CHOVÁNÍ KOMPOZITŮ PŘI RÁZOVÉM ZATÍŽENÍ

úterý 13.11.2018 Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v. v. i., Prosecká 809/76, 190 00 Praha 9

KOMPOZITOVÉ ABSORBÉRY PRO POHLCOVÁNÍ ENERGIE NÁRAZU VOZIDEL

Milan Růžička,

N. Schmidová, T. Zámečníková, M. Vašíček, V. Kulíšek, S. Bogomolov, V. Sháněl

ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Petr Pavlata, VISION CONSULTING AUTOMOTIVE s.r.o.

Obsah přednášky

1 Úvod, problematika absorbérů nárazu

2 Aplikace absorbérů energie v dopravních oborech

3 Výzkum a vývoj absorbérů na FS ČVUT v Praze

4 Deformační prvky s proměnnou tuhostí

5 Numerické simulace nárazových dějů

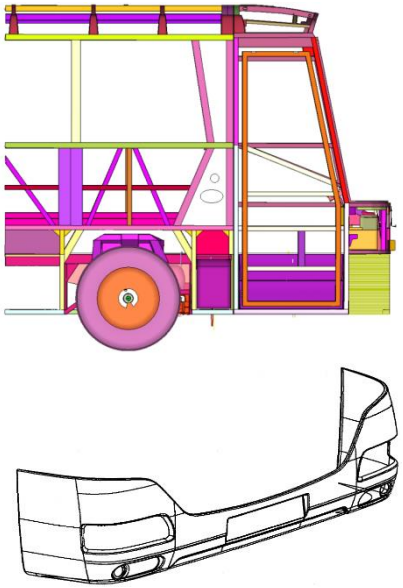
Statistiky silničních a leteckých nehod

Silniční nehody

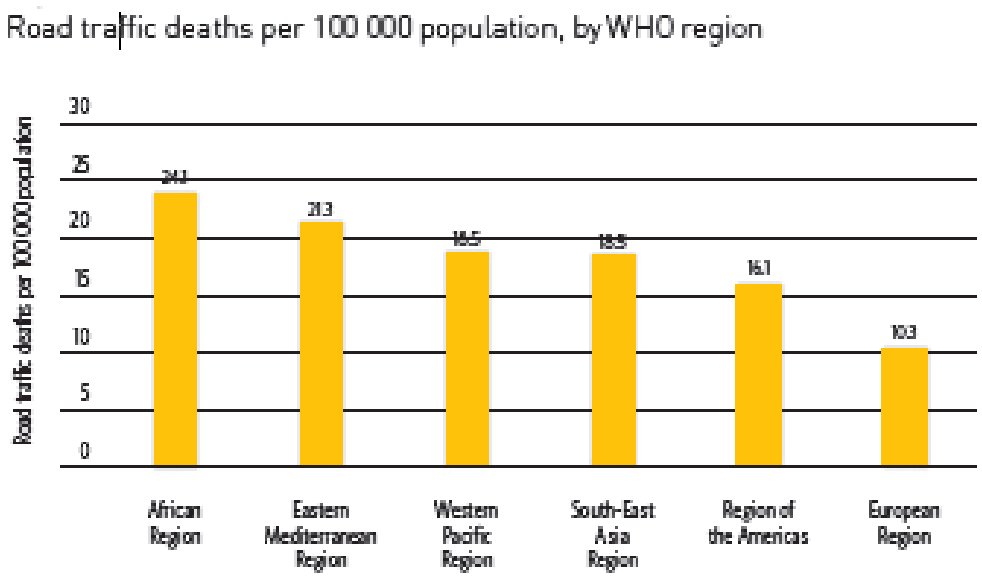
- Přibližně 1,3 millionů lidí zahyne každý rok při silničních dopravních nehodách, tj. průměrně 3 300 lidí denně
- Dalších cca 20-50 millionů je zraněných
- Silniční nehody jsou na 9. místě příčin lidských úmrtí a tvoří tak 2.2% příčin smrti
- Každý rok umírá na silnicích přibližně 400 tis. Mladých lidí ve věku do 25 let, tj. více než 1000 denně.
- Z toho 90% nehod se stane v rozvojových zemích, kde se pohybuje méně než polovina na světě jezdících vozidel
- Nehody stojí bezmála 518 miliard USD $, tj. až 1-2% HDP takových zemí GDP.

Source: http://asirt.org/Initiatives/Informing-Road-Users/Road-Safety-Facts/Road-Crash-Statistics

WHO, ed. (2013). "Global Status Report on Road Safety 2013: supporting a decade of action" (PDF) (official report). Geneva, Switzerland: World Health Organisation (WHO). pp. vii, 1–8, 53ff (countries), 244–251 (table A2), 296–303 (table A10). ISBN 978 92 4 156456 4. Retrieved 2014-05-30. Tables A2 & A10, data from 2010



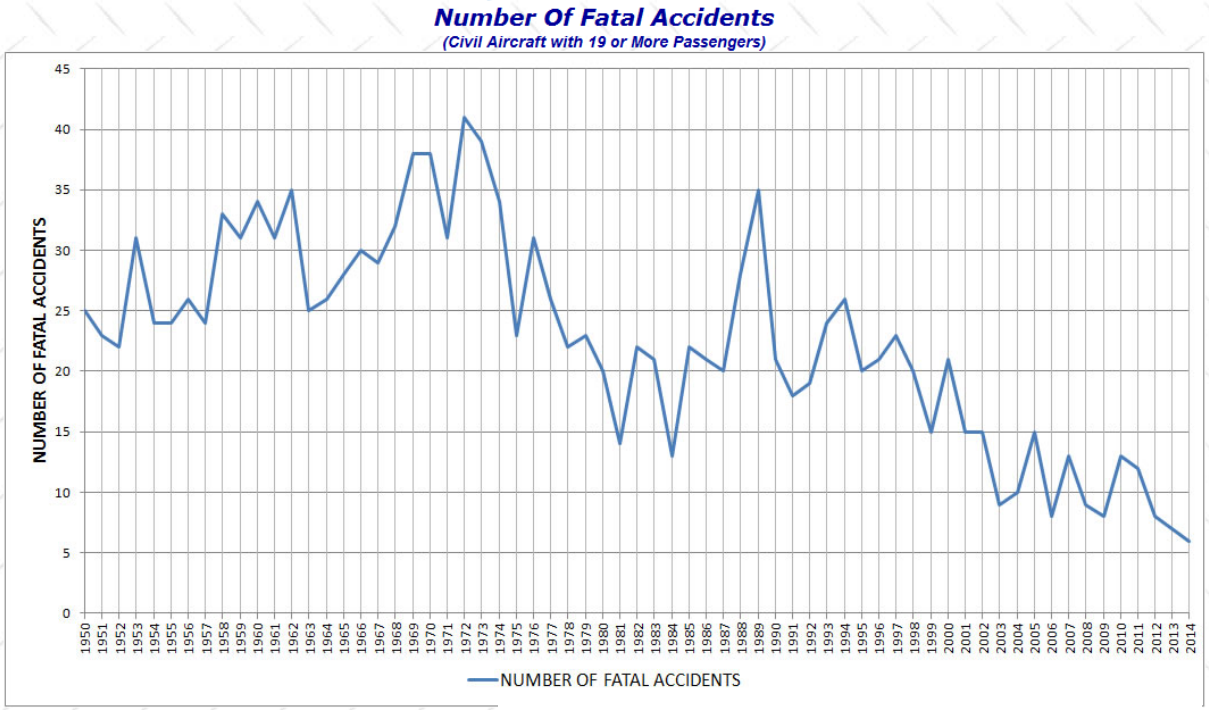
Statistiky silničních a leteckých nehod



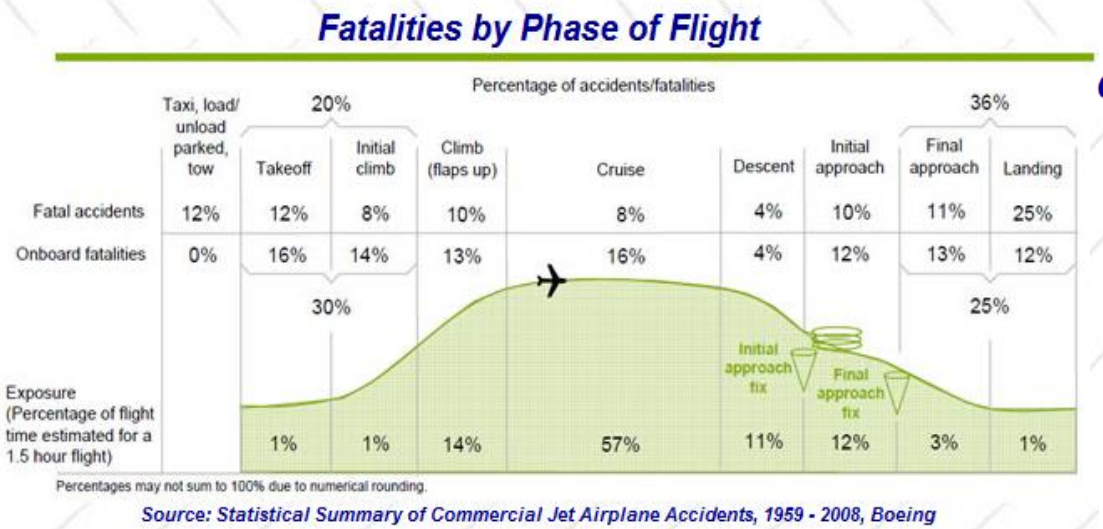
Vliv zavedení zásadních prvků (omezení počtu fatálních následků)	Relativně	Vůči stavu ze 60. let
Bezp. sloupek řízení (60. léta)	-10%	-10%
3bodový pás (70. léta)	-40%	-50%
Airbag řidiče (90. léta)	-25%	-60%

Statistiky silničních a leteckých nehod

Letecké nehody



http://www.planecrashinfo.com/cause.htm



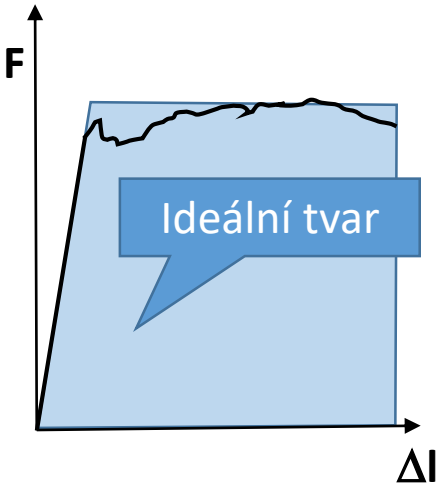
Causes of Fatal Accidents by Decade (percentage)

Cause	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	All
Total Pilot Error	58	63	44	57	55	57	53
Pilot Error	43	33	25	29	29	34	32
Pilot Error (weather related)	9	18	14	16	21	18	16
Pilot Error (mechanical related)	7	4	5	2	5	5	5
Other Human Error	2	8	9	5	8	6	6
Weather	15	12	14	14	8	6	12
Mechanical Failure	19	19	20	21	18	22	20
Sabotage	5	4	11	12	10	9	8
Other Cause	0	2	2	1	1	0	1

Materiály pro absorpční nárazové prvky

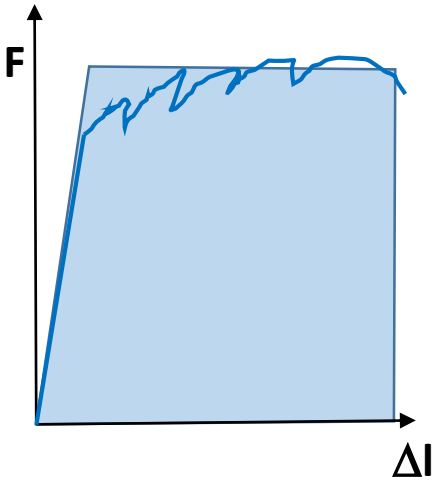
Kovové materiály :

- využívá se rozvinuté plasticity kovové konstrukce, řetězí řadu sériově/paralelně řazených prvků a plastická deformace kovu a plastické „klouby“ konstrukce pohlcují kinetickou energii nárazu.

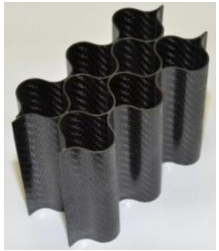


Kompozitní materiály:

- ačkoli chování vláknových kompozitů s polymerní matricí vykazuje křehké chování (malé deformace do poruchy), využívá se oblast vlastního porušování kompozitní skladby a celé konstrukce. Porušování se skládá z řady módů. Mechanismus porušování vykazuje vlastnosti „pseudo-plasticity“ a konstrukce pohlcuje kinetickou energii nárazu

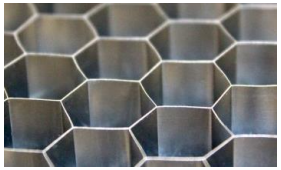


Typické tvary a mechanismy porušování kompozitních absorpčních prvků



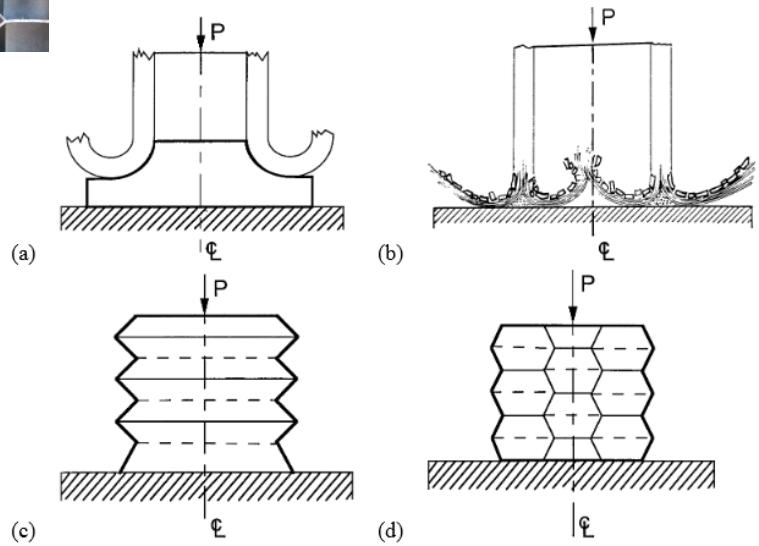
Tvary:

- válcové trubky, kuželové trubky (svazky trubek, různé soustředné průměry)
- vlnité desky (přímé, v bloku, zakroužené)
- plástvové uspořádání (Honeycomb)
- složitější tvary a konstrukce



Mechanismy porušování:

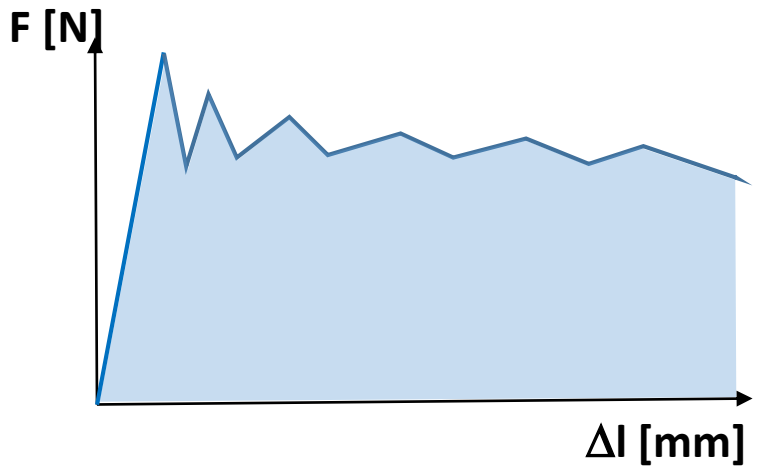
- „reverze“ deformace, viz (a)
- lokální delaminace a porušování, viz (b)
- ztráta stability
  - os. symetrická „obvodová“ , viz (c)
  - „lokální obvodová“ (diamond), viz (d)



Axial modes of collapse for cylinders: (a) tube inversion; (b) progressive crushing; (c) axisymmetric buckling, and (d) diamond bu

Anne-Marie Harte: Energy absorption of foam-filled circular tubes with braided composite walls. Eur. J. Mech. A/Solids 19 (2000) 31–50. http://www-mech.eng.cam.ac.uk/profiles/fleck/papers/116.pdf

Hodnocení absorpce deformační energie



Absorbovaná kinetická energie → deformační energie $U = \int_0^{\Delta l} F \cdot dl$ [J]

Měrné deformační energie:

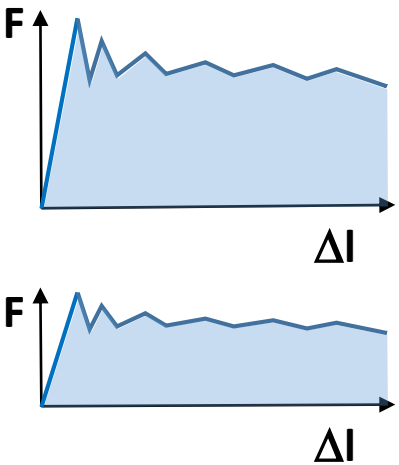
(na jednotku objemu) $\lambda_V = \frac{U}{V}$ [J/m³]

(na jednotku hmoty) $\lambda_V = \frac{U}{V \cdot \rho}$ [J/(kg m³]

Požadavky na absorbery

- Dostatečná „energetická kapacita“ (a deformační oblast) pro daný „typ nárazu“
- Schopnost pohlcení energie v krátkém časovém intervalu a na dlouhé dráze
- Ochrana okolí před „zplodinami“, destruovanými díly atp.

