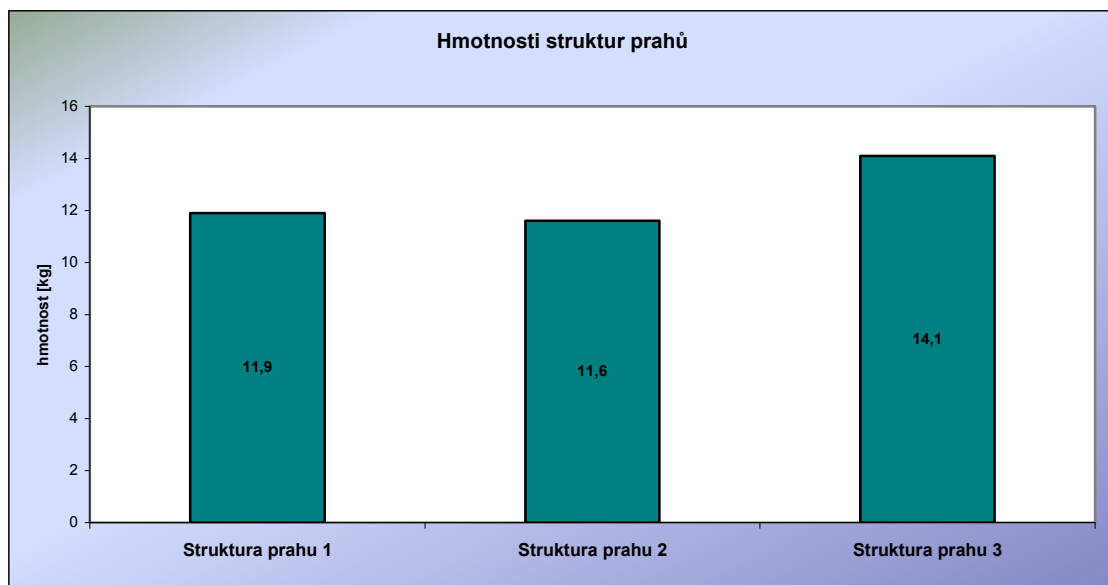


Graf 1 Porovnání deformačních energií

Struktura prahu 3 vykazuje výrazně nižší hodnotu deformační energie na působící kúl. Tato struktura je z automobilu, který se již nevyrábí a není vybaven hlavovým airbagem, tudíž není ani zkoušen na boční náraz na kúl. Proto není jeho konstrukce i materiálové uspořádání na tento náraz uzpůsobeno.

Tuhosti pro jednotlivé prahy vykazují různé hodnoty i průběhy. Struktura prahu 1 vykazuje lomenou tuhost, v první části o velikosti  $126220 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  a ve druhé  $832323 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ . Struktura prahu 2 vykazuje opět lomenou tuhost, v první části o velikosti  $64560 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  a ve druhé  $674096 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ . Struktura prahu 3 vykazuje tuhost o velikosti  $198657 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ . Nejtužším a charakteristicky nejlepším se pro dané omezení grafu maximální hodnotou intruze u bočního nárazu stala pro tento experiment struktura prahu 1.

Hmotnosti jednotlivých struktur prahů jsou znázorněny v grafu 2.



Graf 2 Porovnání hmotností struktur prahu

Největší hmotnost má struktura prahu 3. Z důvodu stálého snižování hmotnosti automobilu pro hospodárnější provoz a tím spojené snížení emisí je tento práh v porovnání s ostatními nevyhovující.

### **3.3 Diskuze**

1. Zkouška kvazistatickým tříbodovým ohybem a měření síly na posuvu při její realizaci přinesla několik parametrů pro hodnocení struktur prahu:

- Maximální sílu a při jakém posuvu kůlu se dosahuje.
- Deformační energii.
- Tuhost struktury.
- Případně vznik trhlin a lomů.

2. Dalším důležitým hodnotícím parametrem je hmotnost dané struktury, vypočtená pomocí softwarového programu pomocí objemu prahu a hustoty materiálu.

3. Jednotlivé tenzometry umístěné převážně na výztuhách jednotlivých prahů v blízkosti působení kůlu měly jen kontrolní funkci, zda nedochází v místě nalepení k neobvyklému chování struktury prahu. Nalepení tenzometrů do výhodnějších míst na výztuhách znemožňovala uzavřenost struktury postranicí na jedné straně a pásnicí prahu na straně druhé. Z důvodu zanechání celé struktury prahu se umístily tenzometry na nejvhodnější místa co nejbliže k ose působícího kůlu (maximální přetvoření) a také na místa, kde nedojde k velkému plastickému přetvoření.

4. Vzdálenost podpor pro experiment byla výhodná pro všechny tři struktury prahu, protože byly podepřeny na obou koncích výztuhy prahu (viz. zjednodušující předpoklad pro zkoušení prahu). Tento předpoklad platil hlavně u struktury prahu 2, jejíž skutečné vzdálenosti pevných míst převyšují umístění podpor u daného experimentu, ale výztuha prahu (trubka) dosahuje jen omezené délky (cca 1260 mm). V případě zkoušení na skutečnou rozteč by se musela místa prahu v kontaktu s podporami zpevnit (vyztužit), což by bylo vnější ovlivnění (zlepšení) skutečné struktury.

5. Na strukturu prahu v automobilu navazuje řada dalších dílů karoserie, mimo jiné i příčník pro upevnění sedačky. Ten se u většiny automobilů nachází v místech, kde působí kůl při bočním nárazu na sloup a výrazně zpevňuje celou strukturu prahu. Pokud tomu tak je, měl by se při zkoušení zanechat, nebo nahradit (simulovat), protože výrazně zvyšuje tuhost struktury prahu. Tato skutečnost byla v experimentu odstraněna zjednodušujícími předpoklady.

6. Při bočním nárazu deformovatelnou barierou dochází nejen k ohybu prahu, ale i ke zkřivení působením bariéry na B sloupek v jeho vrchní části nad prahem. Tento kroutící moment podstatně ovlivňuje průběh deformace. U bočního nárazu na kůl dochází téměř jen k ohybovému působení na strukturu prahu.

