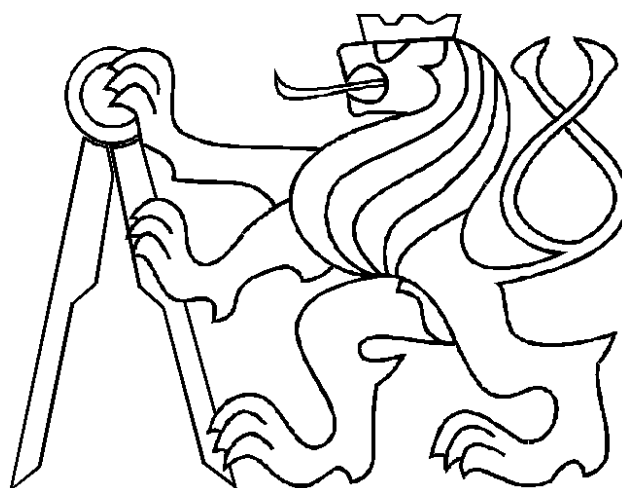


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



**Experimentální a výpočetní charakteristika voštinových sendvičů s inserty**

Vedoucí diplomové práce

Ing. Karel Doubrava, Ph.D.

Vypracoval

Bc. Jaroslav Beneš

Praha 2016

## Anotační list

**Jméno autora:** Jaroslav Beneš

**Název DP:** Experimentální a výpočetní charakteristika voštinových sendvičů s inserty

**Anglický název DP:** Experimental and computational characteristic of honeycomb sandwiches with inserts

**Rok:** 2016

**Obor studia:** Strojní inženýrství, Aplikovaná mechanika

**Ústav:** Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

**Odbor:** Odbor pružnosti a pevnosti

**Vedoucí BP:** Ing. Karel Doubrava, Ph.D.

**Bibliografické údaje:** Počet stran: 60

Počet obrázků: 73

Počet tabulek: 46

Počet grafů: 79

Počet příloh: 34

**Klíčová slova:** voštinový sendvič, insert, čtyř bodový ohyb, delaminace, MKP, CZM

**Keywords:** honeycomb sandwich, insert, four point bending, delamination, FEM, CZM

**Anotace:** Práce se zabývá chováním voštinových sendvičů, jejichž konfigurace se často vyskytuje v interiérových aplikacích dopravních prostředků. Hlavním zaměřením je experimentální a numerické ověření ohybové tuhosti a tuhosti insertových spojů, namáhaných v různých směrech. Byly navrženy numerické modely pro možnosti simulování jednotlivých zatížení, které vykazovaly při lineárním elastickém zatěžování velmi dobrou shodu s experimentálními výsledky. Na základě prvního módu porušení při vytržení insertového spoje byl navržen model s řízenou delaminací pomocí příkazu napsaného v programu ANSYS Workbench 16.1. Tímto postupem byla simulována ztráta tuhosti insertového spoje, která v první fázi vykazovala dobrou shodu s experimentem.

**Abstract:** The diploma thesis focuses on the behaviour of the sandwich honeycombs whose configurations are used in interior applications of the different vehicles. The main focus is the experimental and numerical verification of the bending stiffness and the insert joints stiffness for different loading directions. The numerical models were designed for the simulating of the various load options that showed a very good agreement with experimental results for the linear elastic loading. For the first mode of the insert joints failure were designed model with the program controlled delamination using the ANSYS Workbench 16.1. This procedure simulates the loss of the insert joints stiffness which in the first phase showed a good agreement with experiment.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

Nemám žádný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech související s právem autorským a o změně některých zákonů (Autorský zákon).

V Praze dne .....

Podpis .....

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování panu Ing. Karlu Doubravovi, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Průchovi a Ing. Miroslavu Vlčkovi za zprostředkování a pomoc při výrobě zkušebních vzorků. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Nedavaškovi za vstřícný přístup a pomoc při psaní diplomové práce. Poděkování v neposlední řadě také patří mé rodině a přítelkyni za jejich trpělivost a morální podporu.

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Sendvičové struktury .....	2
2.1	Skladba.....	2
2.2	Materiály.....	3
2.2.1	Prepregy [3, 4, 7, 13] .....	3
2.2.2	Voštinové jádro sendviče.....	5
2.2.3	Objemová výplň jádra a lepidlo.....	6
2.3	Konstrukční spoje používané pro sendvičové struktury .....	7
2.3.1	Inserty [9, 10, 30, 31, 35] .....	7
2.3.1.1	Typické insertové spoje.....	9
2.3.1.2	Zatížení přenášená inserty .....	11
2.3.1.3	Poruchové módy při tahovém zatížení.....	12
2.4	Rešerše literatury .....	13
3	Návrh vzorků .....	14
3.1	Geometrie vzorků .....	16
3.1.1	Vzorky pro čtyř bodový ohyb.....	16
3.1.2	Určení minimálního průměru vyplnění jádra [31].....	16
3.1.3	Vzorky pro vytržení ve směru osy insertu.....	18
3.1.4	Vzorky pro vytržení kolmo na osu insertu .....	19
4	Výroba vzorků .....	20
5	Mechanické zkoušky vzorků .....	24
5.1	Popis použitého zařízení .....	24
5.2	Konfigurace testu pro čtyř bodový ohyb .....	24
5.3	Konfigurace testu pro vytržení ve směru osy insertu .....	25
5.4	Konfigurace testu pro vytržení kolmo na směr osy insertu .....	26
5.5	Popis módů porušení.....	27

5.6	Postup vyhodnocení experimentálních výsledků.....	28
5.7	Výsledky zkoušek .....	29
5.7.1	Výsledky zkoušek čtyř bodového ohybu.....	30
5.7.2	Výsledky zkoušek vytržení ve směru osy insertu.....	31
5.7.3	Výsledky zkoušek vytržení kolmo na osu insertu .....	33
6	Numerické řešení sendvičových struktur .....	36
6.1	MKP model s vrstvenými 2D elementy.....	37
6.2	MKP model s objemovými elementy .....	38
6.3	MKP model s detailním popisem jádra.....	40
6.4	Výpočet čtyřbodového ohybu .....	43
6.5	Výpočet vytržení ve směru osy insertu.....	44
6.6	Výpočet vytržení kolmo na směr osy insertu.....	47
7	Nelineární simulace .....	48
7.1	Návrh materiálů pro nelineární analýzu.....	49
7.1.1	Nelineární výpočet vytržení ve směru osy insertu.....	50
7.1.2	Nelineární výpočet čtyř bodového ohybu.....	52
7.2	Nelineární výpočet se započítáním delaminace .....	54
8	Závěr.....	59
9	Přílohy .....	61
9.1	Výsledky testu s označením: 4PB_01 .....	61
9.2	Výsledky testu s označením: 4PB_02.....	63
9.3	Výsledky testu s označením: 4PB_03.....	65
9.4	Výsledky testu s označením: 4PB_04.....	67
9.5	Výsledky testu s označením: 4PB_05.....	69
9.6	Výsledky testu s označením: 4PB_06.....	71
9.7	Výsledky testu s označením: 4PB_07.....	73