- Výhodou by byla možnost řízení kapacity pohlcené energie na dané dráze =
- adaptabilní (řízená) absorpce



Bilance energie pro různé typy dopravy:

			Energie	kJ	
			os. aut.	bus	mot. vlak
hmotnost		kg	2 000	20 000	60 000
rychlost	km/hod	m/s			
	50	13,9	192,9	1929,0	5787,0
	30	8,3	69,4	694,4	2083,3
	20	5,6	30,9	308,6	925,9
	10	2,8	7,7	77,2	231,5
	5	**1,4**	**1,9**	**19,3**	**57,9**

Výhody a nevýhody kompozitních absorbérů

Výhody:

- Vysoká měrná deformační energie (SEA)
- Nízká hmotnost
- Kombinace různých módů porušování

Nevýhody:

- Vyšší cena, možnost nebezpečných zplodin, složitější technologie výroby

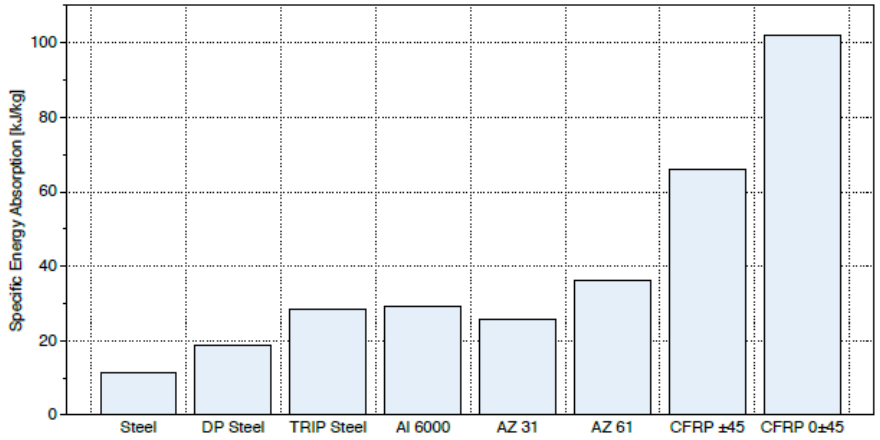
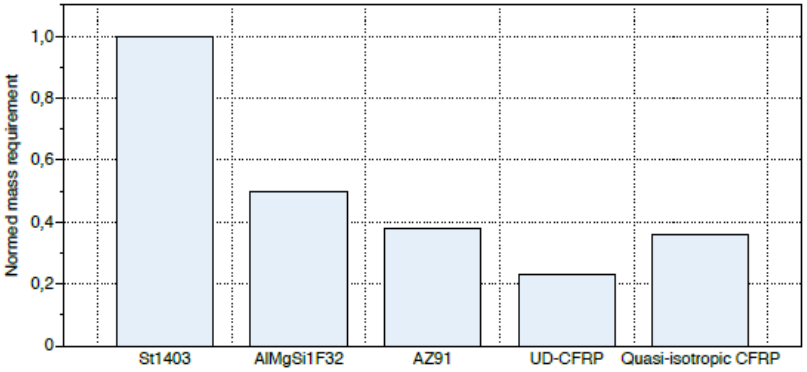


Figure 2.12: Comparison of material's Specific Energy Absorption



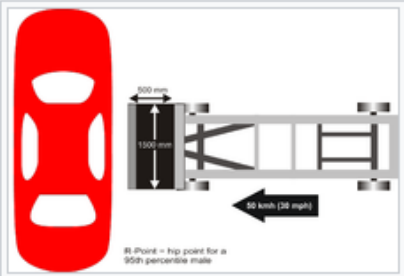
2.11: Comparison of material's mass requirement by same bending stiffness

M. Vašíček: Development of Computational Models for Prediction of Mechanical Properties of Composite Materials and Their Utilization in Crash Applications. Disertation, CTU in Prague 2015.

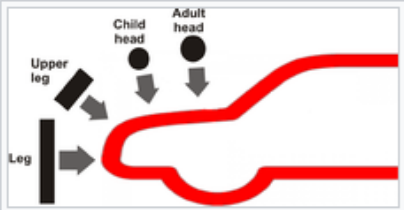
Nárazové (crashové) zkoušky vozidel

- Silové toky konstrukcí při různých zkouškách

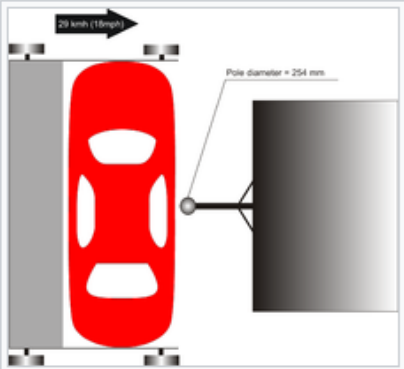
Euro NCAP frontal test



Euro NCAP side impact

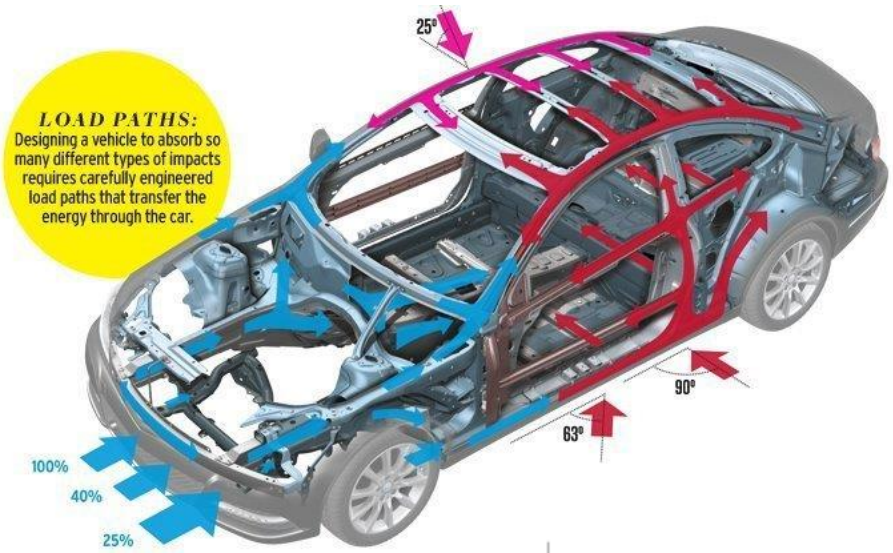


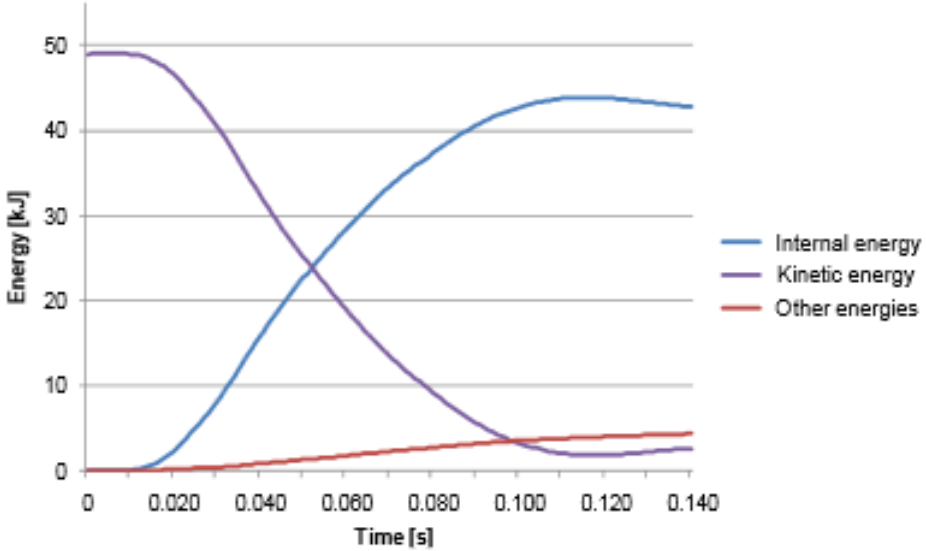
Euro NCAP pedestrian test



Euro NCAP side impact, pole test

https://en.wikipedia.org/wiki/Euro_NCAP





Velikost pohlcované energie při zkouškách

Osobní vozidla

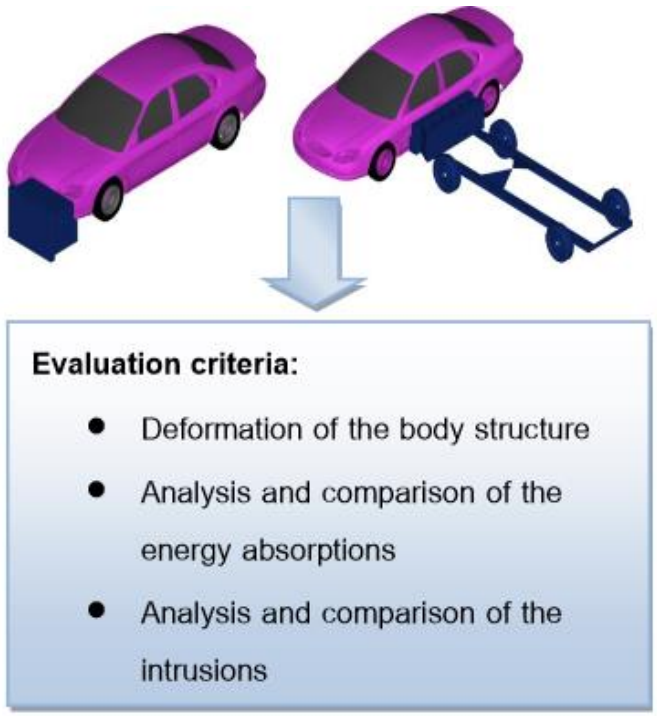


Fig. 7 Euro NCAP ODB and Euro NCAP MDB

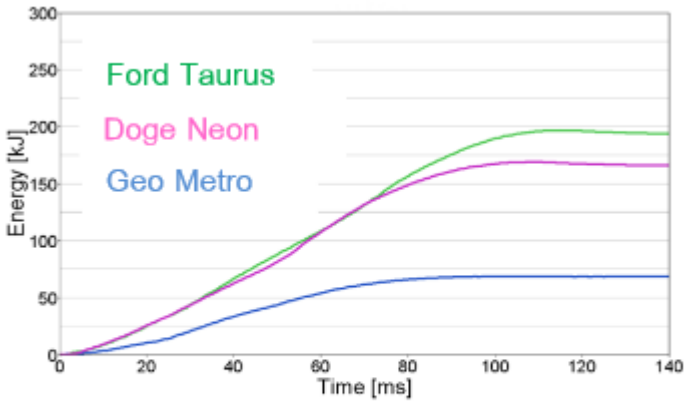


Fig. 12 Internal Energy absorbed in front impact test under Euro NCAP standard

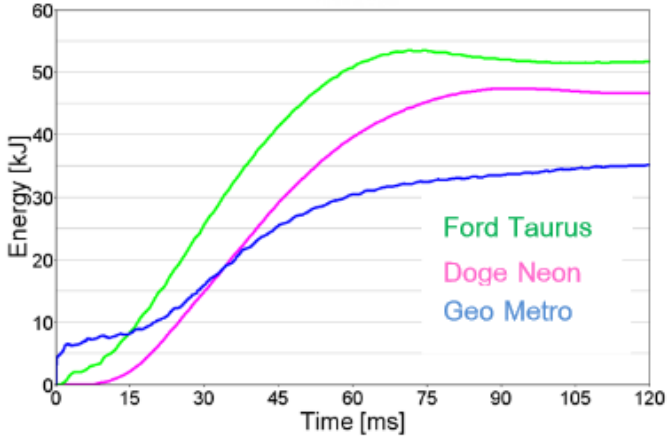


Fig. 19 Energy absorbed in Euro NCAP side impact test

Velikost pohlcované energie při zkouškách

Železniční soupravy a vozidla

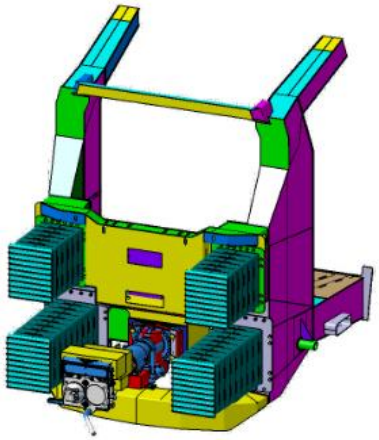
Table 2. Examples of Crush Zone Characteristics for Existing/Planned Coach Cars

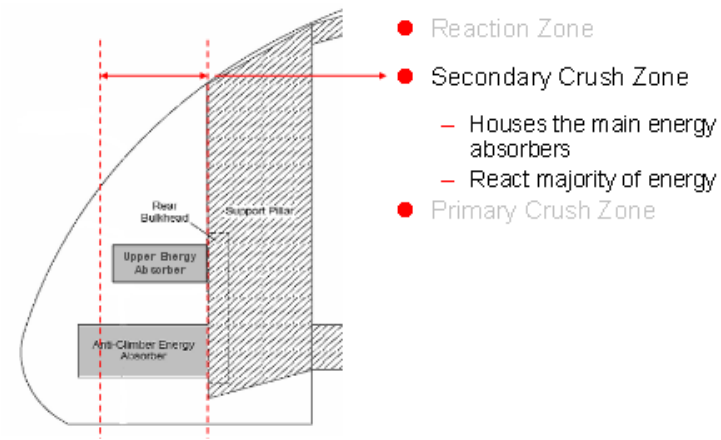
Vehicle	Organization	Status	Design Energy Absorption (kJ)*	Material	General Crush Element Characteristics
ORE Research Vehicle	British Rail	Built and tested	1,000	Steel	• Aluminum honeycomb • Fiber composites
BR Mk1 (Research Vehicle)	British Rail	Built and tested	1,500	Steel	• Steel, large cell honeycomb • Rectangular box sections
465 Networker	Adtranz	Built and tested	1,000	Aluminum	• Aluminum honeycomb • Rectangular box sections
TGV 2N Extreme Trailer	SNCF	In service	3,500	Aluminum	• Slotted box beams • Thin-walled prismatic box sections
XTER Front	SNCF	Built and tested	5,000	Stainless	• Crushable composite in draft gear • Outboard prismatic box sections • Inboard prismatic box sections
American Flyer Trailer Car *Adjacent to Power Car* *Not adjacent*	Bombardier	In design phase; energy absorbers tested	5,000 2,000	Steel	• System is likely to be similar to TGV systems • Structure must also satisfy North American requirements, including S-580 (power car) and 49 CFR, Part 229.141 (both)
NJT LRV	Kinky-Sharyo	In design phase; energy absorbers tested	400	Steel, with aluminum absorbers	• 350kJ must be provided by vehicle structure
NYCT	Bombardier, Kawasaki	Just awarded	1,000	Steel	• Energy absorption to be provided by controlled deformation of the car body

* At one end.