7. Mezi strukturou prahu 1 a strukturou prahu 2 došlo k poměrovému porovnání mezi intruzemi měřenými na prazích při crash testu na boční náraz na sloup a velikosti deformačních energií po tyto intruze v experimentu. Mezi poměry se vypočte procentuální rozdíl.

Intruze u struktury prahu 1 v crash testu je 301 mm.

Intruze u struktury prahu 2 v crash testu je 333 mm.

$$\frac{301}{333} = 0,9$$

Deformační energie v experimentu u struktury prahu 1 po velikost posuvu 301 mm je 4016 J.

Deformační energie v experimentu u struktury prahu 2 po velikost posuvu 333 mm je 4124 J.

$$\frac{4016}{4124} = 0,97$$

Procentuální rozdíl mezi skutečným crash testem (dynamická zkouška) a prováděným kvazistatickým experimentem činí 7 %.

- Mezi experimentem a crash testem není velký rozdíl.
- V experimentu došlo k redukci vzdálenosti rozteče podpor a k odlišení od skutečnosti. Při zvýšení rozteče na skutečnou hodnotu by došlo ke zvýšení procentuálního rozdílu a k menší konvergenci mezi crash testem a experimentem.
- U struktury prahu 3 vyřezaného z automobilu, který se již nevyrábí a není vybaven hlavovým airbagem se neprováděl boční náraz na kůl a tudíž není ani intruze naměřená při crash testu pro porovnávání.

### **3.3.1 Závěr diskuze**

Tato metoda je možná pro přibližné posouzení dané koncepce prahu. Rozdíl mezi navrženou kvazistatickou zkouškou a crash testem nevykazuje velký rozdíl. Pro správné a přesné porovnávání a hodnocení nových struktur prahů je zapotřebí výpočtového modelování a určování reakčních (kontaktních) sil v závislosti na posuvu pomocí metody konečných prvků. Výsledky výpočtu je možné porovnávat s tímto experimentem a porovnávat jednotlivé parametry, které se touto zkouškou získaly (tuhost apod.). Tento experiment slouží k validaci výpočtového modelu a k určení jak se zhruba chovají různé struktury prahů při bočním nárazu na kůl.

## **4. Výpočtová část**

Počítačové simulace se stále více uplatňují při návrhu zkoušek, simulaci průběhu experimentu a jejich vyhodnocení. Problémem je, že i při správném zadání vstupních dat do výpočetního modelu získáme informaci, která může, ale nemusí odpovídat realitě. Důvodem může být špatně navržený model, anizotropie reálného materiálu apod. Důležitým problémem je, že hodnoty materiálových vlastností mají přirozený rozptyl, kdežto dnešní výpočetní modely jsou deterministické.

Při počítačové simulaci jde principiálně o řešení soustav diferenciálních rovnic s okrajovými nebo počátečními podmínkami. Nejpoužívanější metodou pro numerické simulace v průmyslu je metoda konečných prvků (MKP resp. FEM – Finite Elements Method).

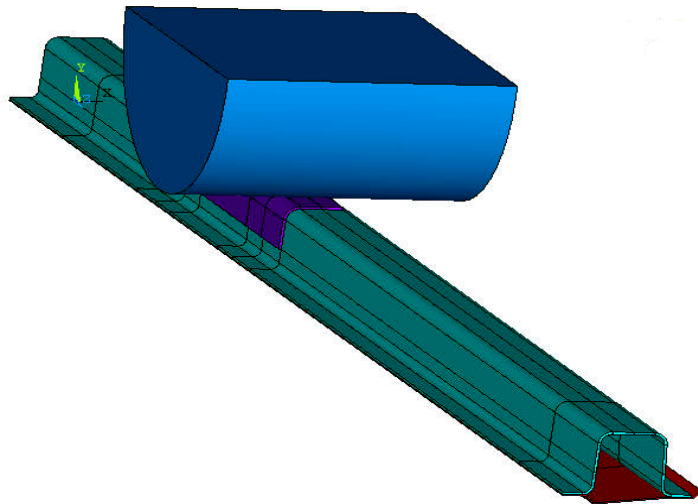
Mezi nejrozšířenější systémy pro MKP výpočty patří NASTRAN, MARC, ABAQUS, ANSYS aj. Liší se především v uživatelském rozhraní, metodě řešení, schopností řešit lineární a nelineární úlohy, možnosti paralelizace úlohy, počtem elementů apod.

Z hlediska správného řešení úlohy je nejdůležitější správně navržený model materiálu i tělesa a optimálně hustá síť prvků [14].

Velkou pozornost je třeba věnovat případům, kdy dochází ke geometrické nebo materiálové nelinearitě. Geometrická nelinearita je zapříčiněna velkými posuvy (large displacement), které mohou být doprovázeny velkým přetvořením (large strain). Materiálové nelinearity jsou nelineární závislosti mezi přetvořením a napětím.

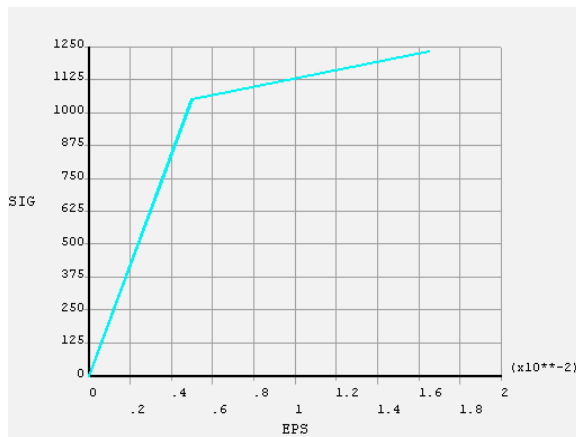
## 4.1 FEM simulace experimentu

K výpočtovému modelování bylo použito prostředí ANSYS 11.0. Ze struktury prahu 1 se zjednodušeně namodelovala výztuha, část B sloupku, pásnice prahu a zatěžující kůl. Na krajích, kde se v experimentu nacházely podpory se definovalo uložení a na kůl, který působil ve stejném místě a byl i o totožném průměru jako v experimentu, se definovalo velké posunutí. Tímto kůlem se ohýbalo torzo prahu. Tloušťky plechů jednotlivých částí odpovídaly skutečnému prahu tj. tloušťka výztuhy a B sloupku činila 2 mm, tloušťka pásnice je 1 mm.