9.8	Výsledky testu s označením: 4PB_08.....	75
9.9	Výsledky testu s označením: 4PB_09.....	77
9.10	Výsledky testu s označením: PO_01.....	79
9.11	Výsledky testu s označením: PO_02.....	80
9.12	Výsledky testu s označením: PO_03.....	81
9.13	Výsledky testu s označením: PO_04.....	82
9.14	Výsledky testu s označením: PO_05.....	83
9.15	Výsledky testu s označením: SH_01.....	84
9.16	Výsledky testu s označením: SH_02.....	85
9.17	Výsledky testu s označením: SH_03.....	86
9.18	Výsledky testu s označením: SH_04.....	87
9.19	Výsledky testu s označením: SH_05.....	88
9.20	Výsledky testu s označením: SH_06.....	89
9.21	Výsledky testu s označením: SH_07.....	90
9.22	Výsledky testu s označením: SH_08.....	91
9.23	Výsledky výpočtu s označením: 4PB_03.....	92
9.24	Výsledky výpočtu s označením: 4PB_06.....	94
9.25	Výsledky výpočtu s označením: 4PB_09.....	96
9.26	Výsledky výpočtu s označením: PO_03.....	98
9.27	Výsledky výpočtu s označením: SH_03.....	99
9.28	Prepregy .....	100
9.28.1	PHG600-44-50 (výrobce Gurit) [15].....	100
9.28.2	PHG600-68-37 (výrobce Gurit) [20].....	101
9.29	Voštinové jádro: ECA 3,2 – 48 (výrobce EURO-COMPOSITES) [25].....	102
9.30	Plnič: EC 631 FST Epoxy Void Filler (výrobce EURO-COMPOSITES).....	102
9.31	Lepidlo: EA 9396 AERO Epoxy Paste Adhesive .....	102



9.32	Materiály použité pro numerické analýzy .....	103
9.32.1	Materiály pro model s vrstvenými 2D elementy .....	103
9.32.2	Materiál pro model s objemovými elementy .....	103
9.32.3	Materiál pro model s detailním popisem jádra .....	104
9.32.4	Materiály pro nelineární výpočet .....	104
9.33	Insert NAS 1836-08-11 .....	105
9.34	Zdrojový kód pro řízené vypnutí pevného kontaktu .....	105
9.34.1	Vypnutí kontaktu po prvním kroku výpočtu .....	105
9.34.2	Vypnutí kontaktu při dosažení určité hodnoty ekvivalentního napětí .....	106
10	Seznam použité literatury .....	107

## Seznam označení

Označení	Jednotky	Popis
$T$	mm	Měřená tloušťka vzorku
$T1, T3$	mm	Tloušťka vzorku měřená na obou koncích
$TS$	mm	Tloušťka vzorku měřená v jeho středu
$\check{S}$	mm	Měřená šířka vzorku
$\check{S}1, \check{S}2$	mm	Šířka vzorku měřená na obou koncích
$\check{S}S$	mm	Šířka vzorku měřená v jeho středu
$L$	mm	Měřená délka vzorku
$L_{ax}$	mm	Měřená vzdálenost mezi osami šroubů
$D$	mm	Charakteristický rozměr vzorku
$\check{S}$	mm	Charakteristický rozměr vzorku
$V$	mm	Charakteristický rozměr vzorku
$b_p$	mm	Efektivní poloměr plniče
$b_n$	mm	Vzdálenost mezi buňkou s jednotkovou tloušťkou stěny a středem insertu
$n$		Počet
$b_i$	mm	Poloměr hlavy insertu
$Sc$	mm	Velikost buňky voštinového jádra
$\bar{X}$		Střední hodnota
$x_i$		Hodnoty členů statistického souboru
$S^2$		Rozptyl statistického souboru
$s$		Směrodatná odchylka
$\vartheta$		Počet stupňů volnosti Studentova rozdělení
$t_\alpha$		Kritická hodnota Studentova rozdělení
$\alpha$		Hladina spolehlivosti daného pravděpodobnostního rozdělení
$P$	N/mm <sup>2</sup>	Normálové kontaktní napětí
$K_n$	N/mm	Normálová kontaktní tuhost
$u_n$	mm	Vzdálenost kontaktních ploch
$\bar{u}_n$	mm	Vzdálenost kontaktních ploch při maximálním normálovém napětí
$u_n^c$	mm	Vzdálenost kontaktních ploch při úplné delaminaci
$d_n$		Delaminační parametr

Ostatní veličiny a indexy jsou vysvětleny v textu práce

# 1 Úvod

Výzkum a vývoj kompozitních materiálů je od druhé poloviny 20. století hnán především kosmickým a leteckým průmyslem. V těchto průmyslových odvětvích jsou hlavními parametry daných struktur: co nejnižší hmotnost při zachování vysoké tuhosti, dostatečná pevnost a odolnost vůči únavě. Tyto požadavky ovšem zvyšují tlak na správný návrh dané konstrukce a použité materiály.

Tato práce vznikla na základě požadavku společnosti Inter Informatics, která se mimo jiné zabývá návrhem interiérů pro aplikaci v letectví, a to zejména pro společnost Airbus. Veškeré konstrukční prvky v letectví musí být certifikované, což znamená, že konstrukční návrh musí být podložen výsledky zkoušky nebo výpočtovou zprávou. U velkých dopravních letadel se požadavky na konstrukci řídí specifikací CS-25 (evropská), popřípadě FAR 25 (americká).

Pro stavbu interiérových prvků, jako jsou kuchyňky a různé úložné prostory, našly v posledních letech velké využití sendvičové kompozitní struktury. Volba těchto materiálů je v tomto případě velmi vhodná, jelikož se sendvičové struktury vyznačují dobrým poměrem tuhosti a hmotnosti. Účelem této práce je zkoumání materiálů užívaných pro sendvičové struktury, které jsou přímo certifikované pro použití v interiéru letadel společnosti Airbus. Bližší poznání vlastností těchto materiálů by mělo pomoci k co nejlepšímu konstrukčnímu návrhu, který bude mít co nejnižší hmotnost a bude splňovat všechny požadavky pro certifikaci.