Published in Proceedings of the 1999 IEEE/ASME. Joint Railroad Conference. http://ntl.bts.gov/lib/48000/48000/48053/rail_cw_1999_5.pdf

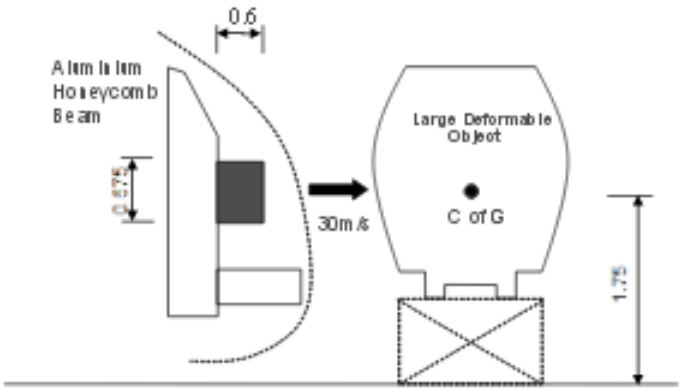
Absorbéry v železniční dopravě

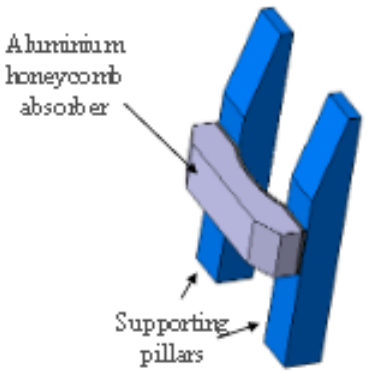




Conor O'Neill: http://www.ncl.ac.uk/newrail/assets/docs/RailInteriorslightweightcabpresention-CONEILL.pdf

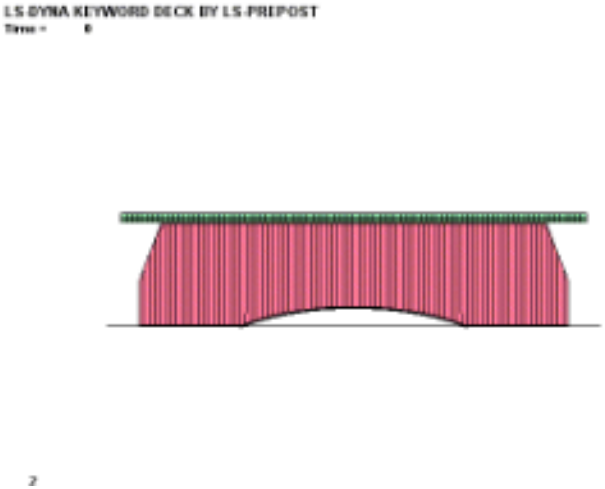
Upper Absorber Concept

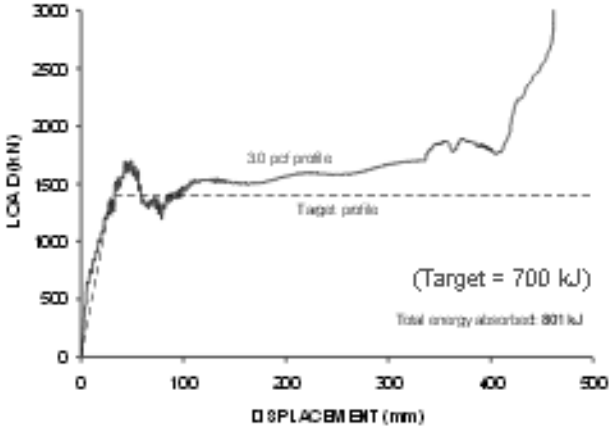




- Aluminium honeycomb beam

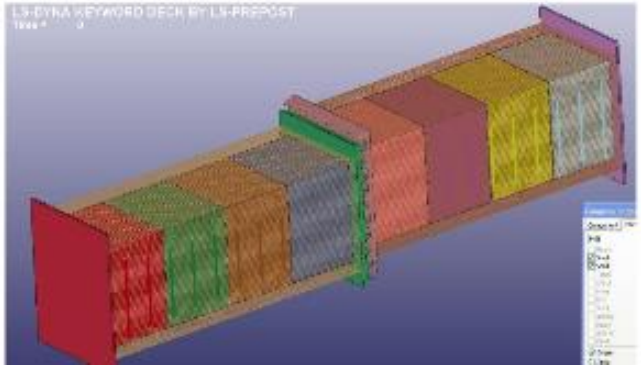
Dynamic Modelling of Upper Absorber

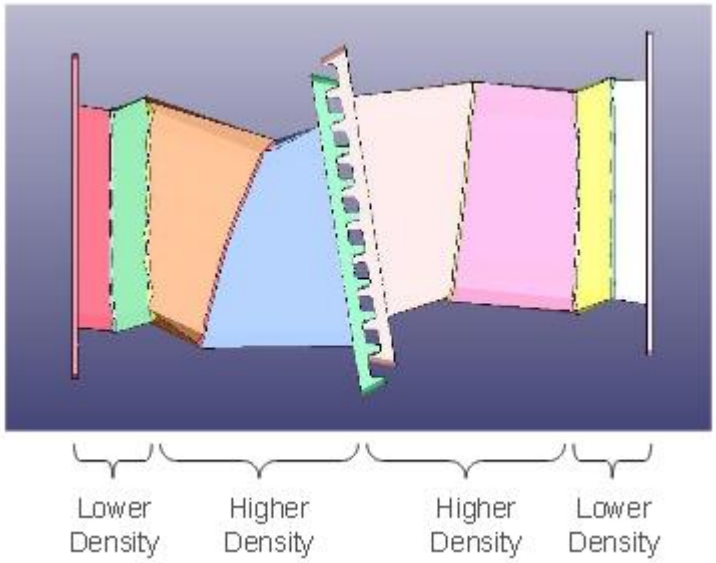


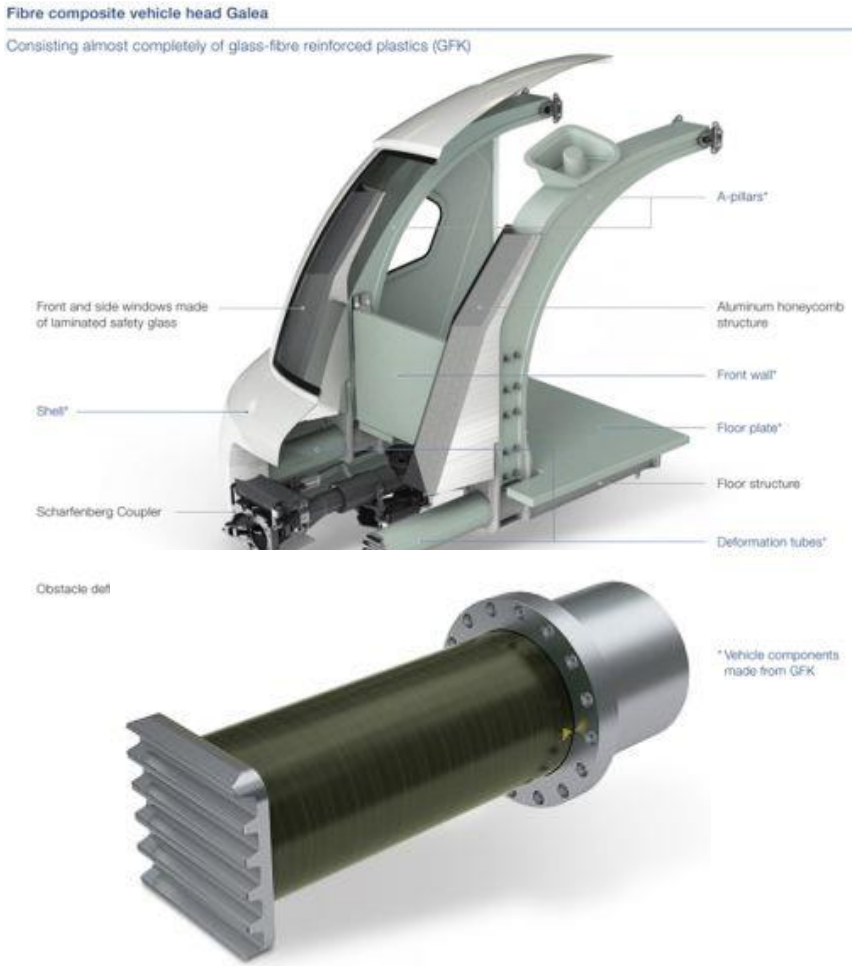


Lower Absorber Concept

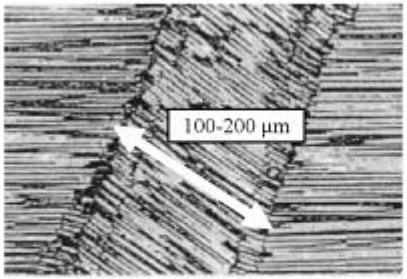
- Large aluminium tube
- Blocks of aluminium honeycomb of varying density
  - Begin crushing at rear of absorber rather than the front
  - Honeycomb will self align when fully crushed.





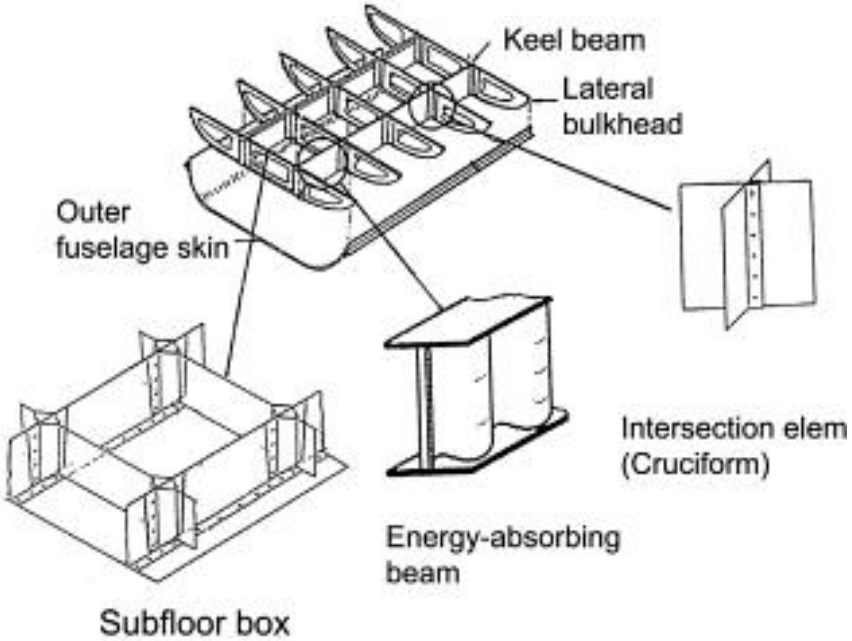


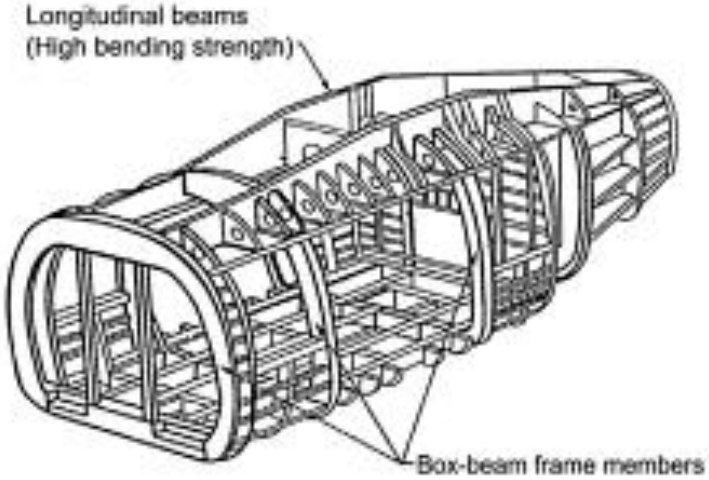
Source: http://www.voith.com/en/press/press-releases-99_58828.html



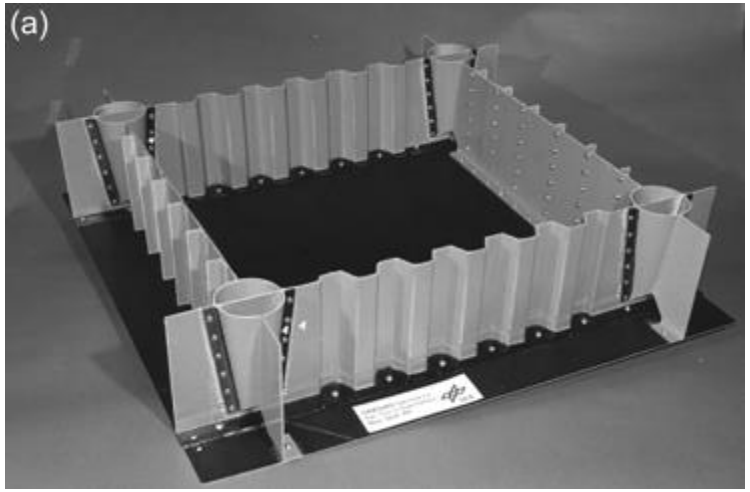
Microscopic observation of kink band

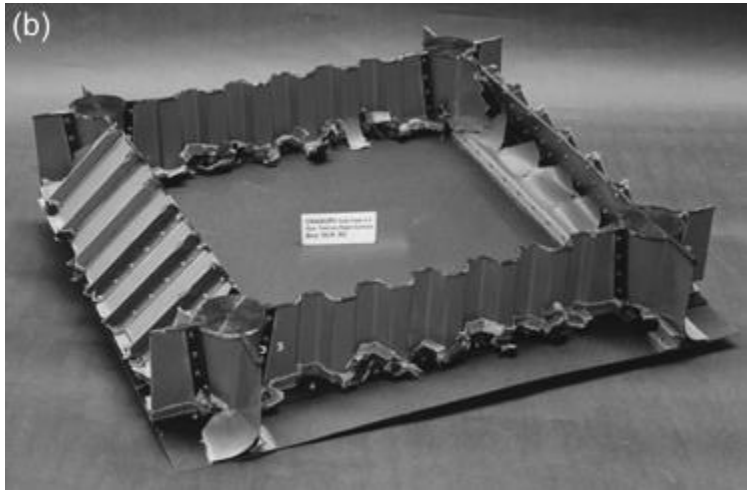
Absorbéry v letecké dopravě





Absorbéry v letecké dopravě

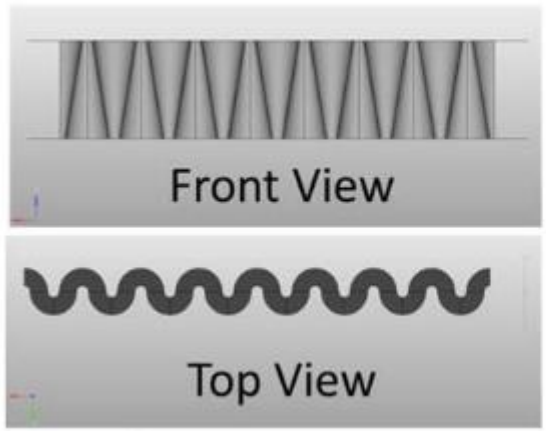


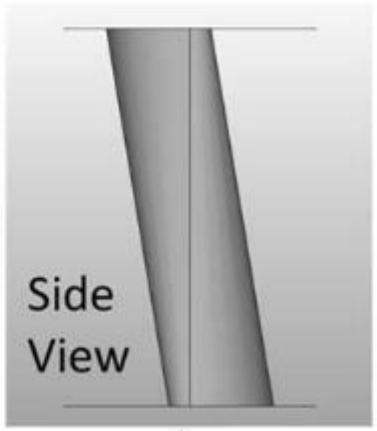


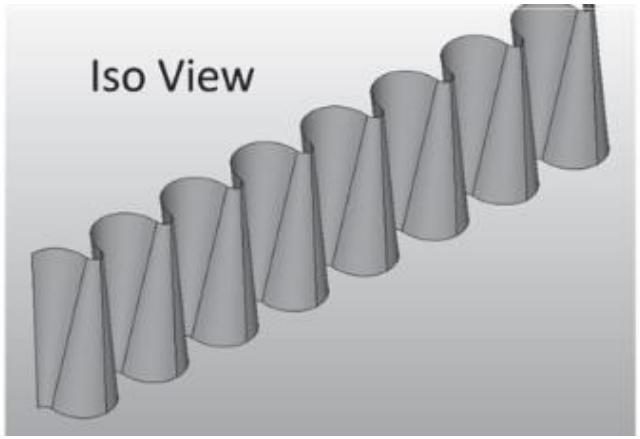
Polymer Composites in the Aircraft Industry. Edited by P.E. Irving. C. Soutis.

https://books.google.cz/books?id=IiR0AwAAQBAJ&pg=PA266&lpg=PA266&dq=COMPOSITE++CRASH++ABSORBER&source=bl&ots=-xw-3L3yHA&sig=Ags7__dSHf2J2p8zPqKxG5hCP_U&hl=cs&sa=X&ved=0CFgQ6AEwCjgKahUKEwiG9qL8icDHAhWCVhQKHaajAkU#v=onepage&q=COMPOSITE%20%20CRASH%20%20ABSORBER&f=false