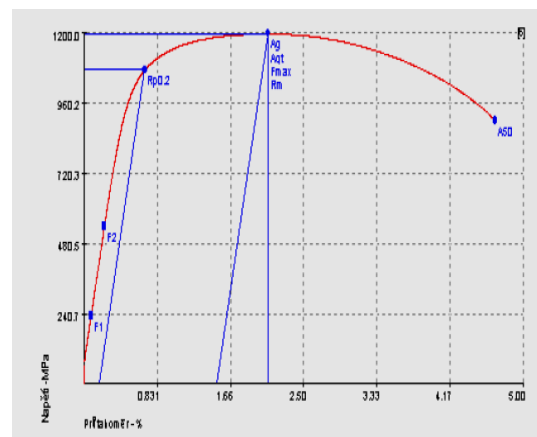


Obr. 71 Výpočtový model

Pro jednotlivé díly se použily zjednodušené nelineární (bilineární) modely materiálových charakteristik, které do meze kluzu měly směrnici o modulu pružnosti  $E = 2 \cdot 10^5$  MPa a dále vykazovaly určitou hodnotu zpevnění v plastické oblasti.

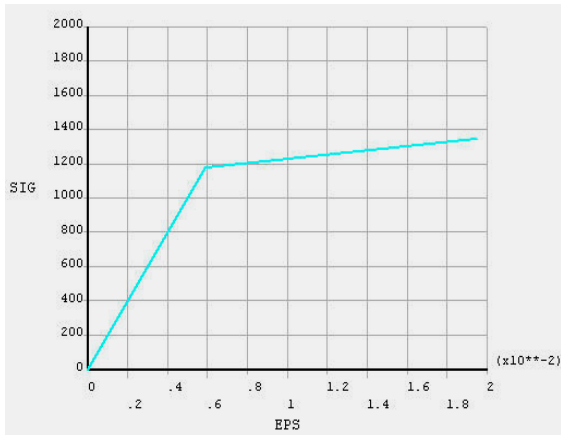


Obr. 72 Materiálová charakteristika výztuhy pro výpočet

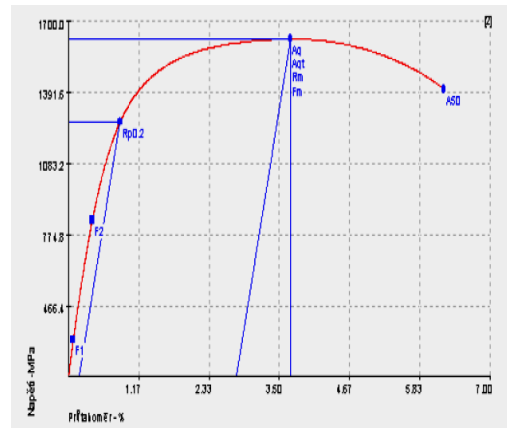


Obr. 73 Skutečný diagram materiálu při zkoušce v tahu [15]

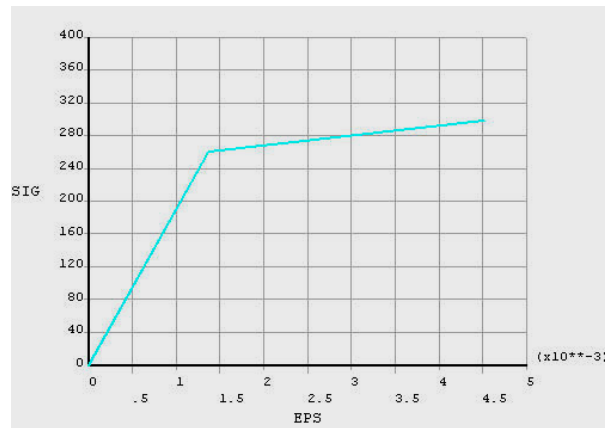




Obr. 74 Materiálová charakteristika  
B sloupku pro výpočet

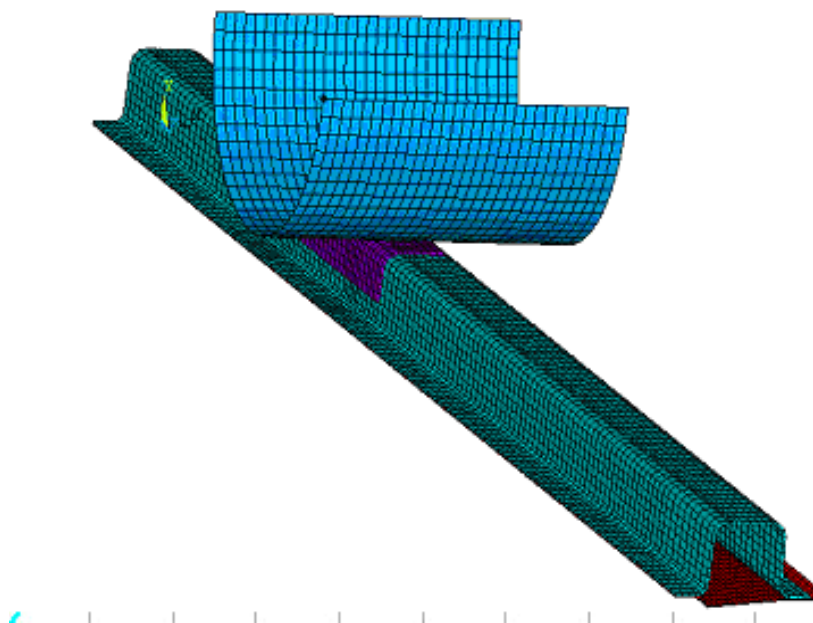


Obr. 75 Skutečný diagram materiálu při  
zkoušce v tahu [15]