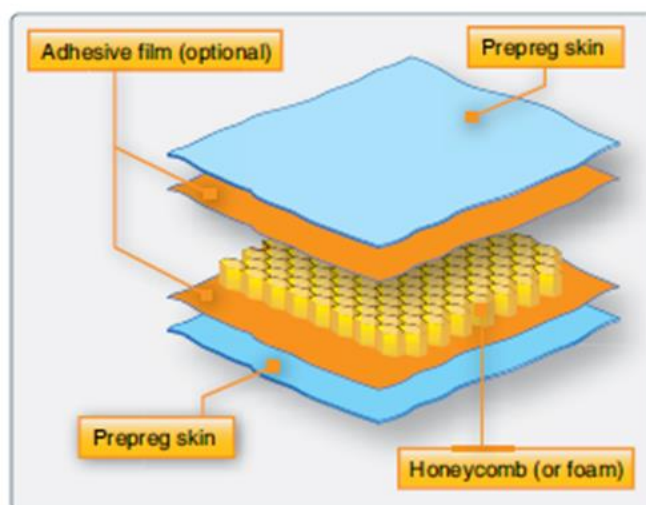
**Obr. 1.1:** Ukázky interiérových aplikací s využitím sendvičových struktur [12, 14]

## 2 Sendvičové struktury

Sendvičové struktury jsou moderními konstrukcemi s vysokou ohybovou tuhostí a pevností při nízké hmotnosti, ale mají i řadu dalších předností. Uplatnění nacházejí nejen v letecké a dopravní technice, ale i v ostatních odvětvích průmyslu.

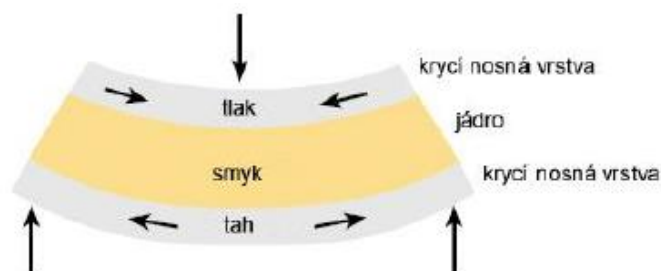
### 2.1 Skladba

Sendvičové struktury řadíme k vrstveným konstrukcím. Tyto konstrukce jsou tvořeny rozdílnými typy jednoduchých či složených materiálů různého charakteru, jejichž spojení je vzájemně nerozebíratelné. Účinná struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma vnějšími tenkými vrstvami s vysokou pevností a tuhostí, zatěžovanými tahovými a tlakovými silami, jádrem o relativně malé hustotě přenášejícím smykové síly mezi těmito potahy a adhezivní vrstvou, která je schopna přenosu osových a smykových zatížení mezi jádrem a vnější tuhou vrstvou. Tradiční rozložení vrstev je vidět na Obr. 2.1. Vzniklá konstrukce je velmi tuhá, s vysokou odolností vůči dynamickému namáhání a rázům. [3, 4, 6, 7]



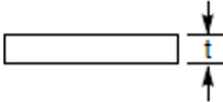
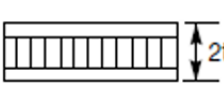
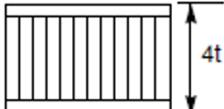
Obr. 2.1: Základní vrstvy sendviče [6]

Namáhání v jednotlivých vrstvách je vidět na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Namáhání v jednotlivých vrstvách sendvičové struktury [7]

Vložením jádra mezi vnější tenké vrstvy dochází ke zvýšení průřezové charakteristiky dané konstrukce, což velmi zlepšuje její odolnost vůči ohybu a vzpěru a to při malém nárůstu hmotnosti. Tento poznatek je názorně zobrazen v Tab. 2.1, kde je ukázáno porovnání ohybové odolnosti konstrukce s vloženým jádrem oproti konstrukci bez jádra. Výsledné hodnoty v Tab. 2.1 byly získány analytickým výpočtem pro ohyb nosníku. [3, 4]

	Celistvý materiál	Sendvičová struktura	Sendvičová struktura s vyšším jádrem
			
Relativní tuhost	100	700 7 krát tužší	3700 37 krát tužší
Relativní pevnost	100	350 3,5 krát pevnější	925 9,25 krát pevnější
Relativní hmotnost	100	103 3% navýšení váhy	106 6% navýšení váhy

**Tab. 2.1:** Srovnání nárůstu ohybové tuhosti oproti nárůstu hmotnosti při nárůstu tloušťky jádra [5]

## 2.2 Materiály

U sendvičových struktur se můžeme setkat s celou řadou jak kovových, tak i nekovových materiálů. Jako jádra se uplatňují zejména lehčené PVC, PUR a PS pěny, dále pak voštiny především s hexagonální strukturou, případně jádra z korku či balzy. Nosné vnější vrstvy sendvičů jsou s jádrem obvykle spojeny syntetickými lepidly na bázi epoxidových, vinylesterových, fenolických a nenasycených polyesterových pryskyřic. Na venkovní vrstvy sendvičů se nejčastěji používají lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny, pro některé účely i kovové fólie. S ohledem na zaměření práce, kdy předmětem zájmu jsou sendviče s jádrem z nomexové voštiny a potahy z prepregů s výztuží ze skelné tkaniny, je těmto věnována pozornost v následujících odstavcích. [3, 7]

### 2.2.1 Prepregy [3, 4, 7, 13]

Prepregy jsou pryskyřicí před-impregnované vrstvené materiály tvořené výztužnými vlákny, nebo tkaninou. Výraznou výhodou oproti jiným technikám výroby je, že pryskyřice prosycující vlákna nebyla vytvrzena do konečného stavu. Díky této vlastnosti může probíhat vrstvení a skladba požadovaných profilů až v konečné fázi výroby, jelikož odpadá složitý

proces prosycování výztuže pojivem. Finální vytvrzení konstrukcí složených z prepregů může probíhat například v autoklávu, nebo ve vytvrzovací peci za pomoci vakua.

Výztuže prepregů mohou být jednosměrné nebo vícesměrné. Úkolem výztuže v kompozitním materiálu je především zajistit mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost a tuhost, avšak i elektrické vlastnosti závisejí na výztuži, a proto typ výztuže má klíčový vliv na vlastnosti profilu. Formy výztuže mohou být v podobě vláken, rohoží, rovingů, tkanin nebo kombinovaných výztuží. Nejčastěji užívané typy vláken jsou: uhlíková vlákna, skleněná vlákna, aramidová vlákna apod.