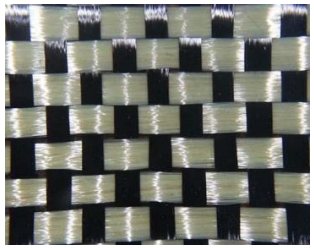
Absorbéry v letecké dopravě

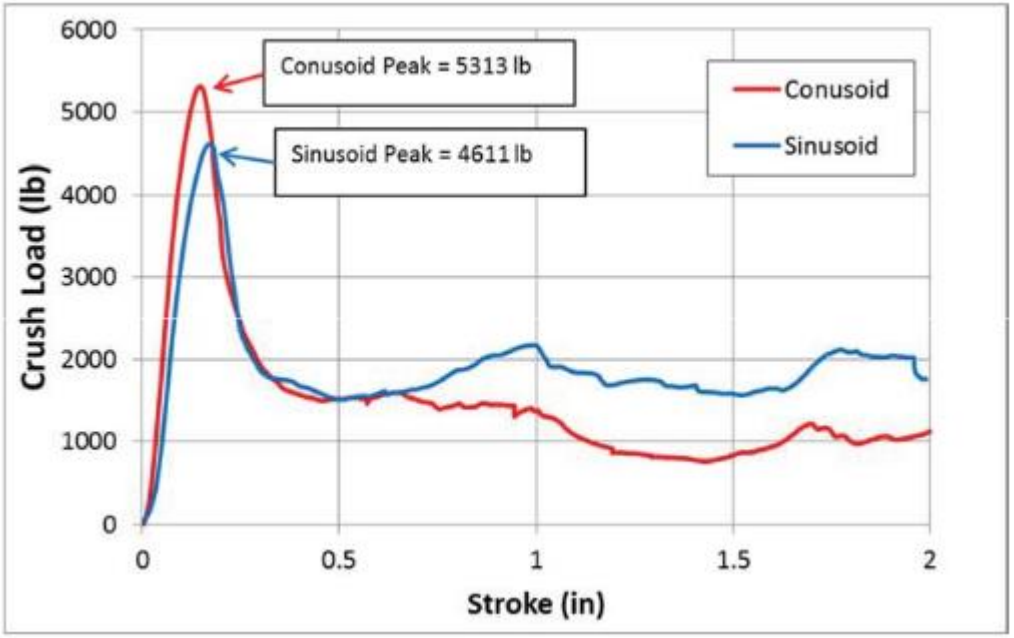






Hybrid carbon / Kevlar plain weave fabric





Justin D. Littell : http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150001245.pdf

Absorbéry v letecké dopravě

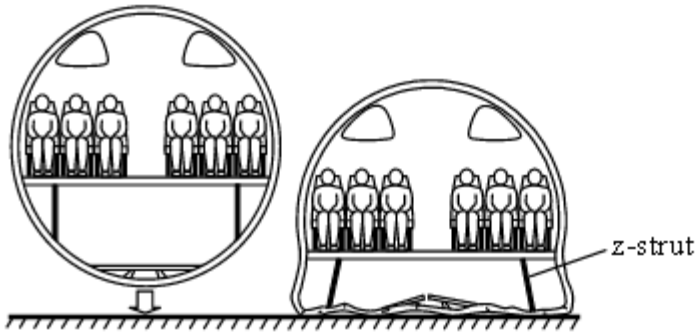
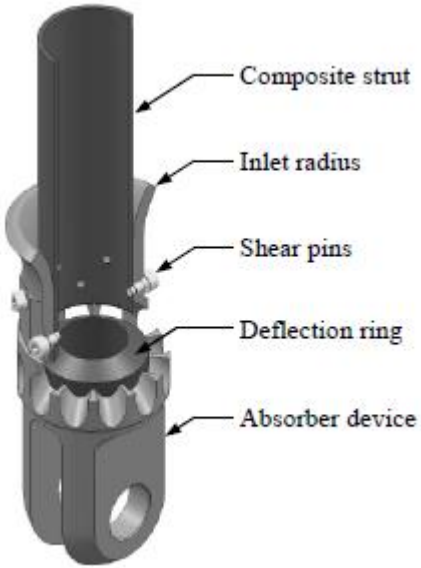
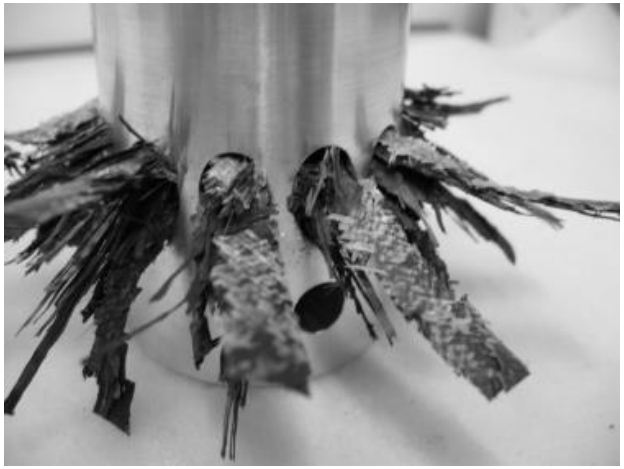
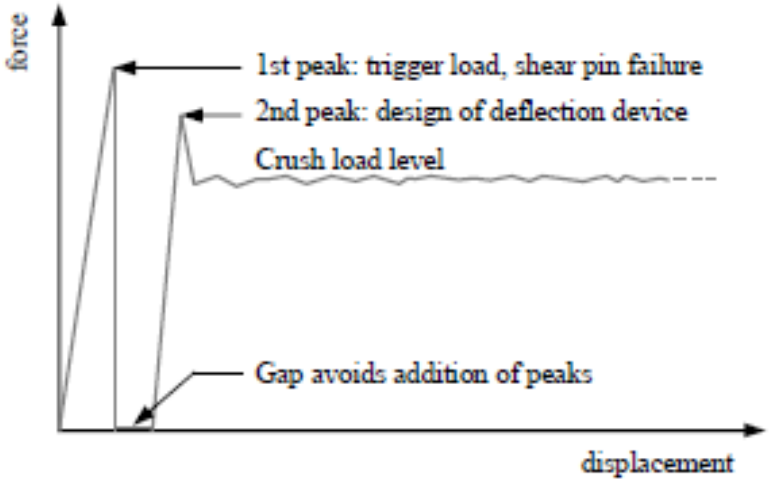


Illustration of aircraft fuselage drop test for crashworthiness evaluation.

Sebastian Heimbs: Composite Crash Absorber for Aircraft Fuselage Applications.
WIT Transactions on The Built Environment, Vol 113,©2010 WIT Press,ISSN 1743-3509 (on -line)doi:10.2495/SU100011



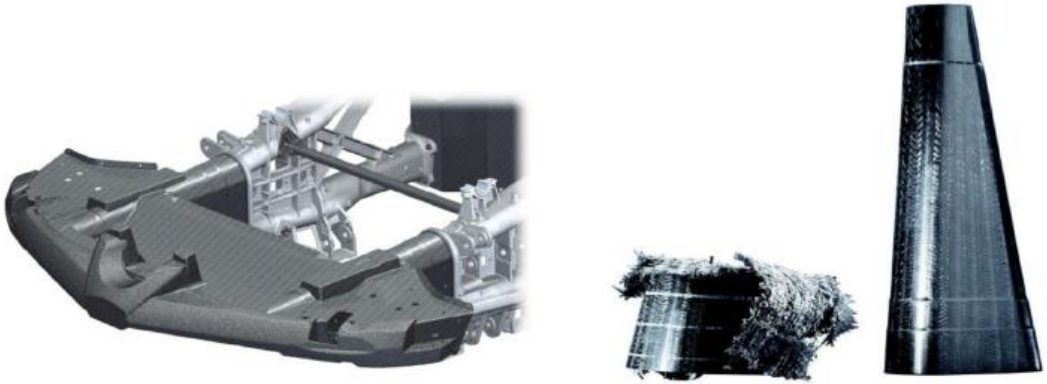




Automobilové aplikace

- První použití C/E kompozitu na primární konstrukci byl monokok McLaren MP4/1 in 1981.
- Současná konstrukce formule F1 – je tvořena monokokem na bázi sendvičové stuktury, která zahrnuje přední a zadní nárazovou zónu tvořenou C/E bloky.
- Tyto bloky mají absorbovat energii vozu o hmtnosti 780kg do tuhé bariery rychlostí a by zpomalila tělo (hrudník) max 60 g během 3ms.

- První použití C/E kompozitu na osobním voze bylo v r. 2003 na přední části vozu Mercedes-Benz.
- Crash box byl vyroben ze čtyřvrstvého pleteného uhlíkového kompozitu a byl schopen absorbovat energii až 70kJ / kg.
- Od té doby se na trhu automobilů představilo mnoho podobných dalších konceptů, založených na kompozitním a sendvičovém uspořádání, (Porsche 918, McLaren MP4-12C a P1, Lamborghini Aventador, Ferrari LaFerrari)

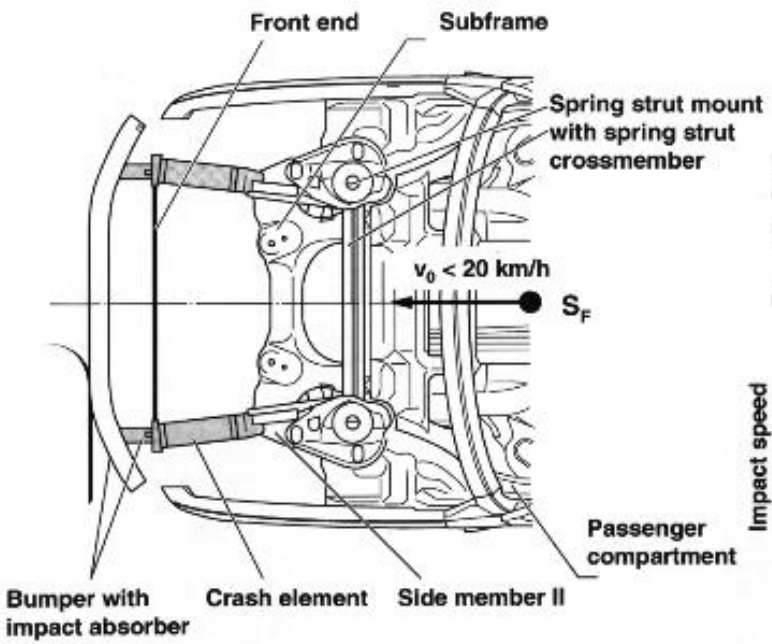


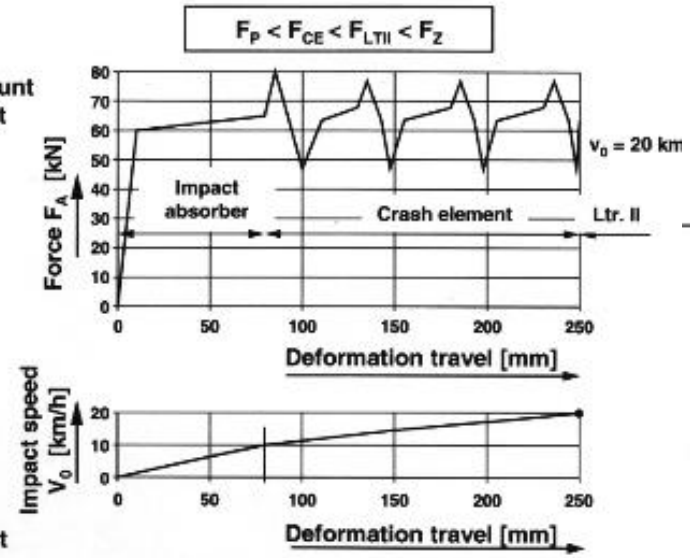
(a) Front-end (b) Crash-box

Figure 2.13: Examples of composite structures on the Mercedes-Benz SLR

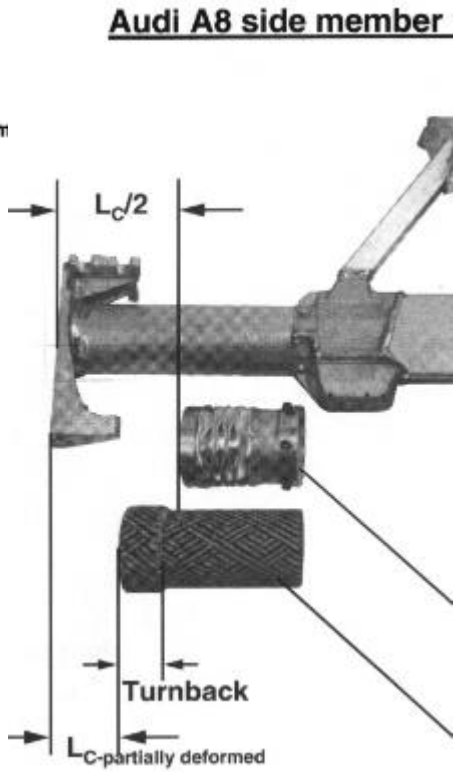
M. Vašíček: Development of Computational Models for Prediction of Mechanical Properties of Composite Materials and Their Utilization in Crash Applications. Disertation, CTU in Prague 2015.

Automobilové aplikace



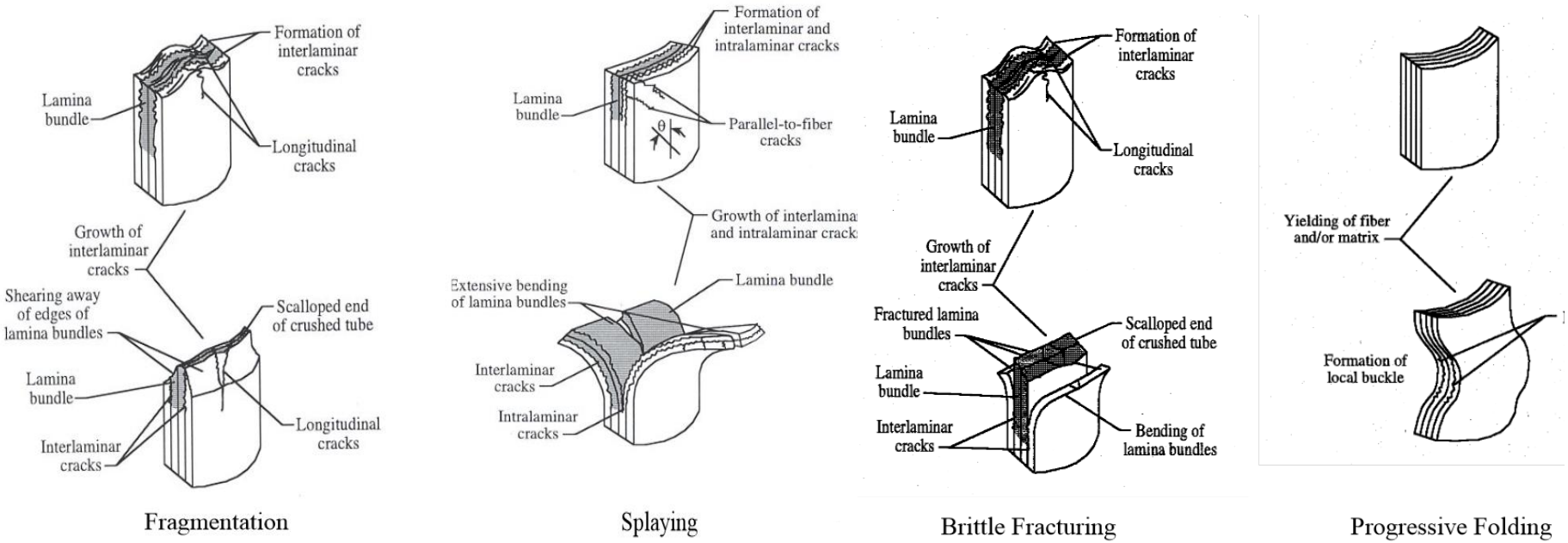


Gradual deformation response of the front end structure



J. Dyckhoff, H.G. Haldenwanger: Fibre-reinforced Composite Plastic Side Members with Crash Compatibility. http://www.rs1234.wz.cz/img_h/auto031_r_dyckhoff.pdf

Různé módy porušování kompozitu



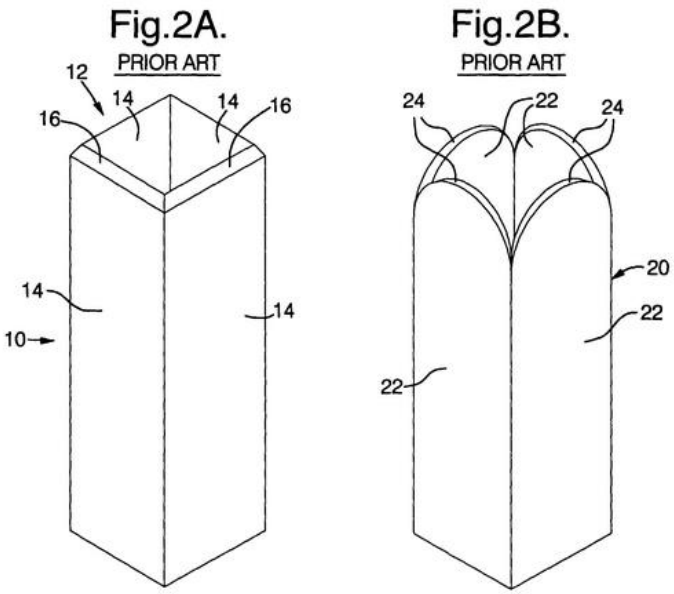
J. Michael Starbuck: Test Methodologies for Determining Energy Absorbing Mechanisms in Automotive Composite Material Systems
http://web.ornl.gov/~webworks/cpr/pres/107057_.pdf

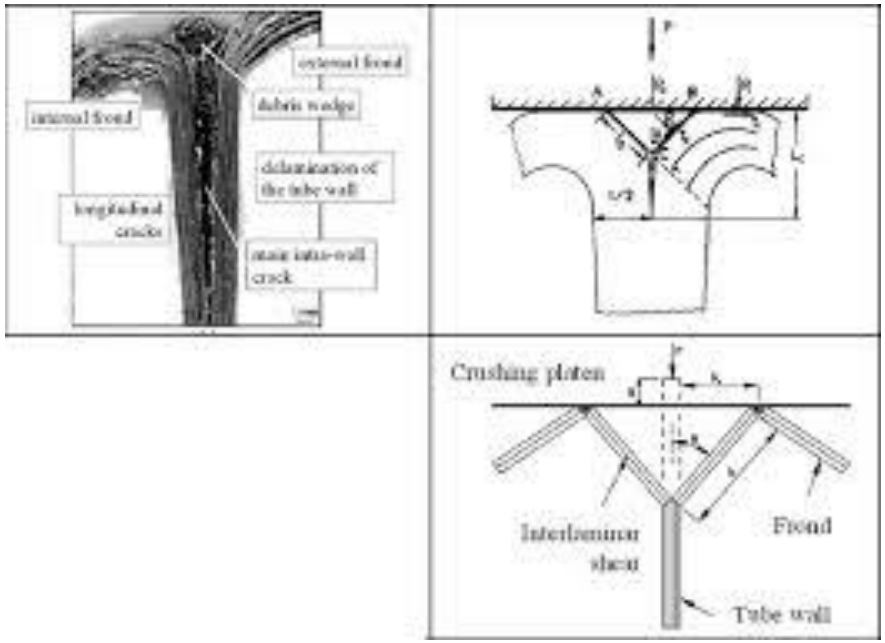
Otázka je jak tyto módy „vyvolat“ ?