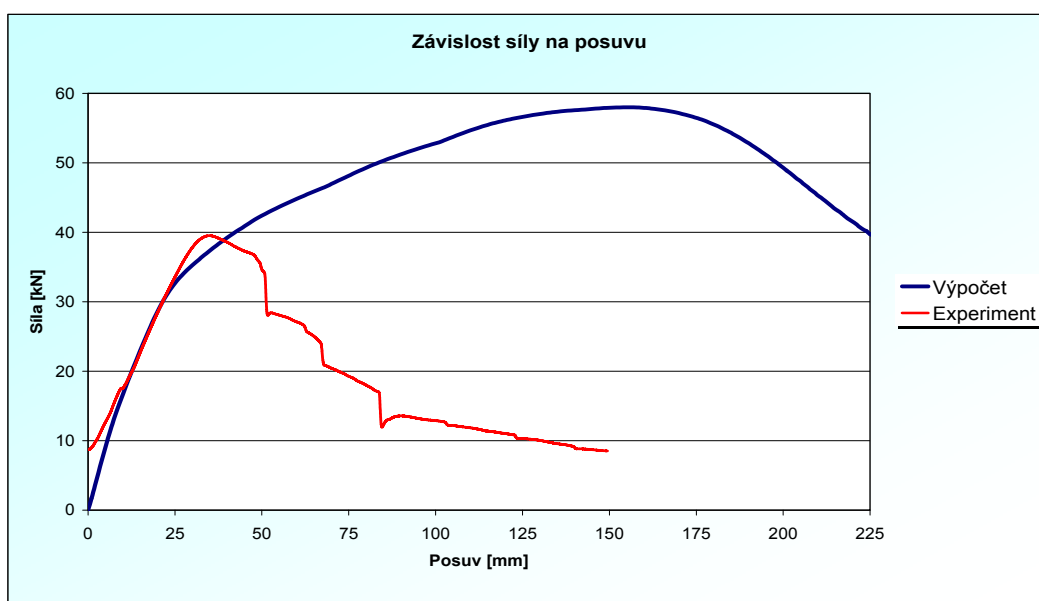
Obr. 76 Materiálová charakteristika pásnice prahu pro výpočet

Dále došlo ke tvorbě sítě (meshing), byly použity objemové prvky typu Plane185, Solid185, Targe170 a na kontaktní místo mezi kulem a B sloupkem prvky Conta174. Z důvodu omezené školní licence programu ANSYS 11.0 se mohlo použít jen maximální počet 32000 prvků a tím se dosáhlo jen hrubší sítě, která nevystihuje ideální stav tj. experiment. Také nedošlo k modelování spojů (bodových svarů atd.), tím se sestava pevnostně chová jako celek.



Obr. 77 Diskretizace výpočtového modelu

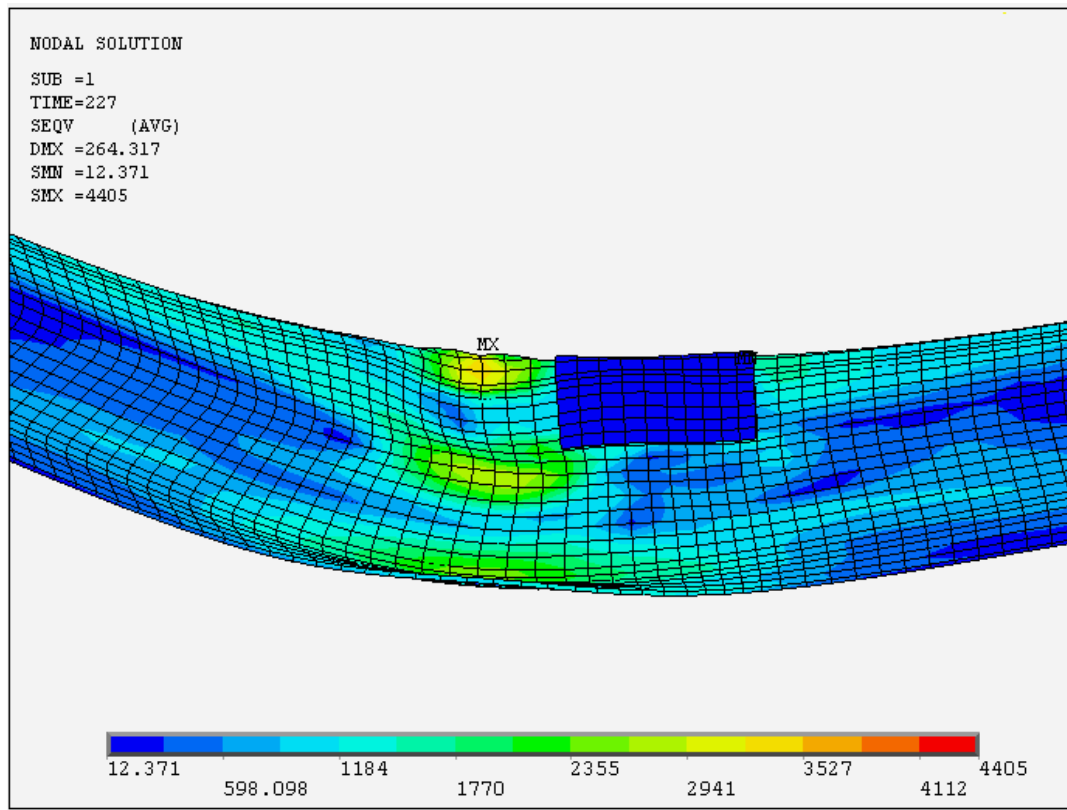
Byl definován posuv o 225 mm a pro něj se spočetly reakční síly v ose y. Závislost a porovnání s experimentem je znázorněno v grafu 3.