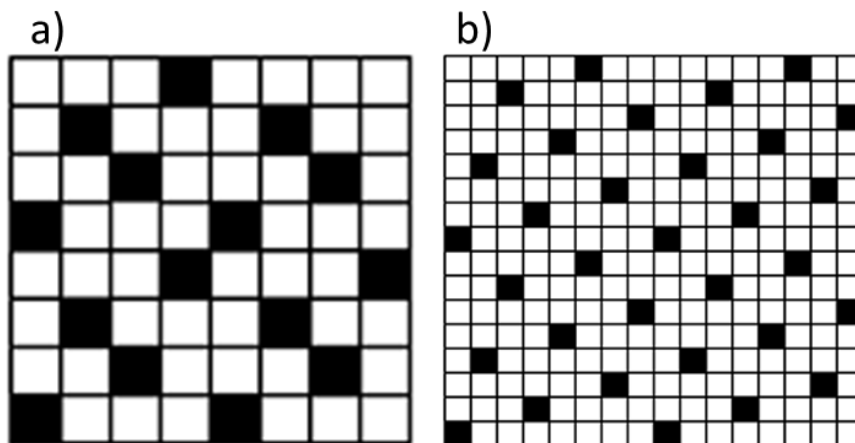
Spojité složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken apod. Nejvíce používané pryskyřice jsou epoxidová, fenolická a polyamidová.

Prepregy jsou velmi vhodné pro výrobu složitých součástí a to jak pro kusovou, tak pro sériovou výrobu. Největší výhodou je stálost mechanických a materiálových vlastností po celé ploše.

Pro potřeby této práce se nejvíce zaměříme na prepreg vyztužený tkaninou ze skelných vláken prosycený fenolickou pryskyřicí.

### **Prepreg vyztužený tkaninou ze skelných vláken prosycený fenolickou pryskyřicí**

Tkaniny se vždy skládají nejméně ze dvou pramenů (rovingů), které jsou společně tkány dohromady a tvoří osnovy těchto tkanin. U použitých prepregů se vyskytovaly osnovy tkanin „Crowfoot“ a „8 Harness Satin“, které jsou zobrazeny na Obr. 2.3.



**Obr. 2.3:** Osnovy tkanin a) Crowfoot b) 8-Harness Satin [8]

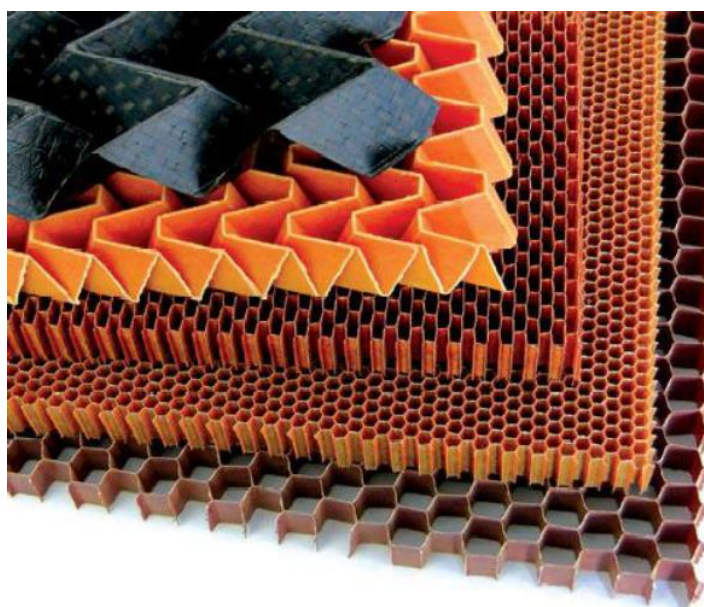
Výztuž je tvořena skelnými vlákny, které se vyrábí tažením z trysek z roztavené skloviny ve sklářské peci. Výsledná vlákna jsou sduřována do ohebných spřádacích vláken. Pro výrobu použité tkaniny bylo využito tzv. E-skloviny, která je výborným izolantem s vysokou prostupností prozáření. Dále se tento materiál vyznačuje amorfni strukturou s isotrofním chováním.

Vlákna jsou prosyceny termosetovou pryskyřicí, jejíž vlastnosti jsou: nízká viskozita, tekutost při normální teplotě, snadné zpracování, smáčí a lépe prosycuje vlákna. Jedná se o fenolickou pryskyřici, která má výbornou odolnost vůči vysokým teplotám, splňuje požadavky na toxicitu a dýmavost. Díky těmto parametrům je tato matrice velmi vhodná pro využití v interiérových aplikacích dopravních prostředků.

### 2.2.2 Voštinové jádro sendviče

V praxi je velké množství materiálů, které jsou využívány jako jádra sendvičových struktur. Využívány jsou polymerní pěny a různé druhy dřeva. Pro potřeby této práce se nejvíce zaměříme na tzv. jádra voštinové.

Voština je materiál, který se používá jako jádro s různou výškou, velikostí a tvarem buněk v sendvičových kompozitech. Označení voština je odvozeno z podobnosti se šestihlannou strukturou plástve („Honeycomb“). Materiál voštiny je složen z pravidelných n-úhelníků s vysokým štíhlostním poměrem. Pevnost struktury je dána stabilitou stěny voštiny. Z odborné literatury jsou známé také jiné než šestiúhelníkové tvary voštin, např. skládané nebo pyramidové. Příklady tvarových možností voštinových jader jsou vidět na Obr. 2.4. [3, 4, 7]

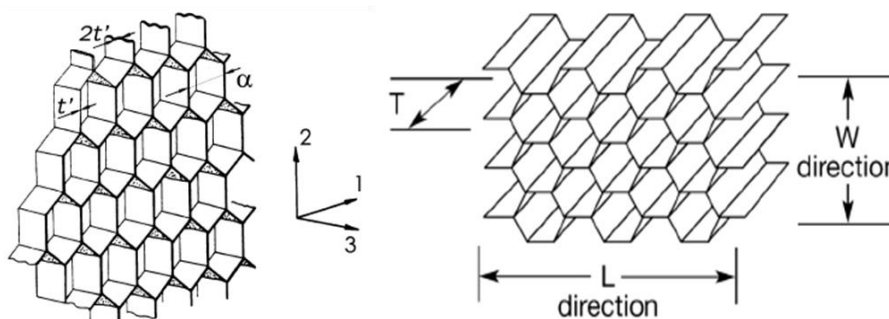


**Obr. 2.4:** Příklady voštinových jader [7]

## Nomexová voština

Nomex voština je vyrobena z papíru Nomex – jde o určitou formu papíru, který je tvořen aramidovým vláknem, někdy se také používá celulózové vlákno. Papírová voština se obvykle ponoří do fenolické pryskyřice, tím vznikne voštinové jádro s vysokou pevností a velmi dobrou odolností proti ohni. U letadel se často používají jako lehké interiérové panely ve spojení s pláštěm pomocí fenolických pryskyřic. Nomex voština se stává stále používanějším materiálem u více namáhaných neleteckých komponentů díky svým výborným mechanickým vlastnostem a nízké hustotě. Další příznivé vlastnosti jsou elektrická a tepelná izolace, chemická stabilita, odolnost proti hoření, odolnost vůči korozi, odolnost vůči rázům a únavovému poškození. Nicméně je podstatně dražší než jiné jádrové materiály. [3, 4, 7]