Iniciátory vhodných módů porušení

Možná řešení:

- úpravy okrajů elementů deformačních boxů
- úpravy tuhosti podél elementu – vyvolat „vlnu“, „kloub“
- vyvolání „reverzního módu deformování“
- změna tuhosti podél elementu
- modifikace materiálových vlastností v čase



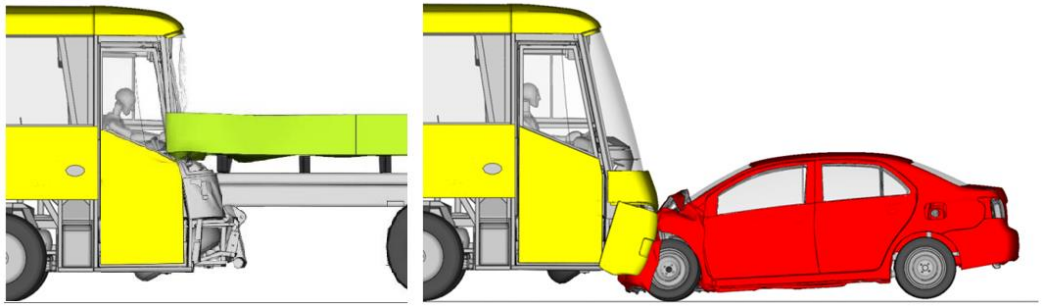


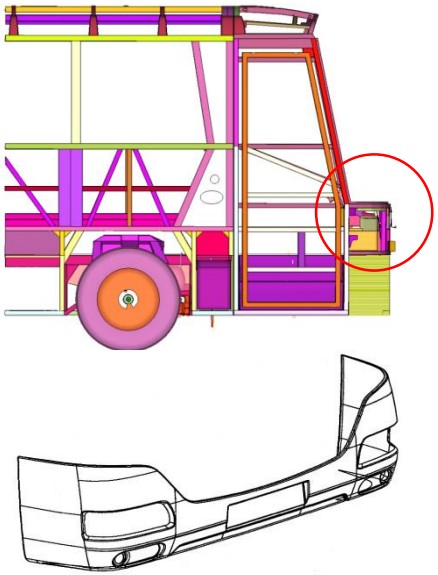
http://patentimages.storage.googleapis.com/EP0908300A2/00160001.png

Výzkum a vývoj absorbérů na FS ČVUT v Praze

spolupráce s Latecore, VZLÚ, Comtes FHT, Vision Consulting aj.

Motivace



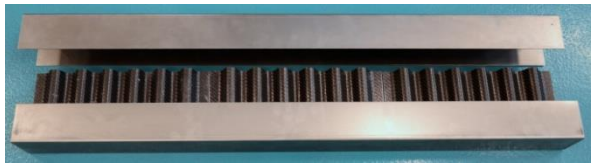


Využití kompozitních deformačních členů v přední části vozidel před počátkem plastizace zbylé části ocelové konstrukce (šasi) - přední nárazník

Nová idea možnosti „ovlivnění“ průběhu impaktní síly podle „modifikace tuhosti absorberu v reálném čase nebo „módu porušování“

Uhlíkový kompozit s termosetickou matricí

Uhlíkový kompozit s termoplastickou matricí



Deformační prvky tvořené navíjenými trubkami s různou skladbou směru vláken

Zkušební vzorky:

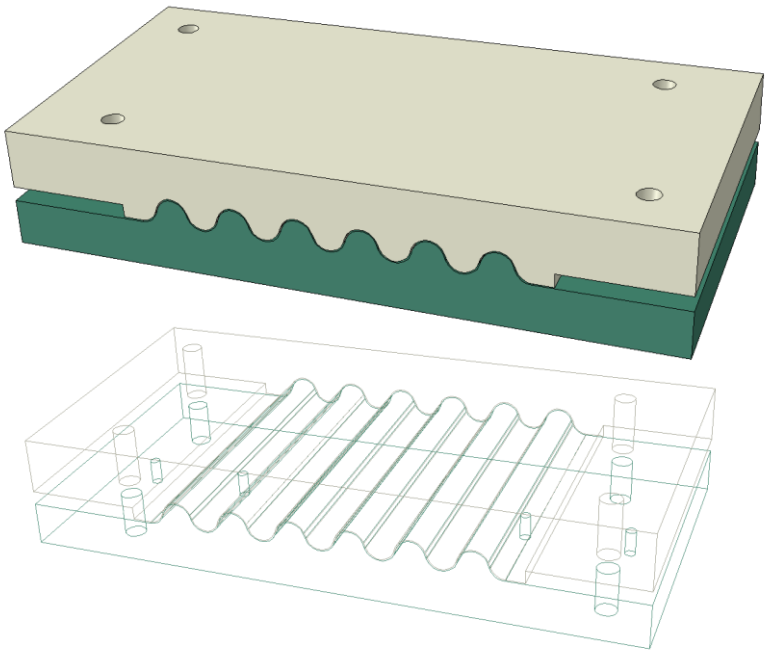
- navíjená trubka průměru 26 mm
- tloušťka stěny trubky 1 mm
- délka vzorku 150 mm
- svazky trubek 4 resp. 7 kusů
- materiál vlákna: uhlík (T700)
- matrice epoxy LG120

Různé typy vrstvení směru vláken

Specimen Nr.	Laminate layup (degree)
#1	87/0
#2	0/87
#3	0/23/-23
#4	0/23/-23/87
#5	0/15/-15
#6	0/15/-15/87
#7	0/7/-7/87

Deformační prvky tvořené z termoplastických vlnovců

1. Výroba vlnovce lisováním termoplastické desky ve formě
2. Slepení 4 vlnovců do bloku



Zkušební vzorky:

- bloky 150×84×120 mm
- Tloušťka stěny vlnovce 1 mm
- Ekvivalentní vzniklý průměr 26 mm
- Ekvivalentní svazek „trubek“ 8 ks

Deformační prvky tvořené z termoplastických vlnovců

- 3 různé materiály:
- 3 typy vláken
- 3 typy matric

Specimen	VS	VP	VC
Material	TEPEX® dynalite 101-FG290(4)/45%	PURE Polypropylene	TEPEX® dynalite 208-C200(4)/45%
Layup	[(0,90)/(±45)]s	[(0/90)2]s	[(0/90)2]s
Fibres	**Glass**	**Polypropylene**	**Carbon**
Matrix	Polyamide 6.6	Polypropylene	Polyurethane
Tensile strength [MPa]	472VS	200	710
Tensile modulus [GPa]	23	5.5	48

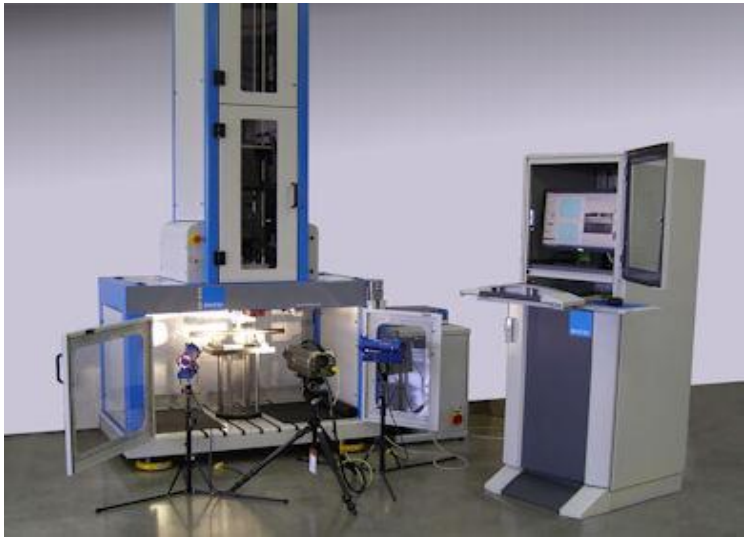
Realizace zkoušek:

Kvazistatické tlakové zatěžování

- univerzální zkuš. stroj Heckert EU-100.

Pádové zatěžování

- stroj IMATEC IM10T-30HV se záznamem Hf kamerou
- energie nárazu 250 – 2000 J
- měřené veličiny: síla, posuv, rychlost, zpomalení, energie

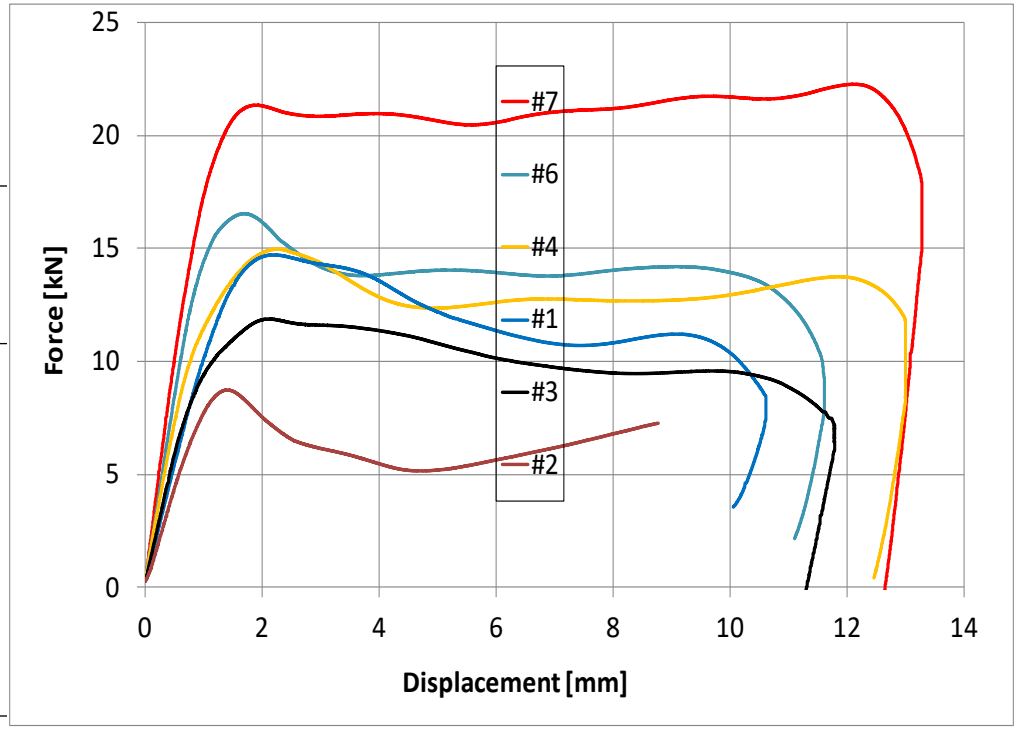


Výsledky zkoušek:

Analýza výsledků uhlíkových kompozitních trubek

- porovnání závislosti síla-posuv pro trubky s různou skladbou
- Je zřejmé, že pořadí a úhel vrstev ovlivňuje mechanismus porušování a pohlcenou energii.

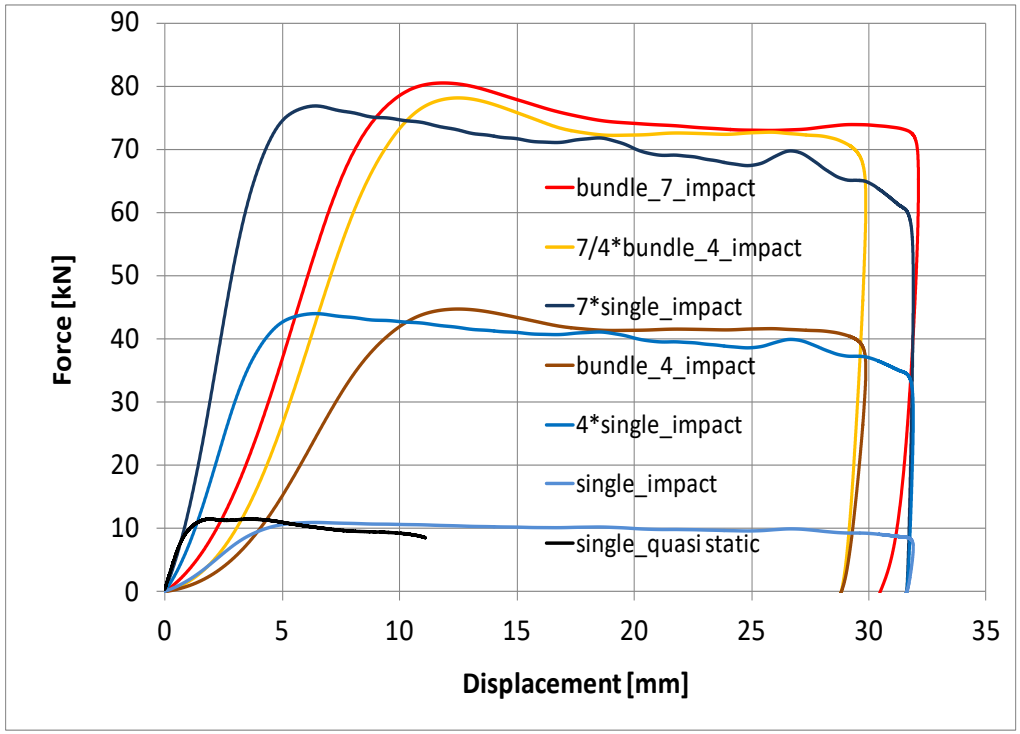
Specimen Nr.	Laminate layup (degree)	Spec. Energy [J/mm]
#1	87/0	8.4
#2	0/87	14.2
#3	0/23/-23	10.0
#4	0/23/-23/87	11.5
#5	0/15/-15	11.3
#6	0/15/-15/87	13.1
#7	0/7/-7/87	18.5



Výsledky zkoušek:

- Kvazistatické zatížení vykazuj v počáteční fázi vyšší tuhost než dynamické zatížení
- Výsledky dynamického zatěžování pro 1 trubku, svazky 3 a 7 trubek se chovají „proporcionálně“ počtu deformačních elementů.