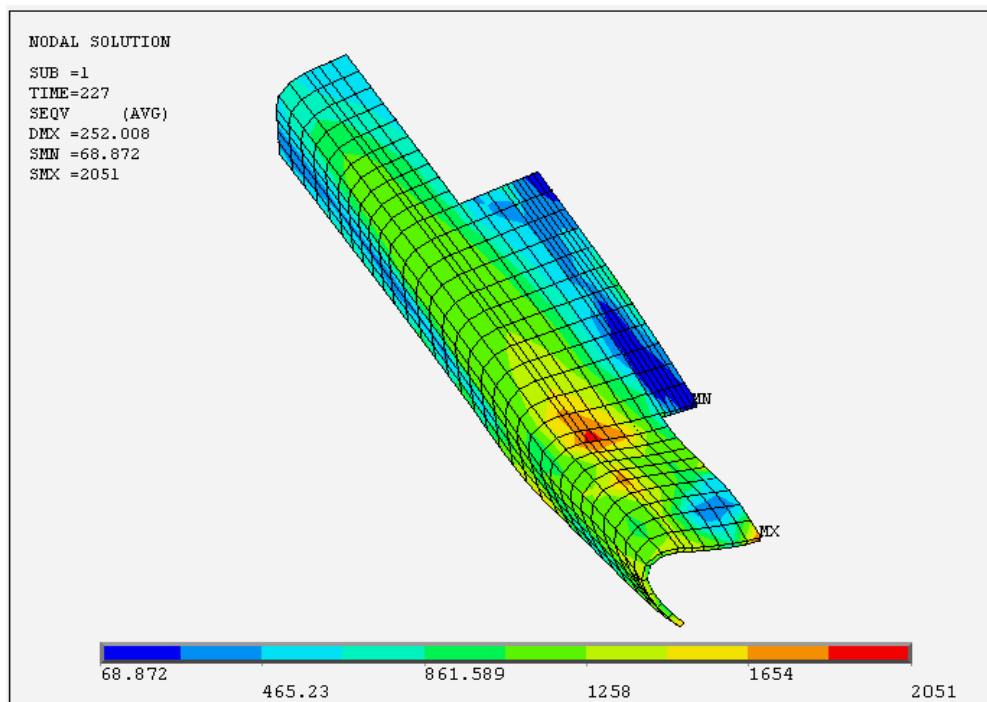
Graf 3 Výpočtová závislost síly na posuvu

V grafu je zobrazena závislost síly na posuvu výpočtově (modrá křivka) a z experimentu (viz. obr. 39), která nezahrnuje deformaci postranice tzn. posuv začíná až deformací výztuhy (od posuvu kůlu 110 mm v experimentu dle kapitoly 3.2.3). V lineární (elastické) oblasti se výpočet s experimentem téměř shodují. Rozdíly jsou dány zjednodušujícími modely materiálových charakteristik. Další průběhy se liší z důvodu praskání svarů, výztuhy a pásnice v experimentu a tím jeho závislostní křivka klesá. Ve výpočtové závislosti zanedbáním bodových svarů dochází k nárůstu a chování výpočtového modelu podle materiálových charakteristik a dále dochází k plastické deformaci a k poklesu síly.