Nomexová voština vzniká tak, že jsou k sobě lepeny dvě lišty daného tvaru, čímž poté vzniká výsledná šestiúhelníková struktura. Díky této skladbě vykazuje tento typ jádra anizotropní chování vzhledem ke smykové rovině. Podle orientace buněk se rozlišuje orientace směru jádra, a to podélný (L) a příčný (W), které jsou zobrazeny na Obr. 2.5 vpravo. V důsledku lepení jsou v podélném směru (L) dvojnásobné tloušťky stěn buněk, což vede k vyšší tuhosti a pevnosti vůči smyku v tomto směru. Výsledný tvar voštinového jádra je vidět na Obr. 2.5 vlevo. [4, 7]



Obr. 2.5: Výsledná skladba voštinového jádra [4]

### 2.2.3 Objemová výplň jádra a lepidlo

Pro vytvoření insertového spoje ve voštinovém jádru je nutné jeho lokální vyztužení. Toto vyztužení je realizováno vyplněním buněk jádra tzv. plničem. Jedná se o materiál s nízkou hustotou a relativně vysokou pevností odolností, a to převážně v tlaku. Tento materiál je nejčastěji dodáván v podobě pasty, pro dobrou aplikaci a vyplnění buněk jádra, který získá své konečné mechanické vlastnosti vytvrzením v peci. Plnič je nejčastěji vyroben z modifikované epoxidové pryskyřice, jenž splňuje podmínky nehořlavosti, toxicity a dýmavosti. [65]

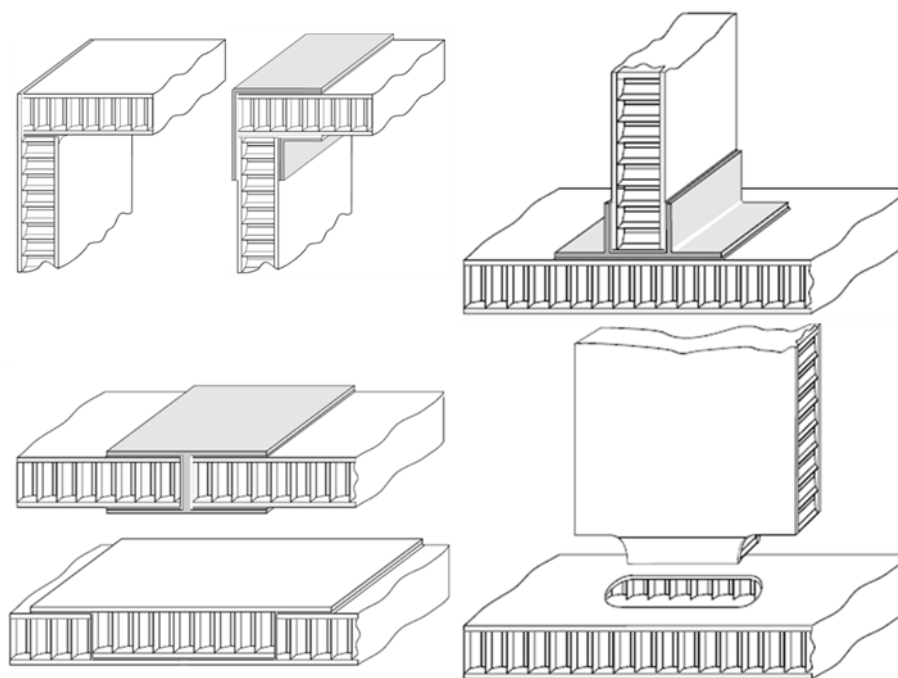


Pro vlepění insertu do prostoru plniče jsou nejčastěji využívána dvousložková epoxydová lepidla, která se vyznačují nízkou hustotou a vysokou pevností.

## 2.3 Konstrukční spoje používané pro sendvičové struktury

Zásadní význam pro úspěšné využití sendvičových struktur je metoda pro přenášení zatížení, které jsou aplikovány do dané konstrukce. Pro sendvičové struktury je charakteristické, že nemohou přenášet koncentrované zatížení, které by mohlo vést k jednomu z módů destrukce měkkého jádra. Na Obr. 1.1 vlevo je vidět ukázka typické konstrukce, která je tvořená ze sendvičových panelů.

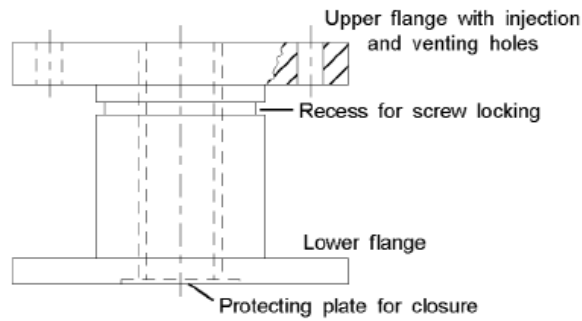
Na Obr. 2.6 jsou zobrazeny jednotlivé možnosti konstrukčních spojů sendvičových panelů. Jedná se především o spoje, které využívají k napojení tažených tvarových profilů. [30]



**Obr. 2.6:** Ukázka příkladů konstrukčních spojů sendvičových panelů [30]

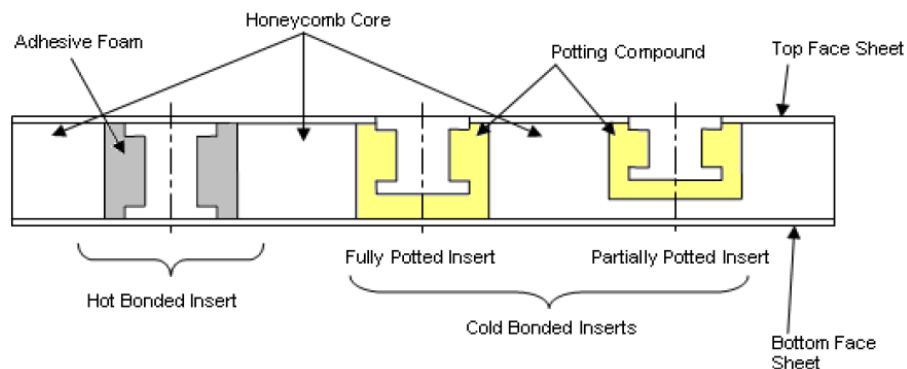
### 2.3.1 Inserty [9, 10, 30, 31, 35]