Specimen Nr.	Laminate layup (degree)
#1	87/0
#2	0/87
#3	0/23/-23
#4	0/23/-23/87
#5	0/15/-15
#6	0/15/-15/87
#7	0/7/-7/87



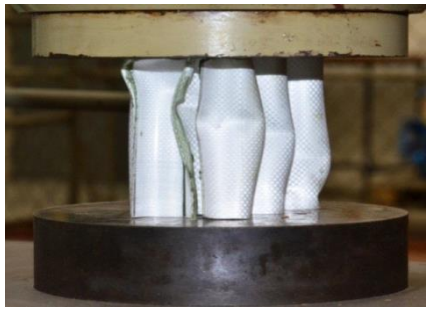
Výsledky zkoušek:

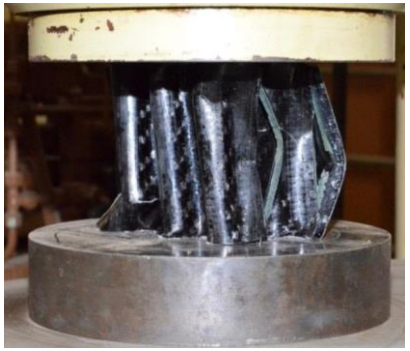
Analýza výsledků termoplastických vlnovců

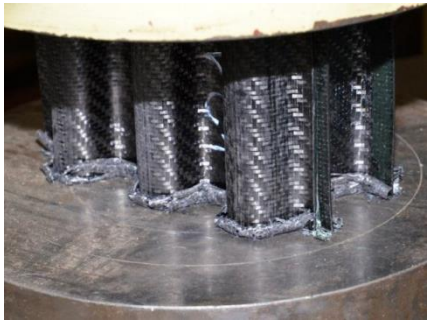
Pádové zkoušky

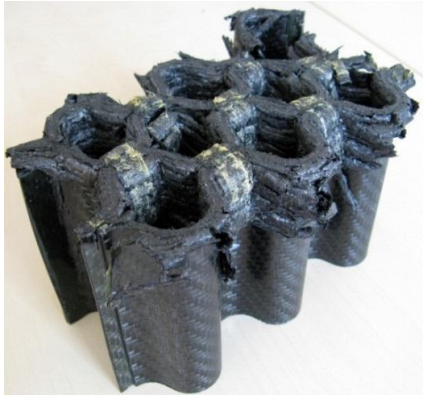
- materiál typu **VS** and **VP** – ztráta stability bloku, nevhodný pro aplikace
- materiál typu **VC** – mechanismus deformačního porušování – vhodný pro crashové aplikace

Specimen	VS	VP	VC
Material	TEPEX® dynalite 101-FG290(4)/45%	PURE Polypropylene	TEPEX® dynalite 208-C200(4)/45%
Layup	[(0,90)/(±45)]s	[(0/90)2]s	[(0/90)2]s
Fibres	**Glass**	**Polypropylene**	**Carbon**
Matrix	Polyamide 6.6	Polypropylene	Polyurethane





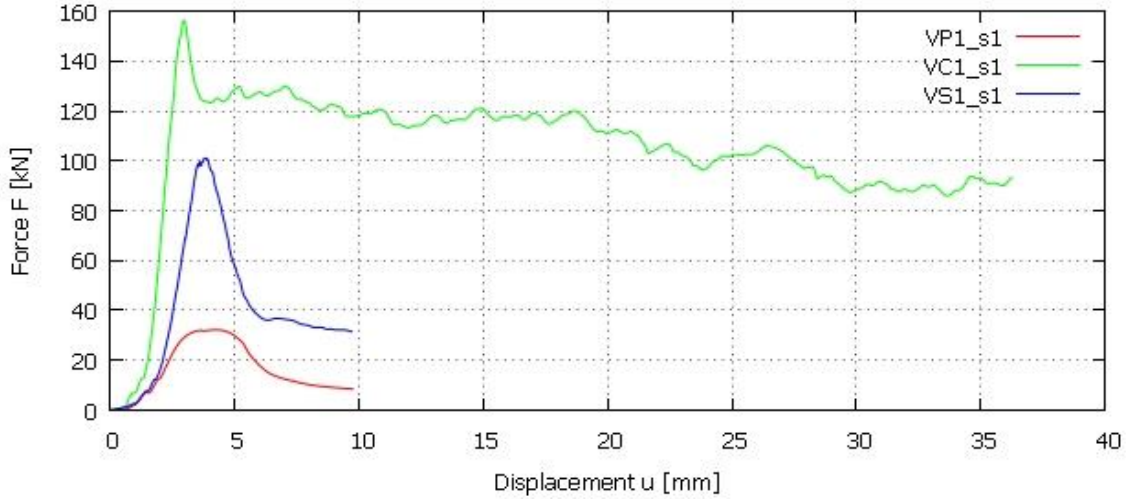




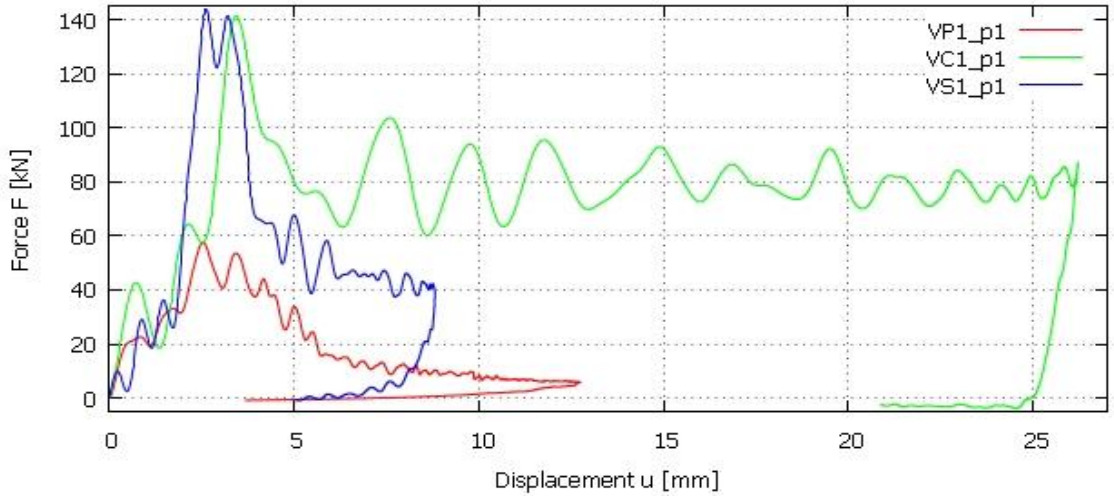
Výsledky zkoušek:

Analýza výsledků termoplastických vlnovců

Pádové zkoušky



Quasistatic tests		
Specimen type	Max. Force [kN]	Spec. Energy [J/mm]
VP	32	17.9
VC	156	98.4
VS	101	42.0



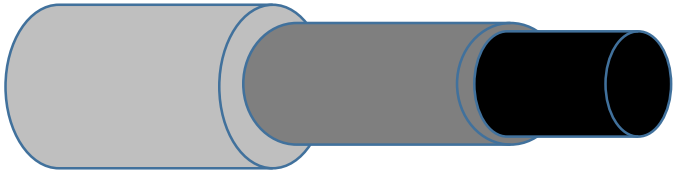
Impact tests		
Specimen type	Max. Force [kN]	Spec. Energy [J/mm]
VP	58	26.1
VC	142	76.8
VS	146	60.2

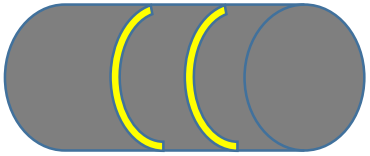
Výsledky zkoušek:
porovnání trubkových a vlnovcový bloků

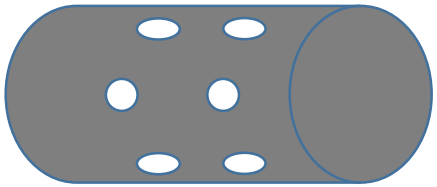
	Impact tests	Quasistatic tests
Specimen type	Spec. Energy [J/mm]	Spec. Energy [J/mm]
VP	26.1	17.9
VC	76.8	98.4
VS	60.2	42.0
Vz_1	113.6	94.4
Vz_2	67.2	52.0
Vz_3	80.0	79.2
Vz_4	92.0	100.0
Vz_5	90.4	
Vz_6	104.8	108.0
Vz_7	148.0	162.4

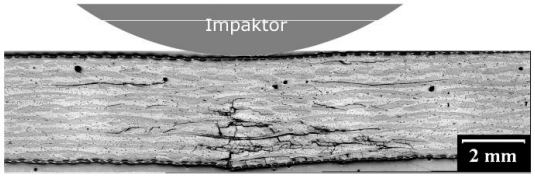
Deformační prvky s proměnnou tuhostí – možnosti realizace (studentský tým FS ČVUT)

- Vícestupňovou konstrukcí se zapojování odpovídajícího počtu prvků do procesu absorpce.
- Snižování tuhosti matrice trubky vlivem zvýšení lokální teploty (lokální tepelný zdroj nebo odporové drátky – nevýhoda dlouhý čas ohřevu)
- Vytvoření iniciačních míst lokální delaminací nebo narušeném stěny trubky (např. bočními impakty pomocí kladívek, ozubců), řízení počtu a lokality porušení



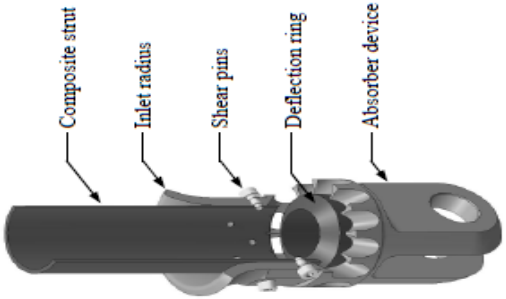






Troiani, Enrico, at all: In: *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering.* 2014, No. 60, pp 375-381..

- Vytvoření „řezacího módu“ porušování s možností ovlivňování dráhy/ úhlu prořezávání



Heimbs, S., a kol., *Composite crash absorber for aircraft fuselage.* [Online]

Studie vlivu „spouštěčů“ porušení, hustoty a velikosti lokálních otvorů

- Typ X:

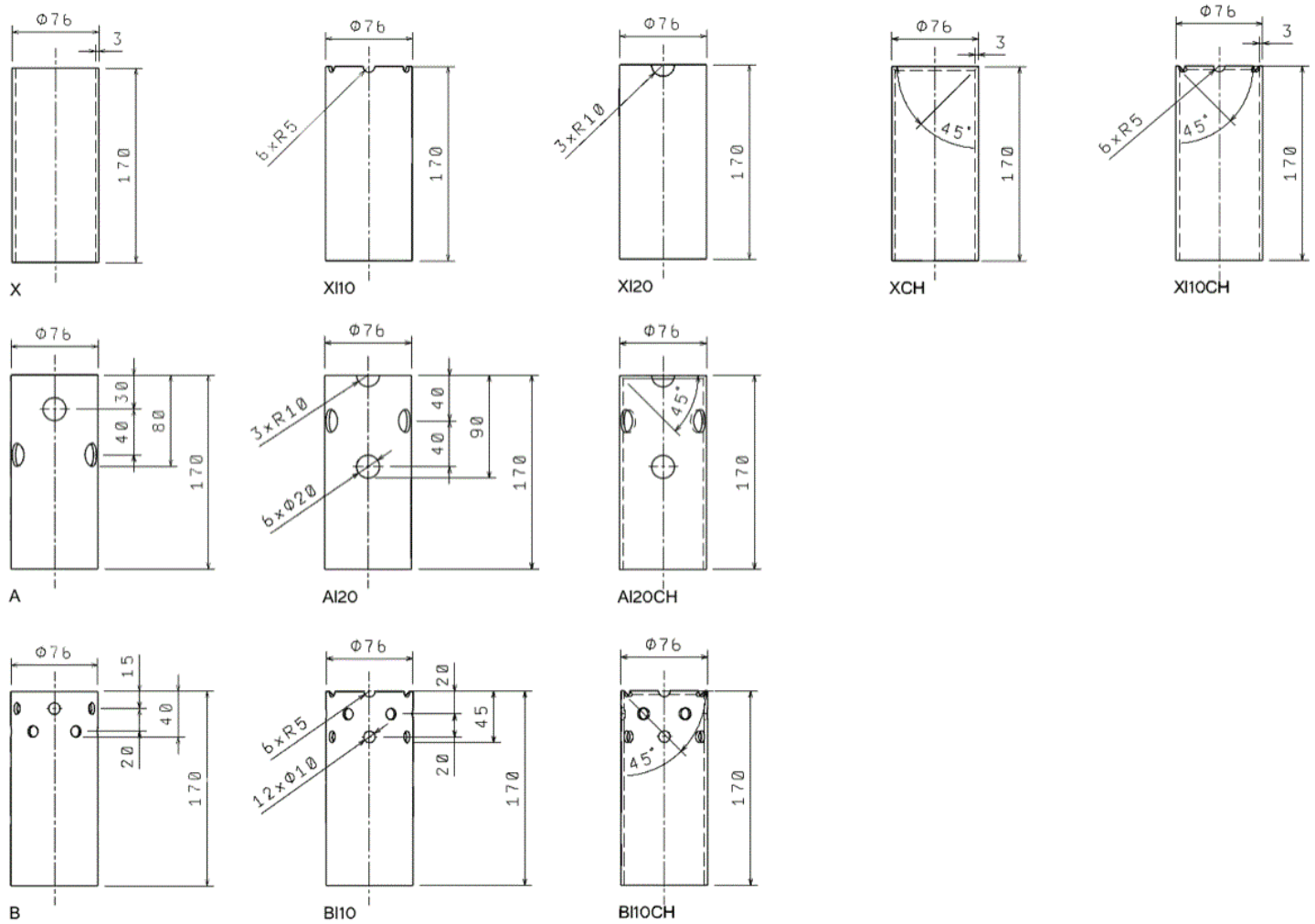
bez otvoru

- Typ A:

otvory ∅20

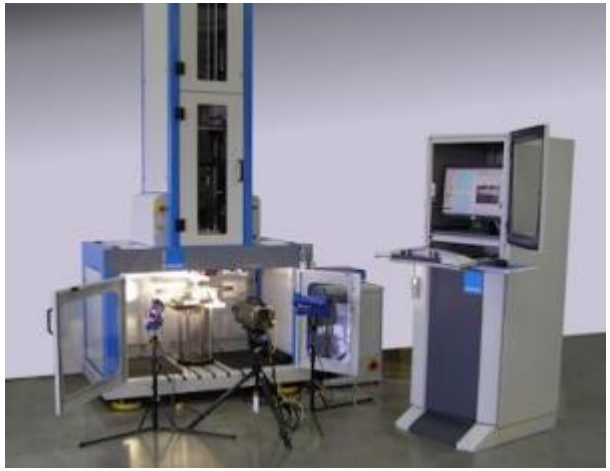
- Typ B:

otvory ∅10



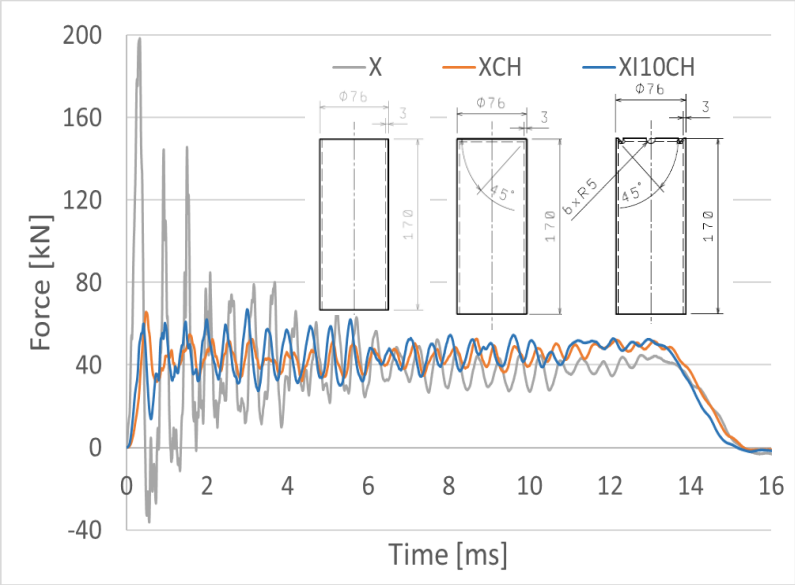
Statické a „impaktní“ zkoušky
(spolupráce s COMTES FHT)

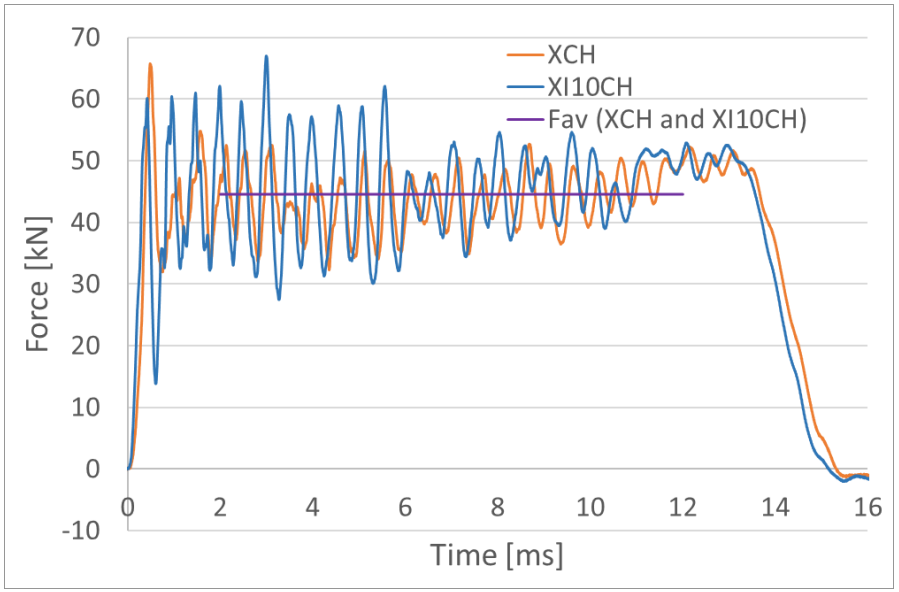
- C/E kompozitová tkanina SIGRAPREG C W305 - TW2/2 - E323/42%
- Trubky délky: 170 mm,
- vnitřní průměr : 70mm
- Tloušťka stěny: 3mm (8 vrstev)
- Padostroj IMATEK IM10T-30HV
  (max E= 3 000 J)