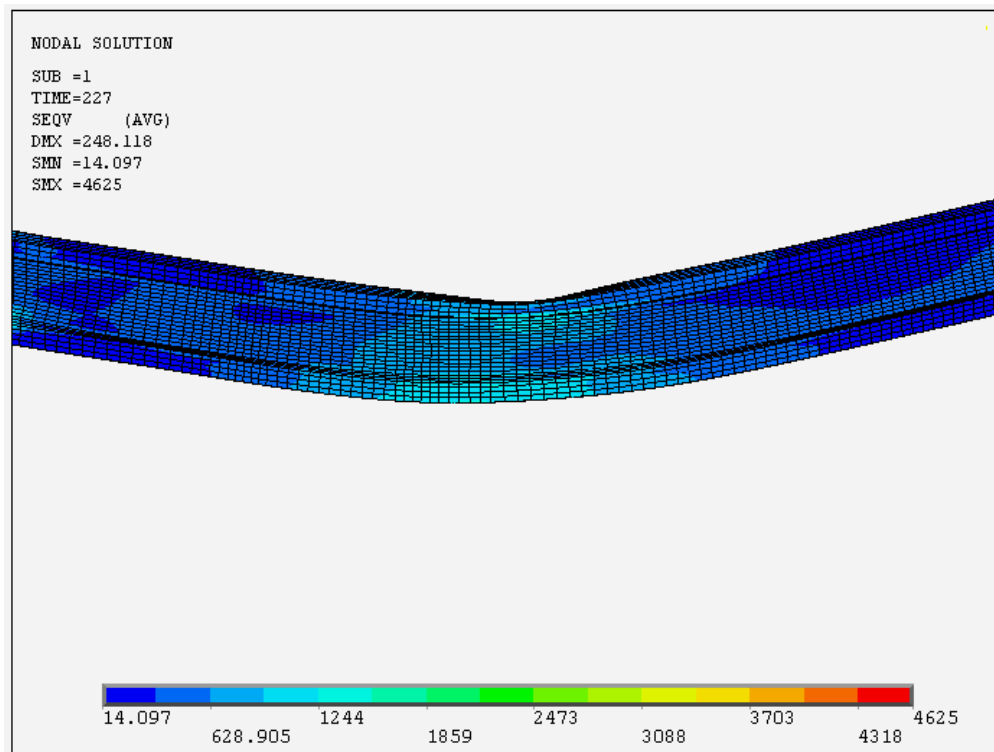
## 4.2 Výsledky simulace



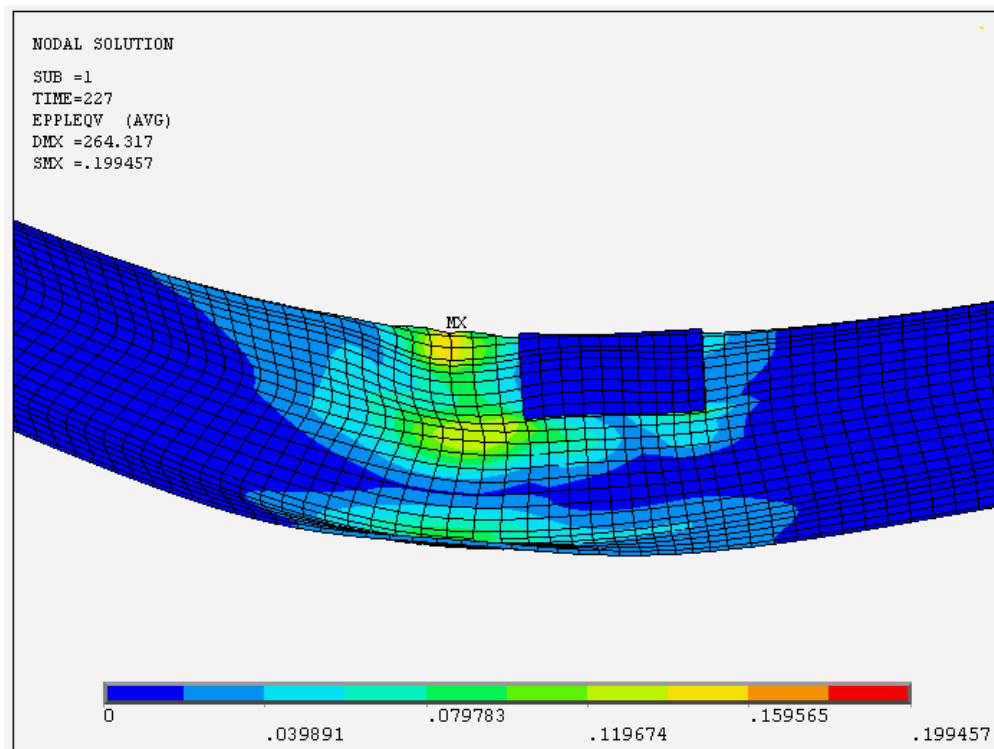
Obr. 78 Von Misesovo napětí ve výztuze prahu a její deformace



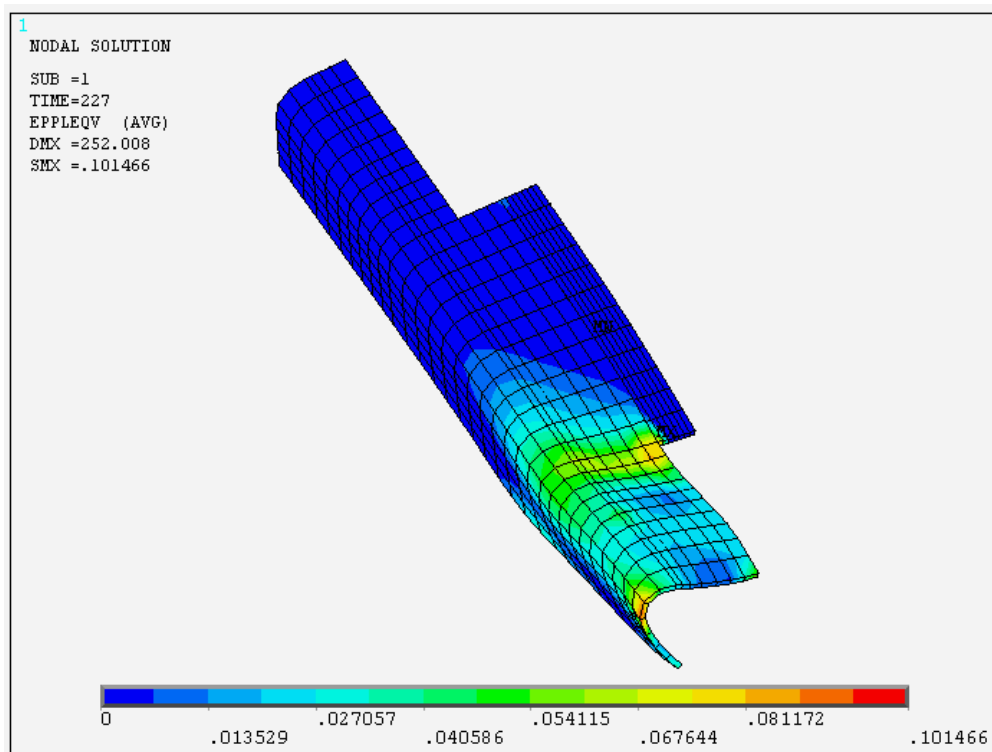
Obr. 79 Von Misesovo napětí v B sloupku a jeho deformace



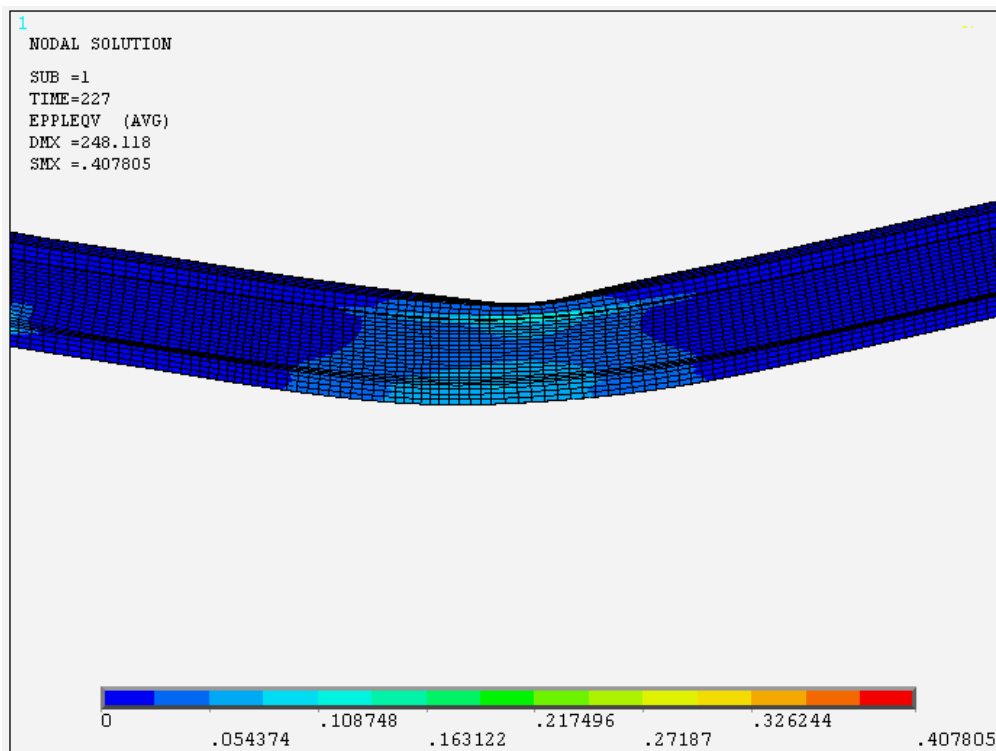
Obr. 80 Von Misesovo napětí v pásnici prahu a její deformace