Na volné plochy sendvičových panelů jsou v leteckých konstrukcích velmi často přichyceny různé přístroje. Z důvodu špatného přenosu bodově koncentrované síly skrz sendvičové jádro musí být tyto místa konstrukčně upraveny a to především rozložením síly do co největší plochy. K tomuto účelu nejčastěji slouží inserty, což jsou závitové nebo průchozí vložky, které se umísťují do sendvičového panelu a mají za účel jeho lokální vyztužení. Typická geometrie insertu je zobrazena na Obr. 2.7. [9, 10, 35]



**Obr. 2.7:** Geometrie insertu [31]

Inserty mohou být rozděleny do dvou základních skupin, a to v závislosti na technologii pro jejich připojení k sendvičové struktuře. První skupinou jsou tzv. tepelně připevněné („Hot bonded“), které jsou do jádra přidány už v průběhu výroby sendviče, a připojení k jádru vzniká v průběhu vytvrzovacího procesu. Druhou skupinou jsou studeně připevněné („Cold bonded“), které jsou vlepovány již do hotového panelu. Oba základní typy insertů jsou zobrazeny na Obr. 2.8. Obě tyto varianty mají společné, že plnič, ve kterém jsou upevněny, slouží k přenesení lokálního zatížení na co největší plochu jádra. Největším rozdílem mezi těmito typy insertů je, že tepelně připevněný insert je připojen k horní i spodní krycí vrstvě a jeho výška je vždy stejná jako výška jádra. [10]



**Obr. 2.8:** Základní typy insertů [10]

Tato práce je zaměřena pouze na testování studeně připevněných insertů, a tudíž už další popis bude zaměřen na tento typ insertů, jehož tvar je zobrazen na Obr. 2.8, kde je žlutě označen.

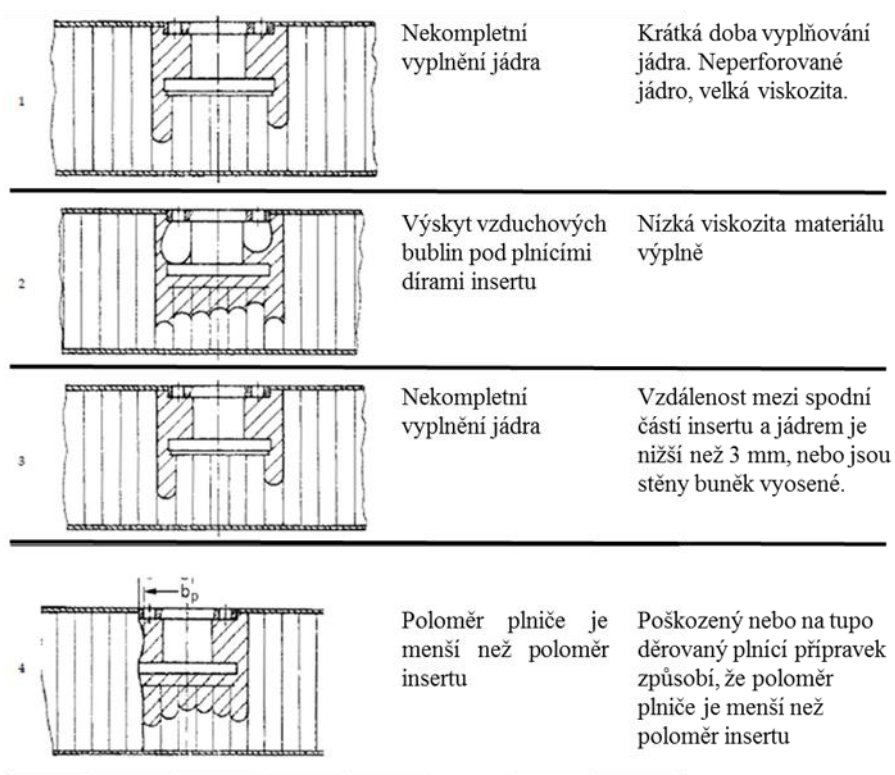
Využití technologie studeně připevněných insertů má tyto výhody [10]:

- Inserty jsou do sendvičového panelu umístěny až v dalším průběhu výroby, což umožňuje reagovat na možné změny v konstrukci.

- Výška insertu není závislá na výšce jádra, tudíž je možné ušetřit hmotnost u sendvičových panelů, které mají vysoké jádro a nejsou u nich vysoké požadavky na přenášené síly.

Nevýhodou ovšem může být vyšší cena, jelikož jsou nutné další práce na již hotovém sendvičovém panelu.

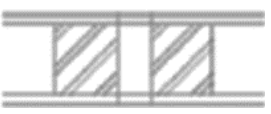
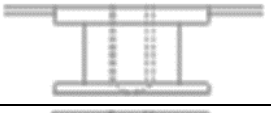
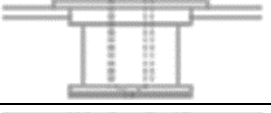

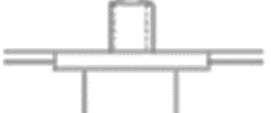

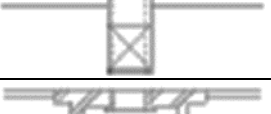





Důležitým faktorem, který může negativně ovlivnit vlastnosti a únosnost spoje, je kvalita a možnosti kontroly vyplnění jádra. Na Obr. 2.9 je možné vidět hlavní výrobní vady, které mohou nastat. Nejběžnější kontrolou kvality výplně jádra je kontrola pomocí rentgenu. [10, 31]



**Obr. 2.9:** Výrobní vady vyplnění jádra [31]

### 2.3.1.1 Typické insertové spoje

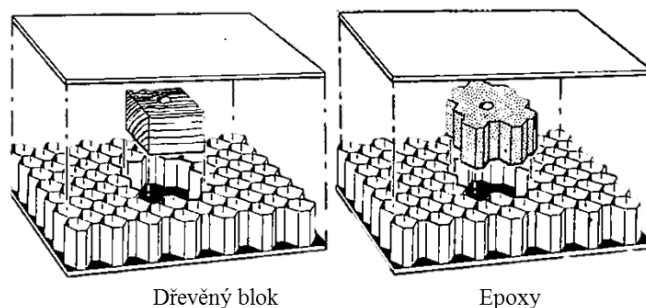
Se zvyšujícím využitím sendvičových konstrukcí se rozvíjela i variabilita insertových spojů. Typické insertové spoje a jejich základní popis jsou zobrazeny v Tab. 2.2.