Výsledky zkoušek:

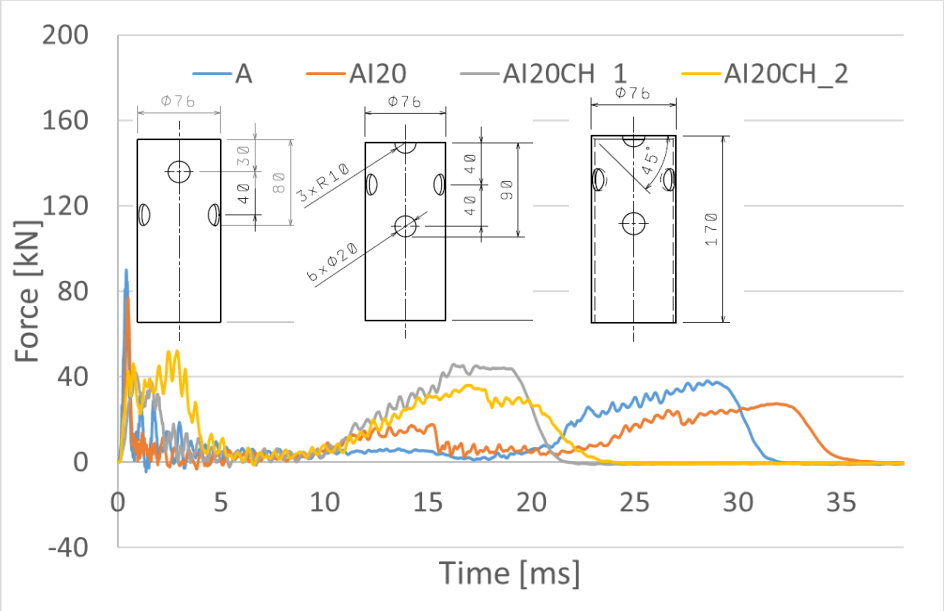
Typ X:
bez otvoru



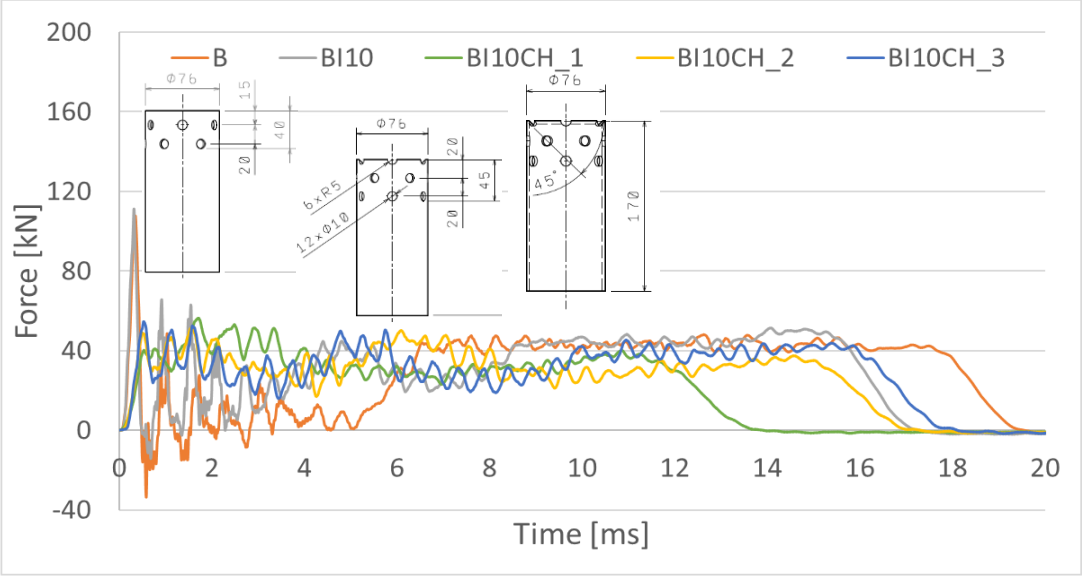


Výsledky zkoušek:

Typ A:
otvory ∅20

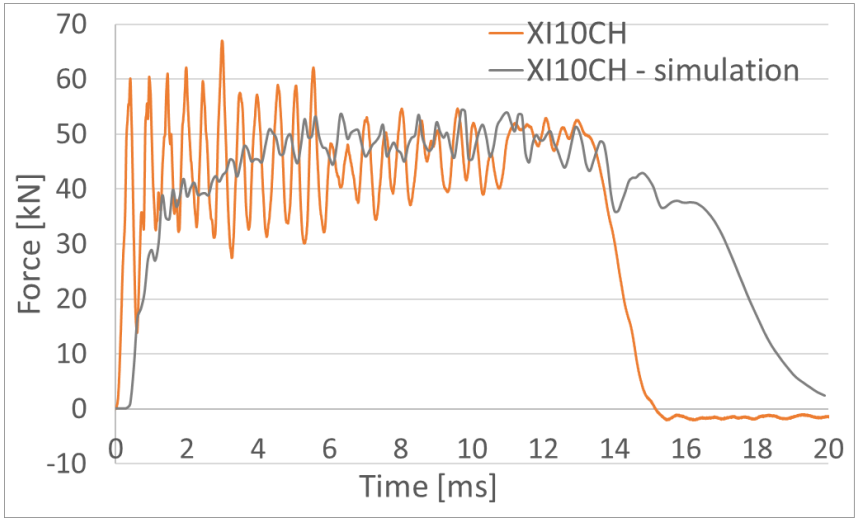


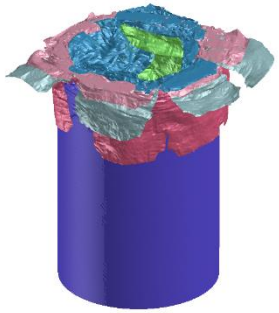
Typ B:
otvory ∅10



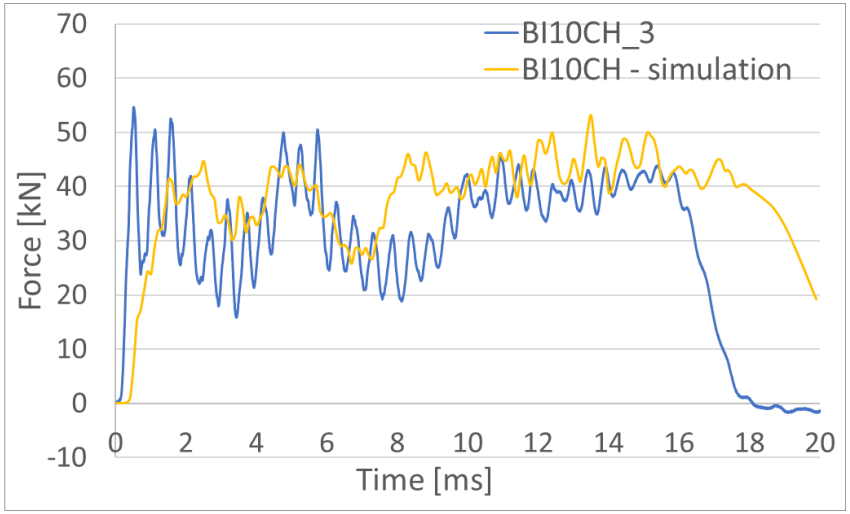
Porovnání se numerickými simulacemi:

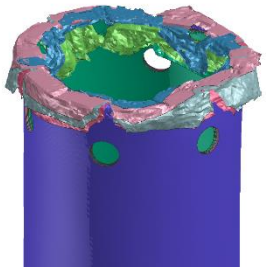
Typ X:
Bez otvorů





Typ B:
otvory ∅10

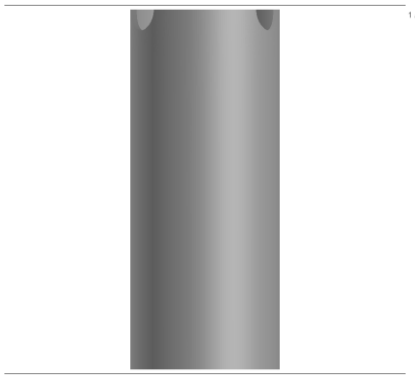


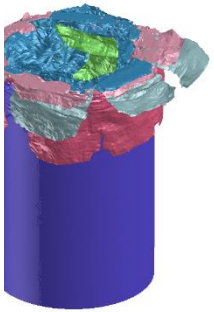


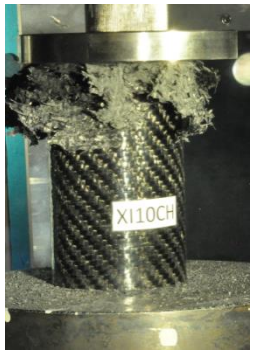
Porovnání se numerickými simulacemi -

video:

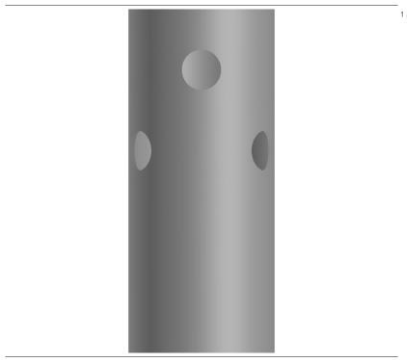
Typ X:
Bez otvorů

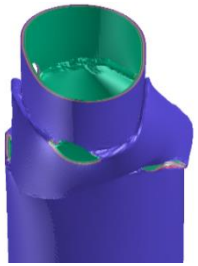


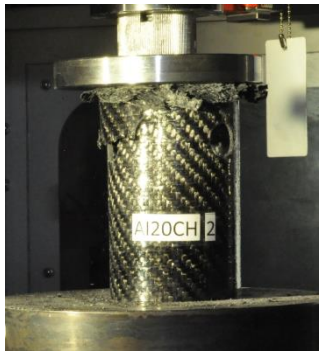




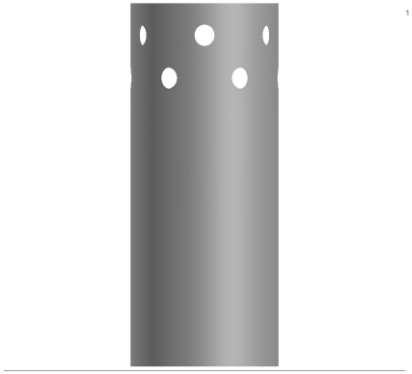
Typ A:
otvory ∅20

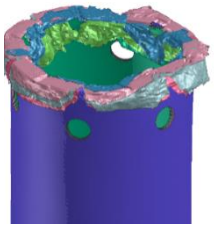


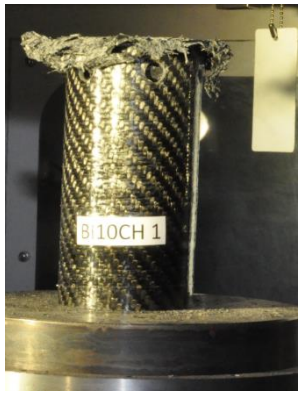




Typ B:
otvory ∅10







Numerické simulace

Modelování v různých softwarech,
Diskuse – výhody, nevýhody, vstupní parametry, možnosti modifikace poškození aj.

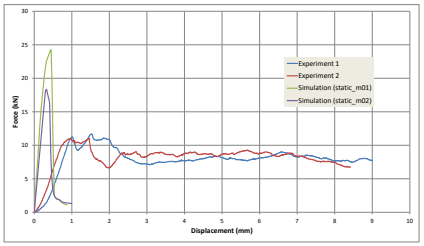
Zkušenosti s modelováním:
ABAQUS – explicit
LS Dyna
PamCrash
HyperMesh-Radioss

Numerické simulace – ukázka stavby modelu Abaqus

Zkouška jedné trubky

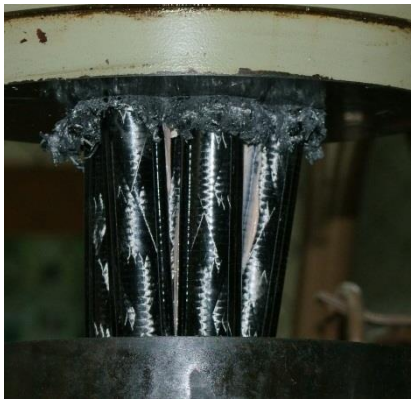
"detailni" MKP Model

Verifikace s experimentem

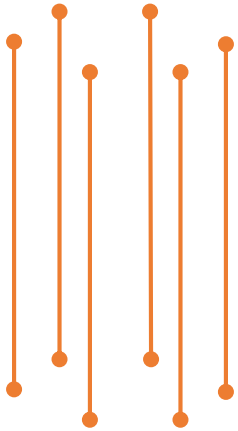


Návrh ekviv. prutu podle MKP modelu

Zkouška svazku trubek



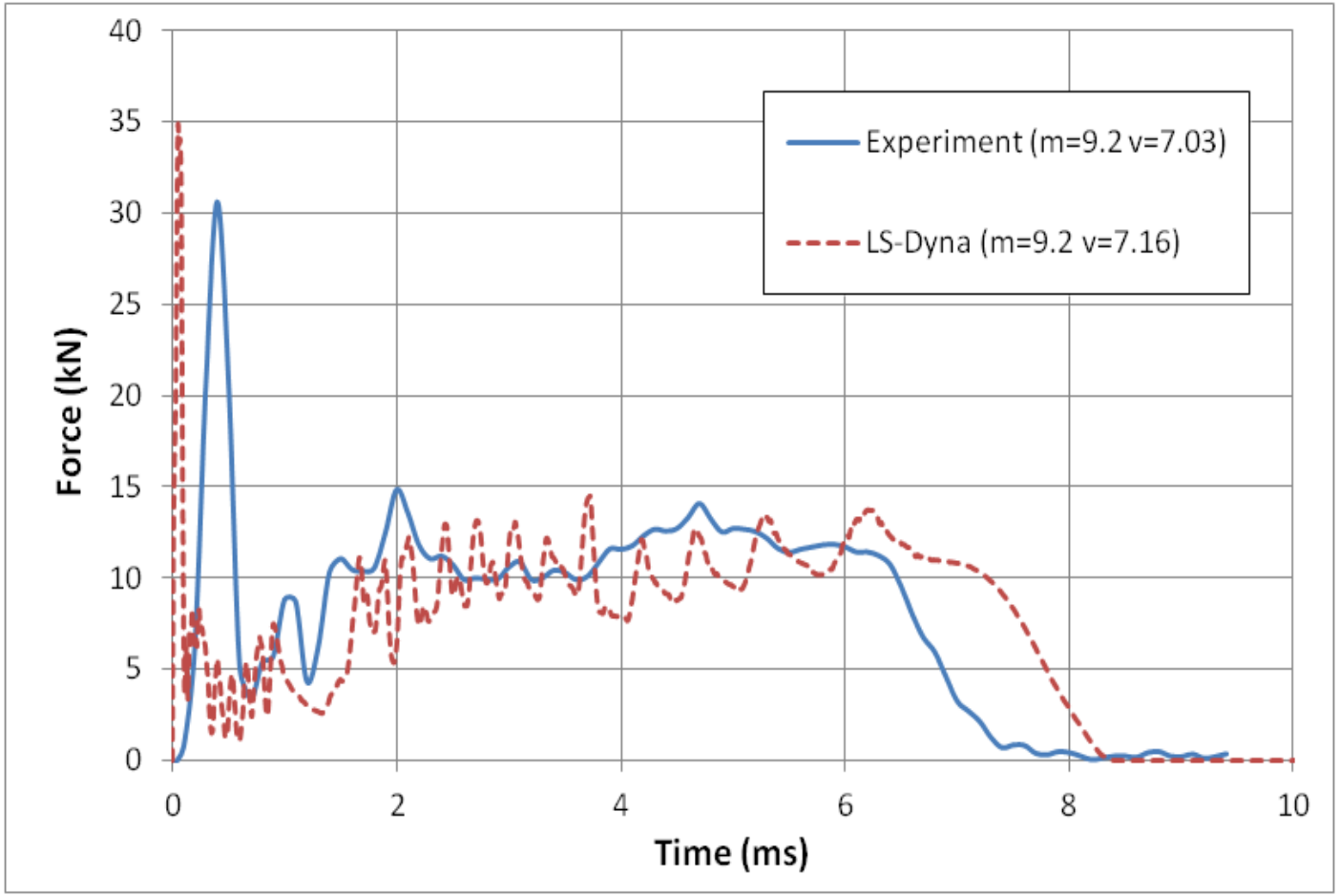
Svazek ekviv. prutů



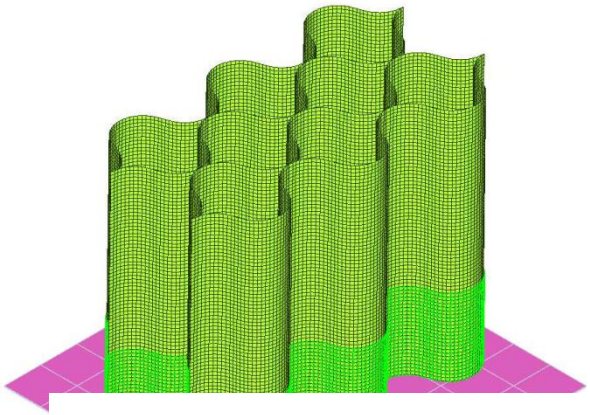
- Interakceprutů – verifikace s experimentem
- Simulace chování svazku
- Použití prutů v globálním modelu