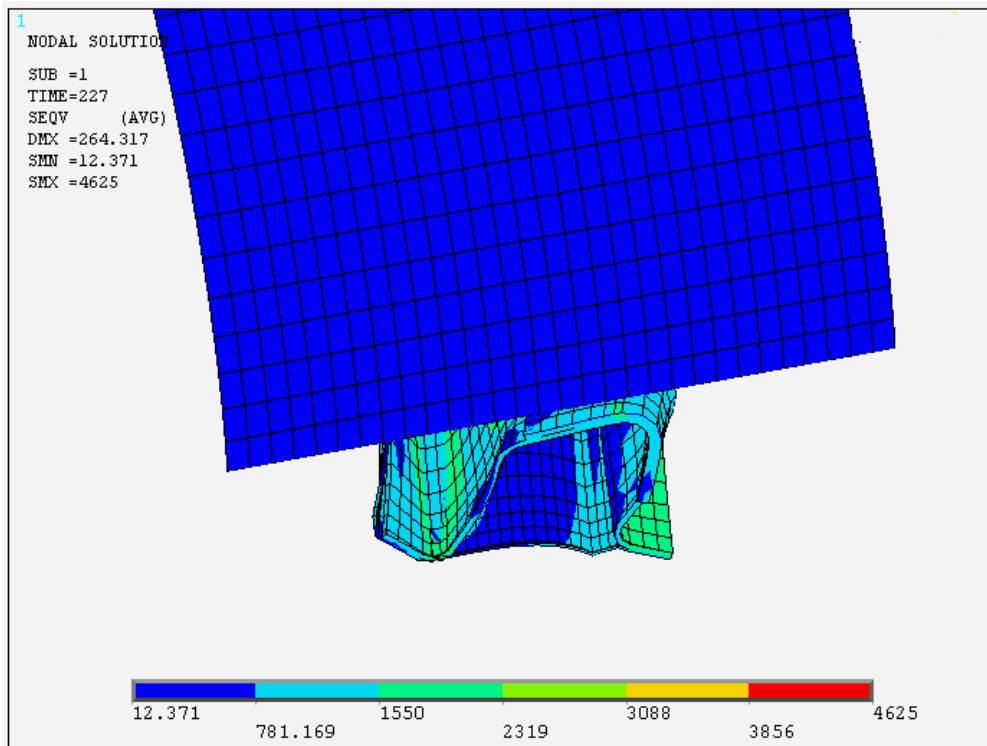
Obr. 81 Plastické přetvoření výztuhy prahu a její deformace



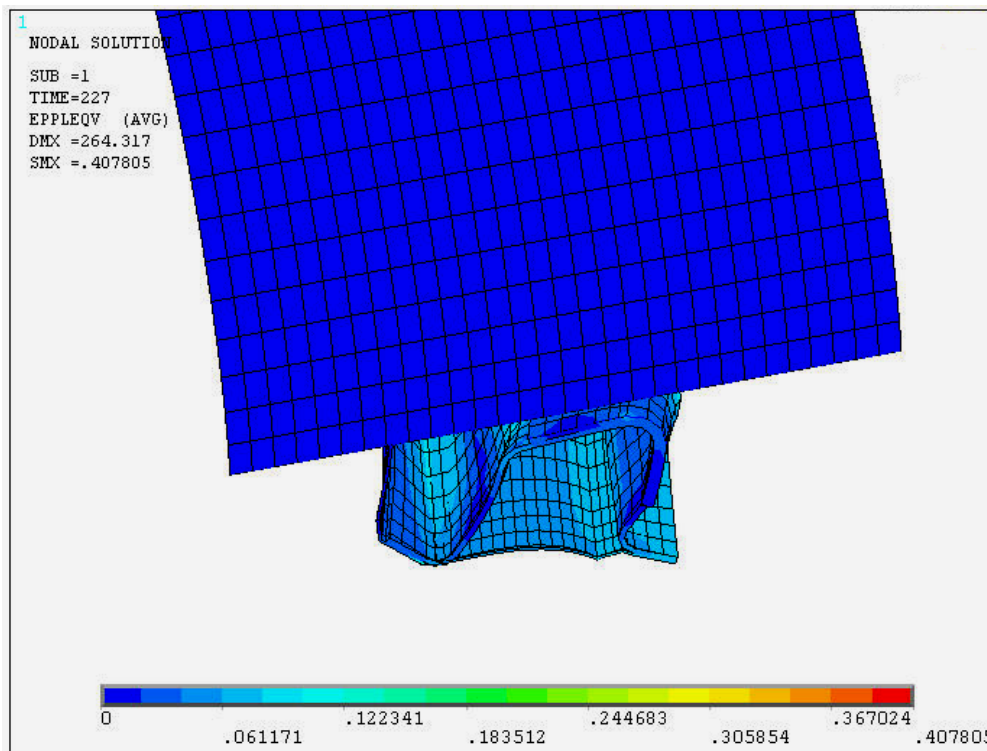
Obr. 82 Plastické přetvoření B sloupku a jeho deformace



Obr. 83 Plastické přetvoření pásnice prahu a její deformace



Obr. 84 Von Misesovo napětí v místě působení kůlu



Obr. 85 Plastické přetvoření v místě působení kůlu

## **5. Závěr**

Tato diplomová práce je věnována návrhu metodiky zkoušení samostatných struktur prahů ve firmě Škoda Auto a. s., která byla zadavatelem této problematiky a na základě diplomové praxe byla práce realizována.