Typ	Tvar	Průměr [mm]	Materiál	Zapuštění	Norma	Komentář
Typ A: Připevněný v průběhu výroby sendviče						
1		17-30	Hliník	Plně zapuštěný s plničem jádra	-	Pouze pro nízké profily jádra
Typ B: Připevnění za použití plniče jádra (nebo ekvivalentní nestandardizovaný postup)						
2		11-22	Hliník (Ocel) (Titan)	Částečně nebo plně zapuštěný	NAS 1832 NSA 5135 PA 3825	Nejvíce užívaný typ
3		11-22	Hliník	Částečně nebo plně zapuštěný	-	Zřídka využívaný typ
4		11-14	Ocel Titan	Plně zapuštěný	NAS 1832 NSA 5071 PAN 3827	Použití se závitem i bez
5		6-14	Ocel Titan	Částečně nebo plně zapuštěný	ERNO No. R 000/095.000	Zřídka využívaný typ
6		3-6	Hliník	Částečně nebo plně zapuštěný	-	Jen pro nízká zatížení
7		19-70	Hliník	Částečně nebo plně zapuštěný	-	Pro vysoká zatížení
8		19-25	Insert: hliník Matice: titan	Částečně nebo plně zapuštěný	NAS 1835 NSA 5072 PAN 3829	Možnost výměny a použití plovoucí matice
9		7-20	Trubice z karbonových vláken	Trubice vlepená do jádra	-	-
10		-	-	-	-	-
Typ C: Mechanicky upnutý nebo přišroubovaný						
11		14-22	Hliník (Ocel) (Titan)	-	TAN 16485	Nízká únosnost na vytržení, pokud není připevněn k jádru
12		14-22	Hliník (Ocel) (Titan)	-	-	-

**Tab. 2.2:** Přehled insertových spojů [35]

### 2.3.1.2 Zatížení přenášená inserty

Dříve se pro roznesení zatížení po větší ploše a vytvoření dostatečné pevnosti využívaly výplně či náhrady voštinového jádra, viz Obr. 2.10. Tyto postupy měly ovšem za následek degradování hlavní výhody této struktury a to přidáváním přebytečné hmotnosti navíc. [9, 10]

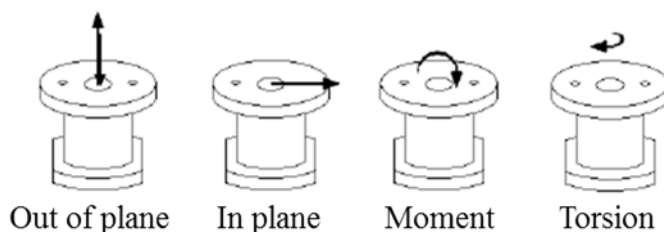


**Obr. 2.10:** Typické výplně nahrazující voštinové jádro [9]

Inserty jsou navrhované s ohledem na pět základních typů zatížení, které jsou uvedené na Obr. 2.11. Jsou to:

- Zatížení normálové k rovině sendvičového panelu směřující ven (zatížení tahové)
- Zatížení normálové k rovině sendvičového panelu směřující dovnitř (tlakové zatížení)
- Zatížení jdoucí vodorovně k rovině sendvičového panelu (smykové zatížení)
- Ohybové zatížení
- Zatížení krutem

Tyto zatížení se mohou vyskytovat samostatně nebo ve vzájemných kombinacích. Pro návrh insertového spoje jsou nejdůležitější první tři zmiňovaná namáhání, jelikož tyto spoje by měly být navrženy tak, aby nepřenášely ohyb nebo krut. Jedinou výjimkou je zatížení krutem, které vzniká od předpětí daného spoje. Momentové zatížení může být konstrukčně vyřešeno tak, že se ohybový moment rozloží na skupinu insertů a tudíž bude rozložen na normálové síly. [9, 10, 31]



**Obr. 2.11:** Typická zatížení na insert [35]

Pro určení celkové únosnosti je tudíž důležité určit únosnost spoje pro zatížení tahové, tlakové a smykové.

### 2.3.1.3 Poruchové módy při tahovém zatížení

V publikacích [10, 31] jsou ukázány rozhodující módy porušení ovlivňující celkovou pevnost spoje o stejné výšce plniče. Na Obr. 2.12 je vidět, že hlavním činitelem, který ovlivňuje pevnost spoje, je výška jádra sendviče. Na základě průběhu křivky popisující statickou únosnost spoje můžeme módy porušení rozdělit do tří skupin.

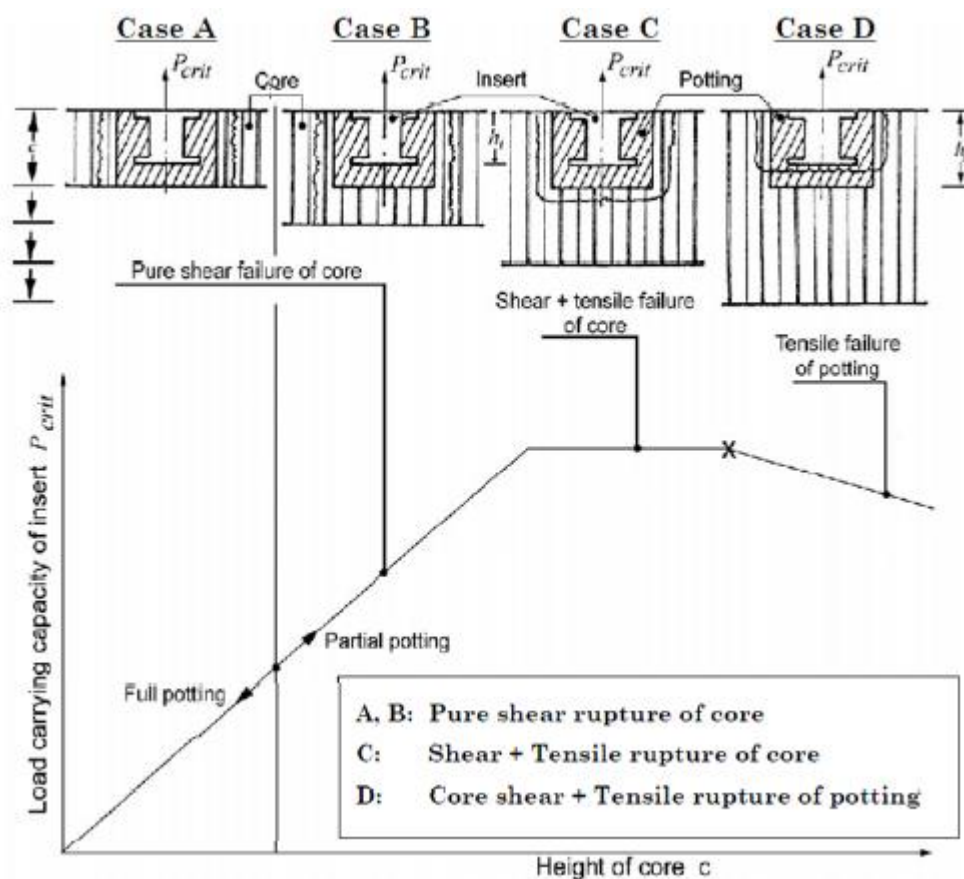
První část začíná v místě, kde je výška jádra stejná jako výška plniče. Zde dochází k porušení systému v důsledku smykového porušení jádra, které se nachází v okolí plniče. Z toho vyplývá, že při této konfiguraci je statická únosnost spoje rovna smykové pevnosti jádra. Tento mód poruchy odpovídá případu A a B na Obr. 2.12.