Numerické simulace – ukázka stavby modelu LS DYNA

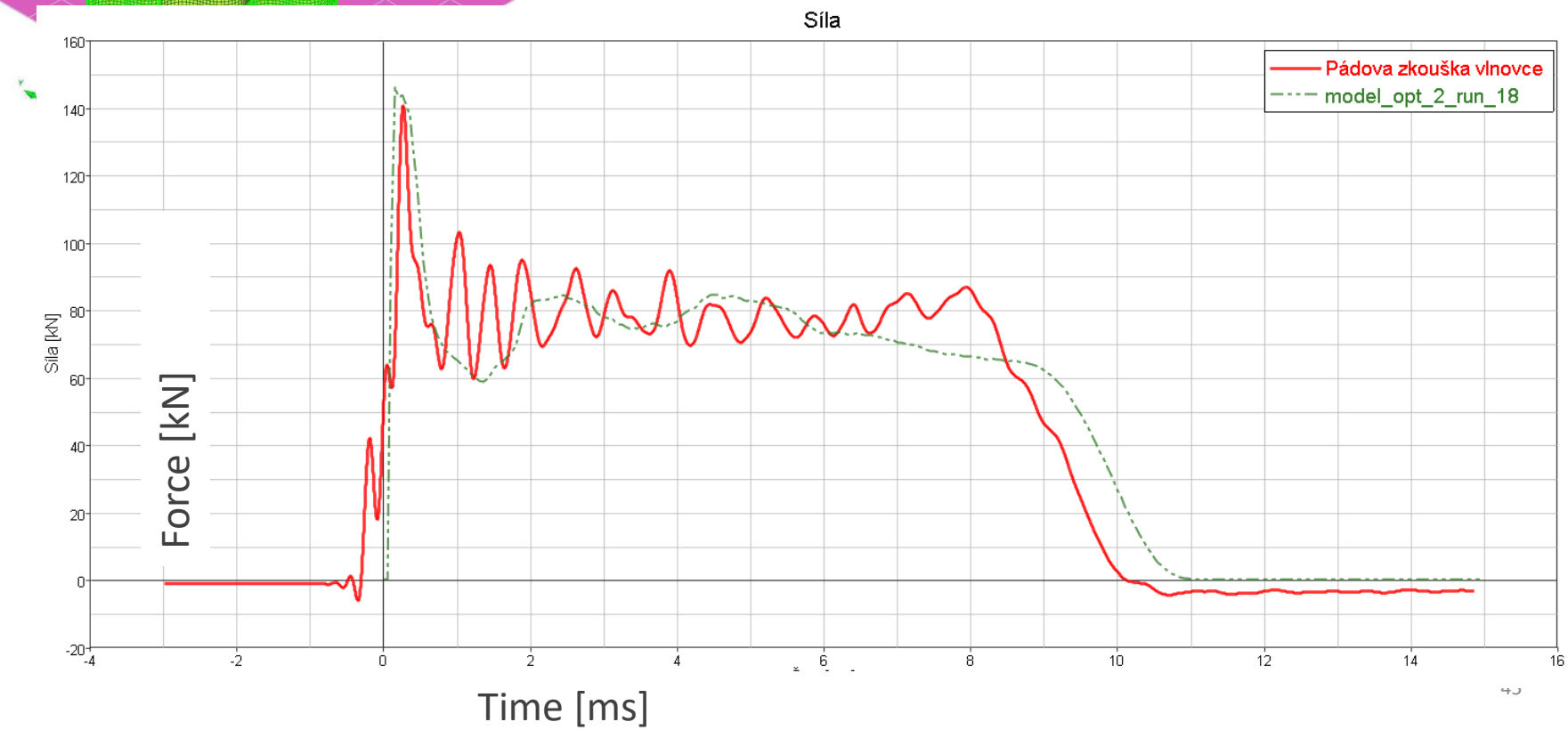
Použití modelu porušení Chang-Chang (Model 54).



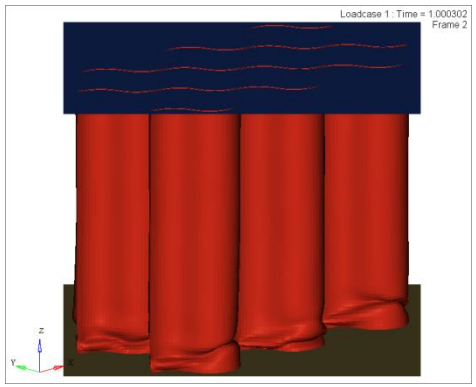
Numerické simulace – ukázka HyperMesh-Radioss

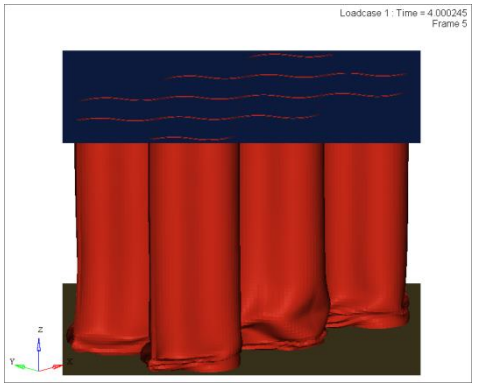


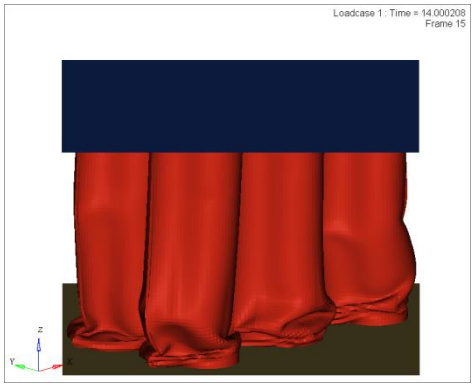
- 3D BRICK 8-node hexa-elementy
- material data: HyperCrash module (Law14 COMPOSO)

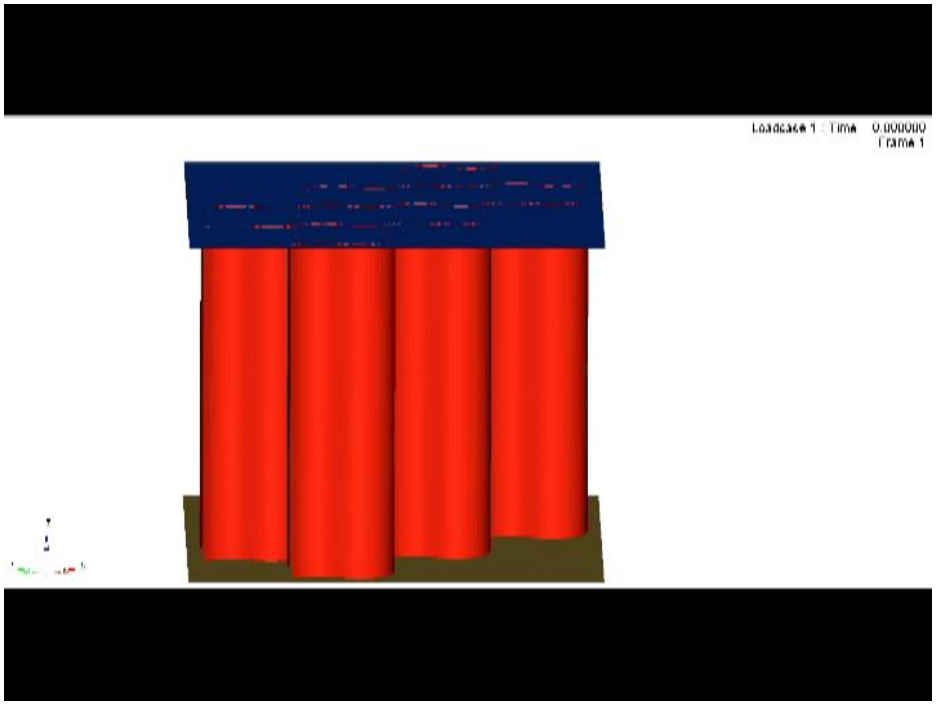


Numerické simulace – ukázka HyperMesh-Radioss





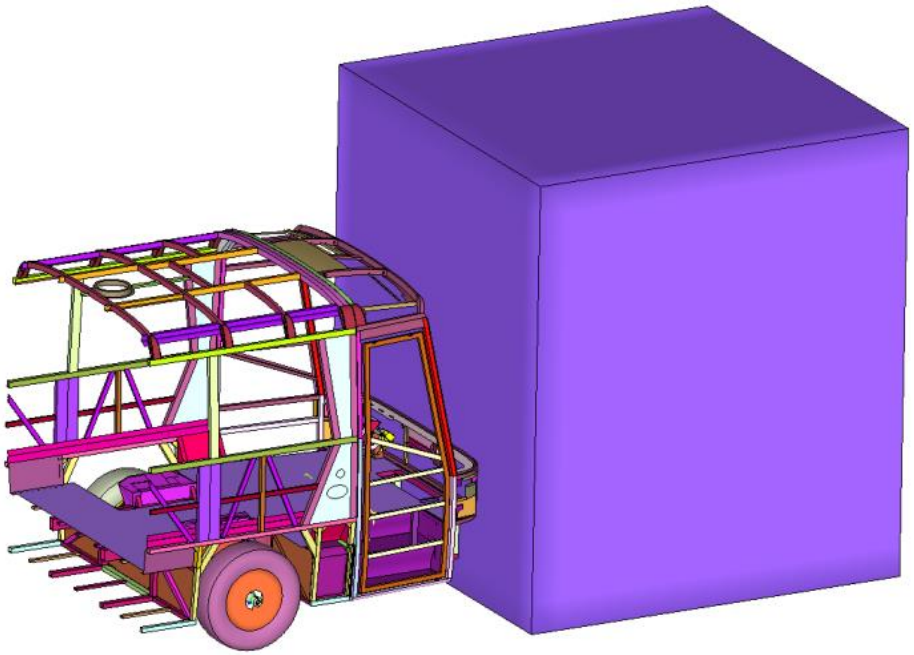


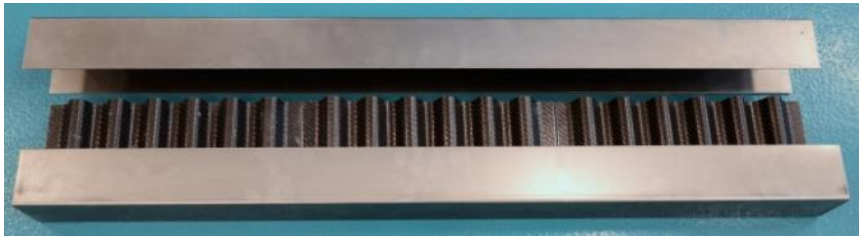


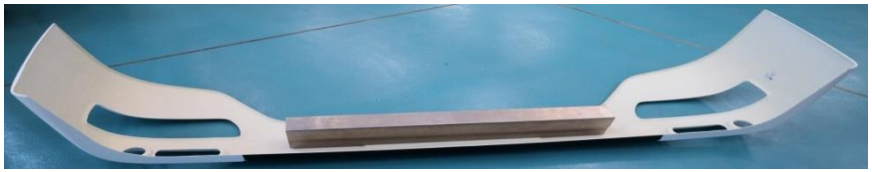
Simulace nárazu autobusu s absorpčním nárazníkem

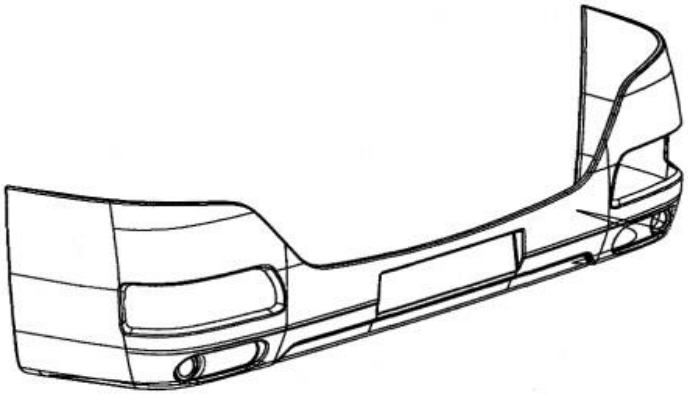
- Simulace na celé struktuře karoserie v PamCrash software.

- Deformační prvky byly inmplementovány do předního nárazníku
- Simulace nárazu do pevné překážky se dvěma rychlostmi 20 and 30 km/hod



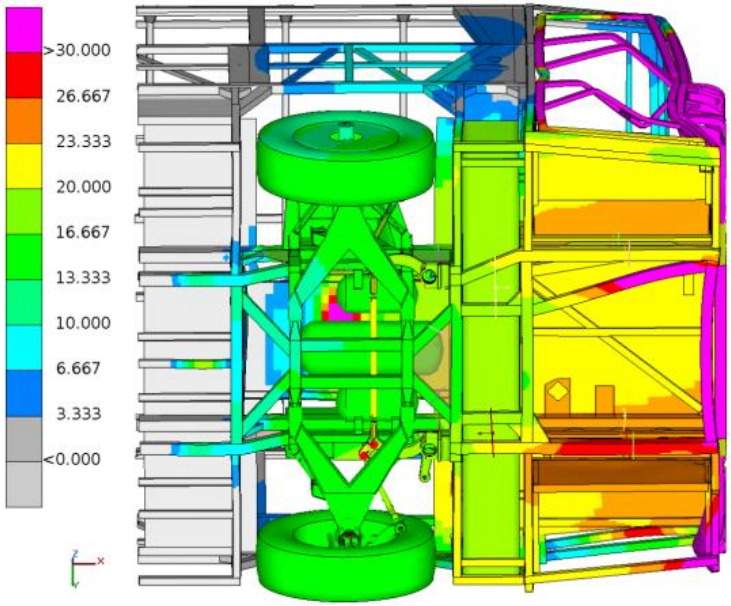




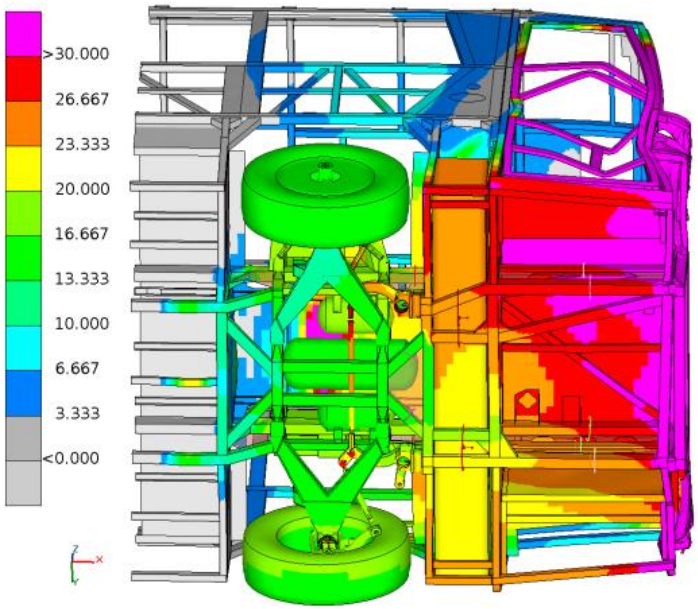


Simulace nárazu autobusu s absorpčním nárazníkem

- Výsledky ukázaly schopnost absorpce energie nízkoenergetického nárazu.
- Základní konstrukce zůstala nepoškozena při v= 20 km/hod a při v=30 km/hod byl deformován pouze první blok rámu podvozku



deformation [mm], 30 km/hour with the absorber



deformation [mm], 30 km/hour without the absorber

Děkuji vám za pozornost

Acknowledgments:

This work was supported by the

Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic in the framework of project No. FR-TI1/290, FR-TI4/317,

Technology Agency of the Czech Republic. No TA03010209,

Grant Agency of the Czech Technical University in Prague, grant No. SGS16/214/OHK2/3T/12