Teoretická část práce je zaměřena na charakteristické vlastnosti struktury karoserie, pasivní bezpečnost, program EuroNCAP z hlediska bočního nárazu a bočního nárazu na kůl a strukturu prahů osobních vozidel. Další částí této práce je kapitola věnována teoretickým základům pro experiment. Jsou zde ve stručnosti popsány teoretické oblasti, které sloužily k přípravě, uskutečnění a vyhodnocení experimentu. Teoretická část také obsahuje přípravu prahů pro experiment a jejich získání vyřezáním z automobilů.

V praktické části práce bylo provedeno navržení experimentu kvazistatickým tříbodovým ohybem, stanovení zjednodušujících předpokladů a určení rozdílu mezi experimentem a skutečností. Také bylo popsáno zkušební zařízení, na kterém se experiment uskutečnil. Zkoušeny byly tři různé struktury prahů používaných u vozidel značky Škoda, o kterých se měřil průběh síly na posuvu a pomocí tenzometrů také průběh přetvoření na posuvu. Z průběhů sil na posuvu se spočetly deformační energie a také tuhosti. Dalším parametrem byla hmotnost jednotlivých prahů.

Jednotlivé struktury prahů jsou podrobně konstrukčně rozebrány řezy, názornými rozpady a základními materiálovými vlastnostmi jednotlivých dílů.

Interpretace naměřených a spočtených výsledků je v porovnávání mezi jednotlivými strukturami prahů, které ukazují na použitelnost daného prahu.

Diskuze obsahuje shrnutí této metody, doplnění opomenutých věcí, které by se měly v experimentu využít, aby to více vystihovalo skutečnost. Také hodnotí použitelnost a srovnání experimentu se skutečným bočním nárazem na kůl při crash testu.

Ve výpočtové části byla provedena zjednodušená analýza napětí a plastického přetvoření torza jednoho prahu pomocí metody konečných prvků



## **Seznam příloh**

- Příloha č. 1:**        Struktura prahu 1 před zkouškou
- Příloha č. 2:**        Struktura prahu 1 po zkoušce
- Příloha č. 3:**        Struktura prahu 2 před zkouškou
- Příloha č. 4:**        Struktura prahu 2 po zkoušce
- Příloha č. 5:**        Struktura prahu 3 před zkouškou
- Příloha č.6:**        Struktura prahu 3 po zkoušce

## Použitá literatura

- [1] VLK, František. *Karosérie motorových vozidel*. Brno: Vlk, 2000. 243 s. ISBN: 80-238-5277-9
- [2] KOVANDA, Jan; TOBOLÁŘ, Jakub; KOTYK, Jan. *Karosérie – počítačové zpracování*. Praha: ČVUT, 1997. 99 s. ISBN: 80-01-01662-5
- [3] PLÁNIČKA, František; KULIŠ, Zdeněk. *Základy teorie plasticity*. Praha: ČVUT, 2004. 142 s. ISBN 80-01-02876-3
- [4] Automotive Circle International Conference; *EuroCarBody 2006*. Frankfurt, Germany, říjen 2006.
- [5] Materiály fy Škoda auto a. s.
- [6] MIČUNEK, Tomáš. *Ponehodová opatření v pasivní bezpečnosti, vyprošťování osob z havarovaných vozidel*. Diplomová práce, Praha: ČVUT – Fakulta Dopravní, 2003.
- [7] ŠERTLER, Hynek; TOMICA, Vladimír; VIČAN, Josef. *Kovové konstrukcie*. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, srpen 1994. 249 s. ISBN: 80-7100-176-7
- [8] HORÁK, Z.; KRUPKA, F.; ŠINDELÁŘ, V. *Technická fyzika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960. 1435 s.
- [9] Stránky firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Dostupné na WWW: <<http://www.hbm.cz>>, [12. 3. 2008].
- [10] FELCMAN, Jiří. *Numerická matematika*. UK, Praha: KNM Press, 2005.
- [11] Zkouška ohybem. Dostupné na WWW. <<http://www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaeto/uloha9.doc>>, [5.3. 2008].
- [12] Stránky o crash testech a Euro NCAP. Dostupné na WWW. <<http://www.auto.cz/?r=clanky&q=EuroNCAP>>, [1.3. 2008].
- [13] PETRUŠKA, J.; BURŠA, J. *Nelineární úlohy mechaniky v MKP*. Studijní opora, Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné na WWW. <[http://www.umt.fme.vutbr.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=46&Itemid=37](http://www.umt.fme.vutbr.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=46&Itemid=37)>.
- [14] MUŠÁLEK, Radek. *Studium vybraných materiálových charakteristik vysokopevnostních plechů pro automobilový průmysl*. Diplomová práce, Praha: ČVUT – Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2006.

- [15] SLÁMOVÁ, Monika. *Vysokopevnostní materiály v konstrukci osobního automobilu*. Diplomová práce, Liberec: Technická univerzita – Fakulta strojní. 2005.
- [16] Program hodnocení nových evropských automobilů (EuroNCAP). Dostupné na WWW. < [www.euroncap.com](http://www.euroncap.com) >.
- [17] LIŠKA, Radek. *Historie a vývoj EuroNCAP – školící prezentace*. 2006.
- [18] Automotive Circle International Conference; *EuroCarBody 2007*. Frankfurt, Germany, říjen 2007.
- [19] 3D digitalizace a měření. Dostupné na WWW.  
<[http://www.mcae.cz/TRITOP\\_Deformation\\_CS.html](http://www.mcae.cz/TRITOP_Deformation_CS.html)>

# PŘÍLOHY

## Příloha č. 1





## Příloha č. 2



### Příloha č. 3



## Příloha č. 4







## Příloha č. 5



## Příloha č. 6