Únosnost spoje poté roste kvazi-lineárně s výškou jádra, jelikož se tím zvyšuje plocha, kterou je smykové zatížení přenášeno. Se zvětšující se výškou jádra se z úplného vyplnění jádra stává částečné vyplnění, což zapříčiňuje, že jádro pod plničem přenáší tahové namáhání. Jakmile výška jádra vůči výšce plniče dosáhne kritické hodnoty, kdy tahové namáhání pod plničem dosáhne tahové pevnosti jádra, tak dochází k druhému módu porušení, což na Obr. 2.12 odpovídá případu C. Druhý mód porušení je tedy kombinací smykového porušení jádra v okolí plniče a tahového porušení jádra pod plničem. Závislost statické únosnosti spoje na kombinaci smykového a tahového namáhání způsobuje, že se statická únosnost spoje dále s výškou jádra nezvyšuje.

Vrstva plniče, který se nachází pod insertem, je zatížen tahovým namáháním, které se s výškou jádra zvyšuje. Jestliže namáhání překročí pevnost v tahu pro materiál plniče ještě před tím, než dojde k tahovému porušení jádra, tak dochází k porušení přímo v plniči. Tento typ poruchy se vyskytuje pouze u jader s vysokou pevností. Na Obr. 2.12 pro případ D je poté vidět, že při dosažení této konfigurace, už statická únosnost spoje neroste, ale mírně klesá. Je to zapříčiněno tím, že s dosažením této výšky se plocha jádra kolem plniče zvýší natolik, že je tužší a tudíž pak plnič přenáší větší tahové namáhání.

Vnější poloměr plniče má velmi významný vliv na statickou únosnost spoje pro všechny módy porušení, které byly zmíněny v předchozím odstavci. Je to zapříčiněno tím, že tímto poloměrem je určena plocha okolí plniče, která distribuuje smykové namáhání a dále určuje plochu pod plničem, kde jsou přenášena tahová namáhání. [10, 31, 35]

Tyto předpoklady obvyklého chování insertů jsou v kapitole 5.7.2 porovnány se získanými experimentálními výsledky.



Obr. 2.12: Módy porušení v závislosti na výšce jádra [31]

## 2.4 Rešerše literatury

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, základy návrhu insertových spojů jsou popsány v [31]. Tento dokument je zaměřený na studeně připevněné inserty a možnosti jejich konstrukčních návrhů. Jsou zde popsány možnosti analytických postupů návrhu a postupy pro experimentální vyhodnocení daných spojů.

V článku [11] jsou popsány způsoby testování spoje v ose a kolmo na osu inserty. Na základě experimentálních výsledků je určen vzorec pro analytické ověření statické pevnosti spoje pro oba případy zatížení. Dále je v práci popsán numerický model, který vykazuje velmi dobrou shodu s výsledky experimentu.

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, celková únosnost spoje je závislá na volbě materiálu, výšce jádra a dalších parametrech. V práci [40] jsou uvedeny experimentální výsledky pro osové zatížení insertu pro různé konfigurace složení sendvičové struktury. Z výsledků této práce je tedy možné určit, na kterých parametrech závisí výsledná únosnost spoje nejvíce.

Články [45, 50] se zabývají studiem přímo nomexového voštinového jádra a na základě výsledků těchto prací je vidět jeho chování a charakteristiky. Tyto poznatky jsou důležité pro pochopení sendvičové struktury jako celku. Výsledné materiálové hodnoty, které byly ověřeny numerickou analýzou, a mohou být dále použity jako výchozí pro optimalizaci tuhosti sendvičové struktury.

Detailnější možnosti numerických simulací jsou popsány v [55, 60], přičemž [55] je zaměřena na nelineární chování (změna tuhosti v průběhu zatěžování) sendvičové struktury s insertovým spojem a v [60] se zaměřují na simulaci detailního modelu (voštinové jádro vytvořeno pomocí 2D elementů), díky čemuž může být studována například ztráta stability jádra.

Podrobný popis ohybové zkoušky a různých metod měření je uveden v [9]. Jsou zde detailně popsány experimentální výsledky, které byly získány ze vzorků o různých délkách. Na základě těchto výsledků je odvoditelná závislost mezi délkou vzorku a výsledným módem porušení.

### **3 Návrh vzorků**

V této kapitole bude popsán návrh vzorků pro získání reálných údajů pevnosti a tuhosti daných sendvičových struktur. Tyto data dále poslouží k nastavení a upřesnění numerické analýzy daných sendvičových struktur.

Pro návrh vzorků a jednotlivých typů experimentů byla použita dostupná literatura řešící obdobnou problematiku. Základní údaje, které bylo nutno najít: rozměry vzorků pro jednotlivé typy zkoušek, minimální počet vzorků pro možnost dostatečného vyhodnocení experimentu, způsob uchycení do zkušebního stroje, aby mohly být navrženy potřebné přípravky.

Pro účely testování byly navrženy tři typy zkoušek: čtyř bodový ohyb, vytržení insertu ve směru osy insertu a vytržení ve směru kolmém na osu insertu. Zkoušky provedené na vzorcích s inserty, slouží k určení výsledné pevnosti daného spoje ve dvou různých rovinách.

Aby testované vzorky postihly co největší rozsah možných kombinací navržené sendvičové struktury, byly navrženy tři různé varianty skladby potahu, kdy se jedná o prepregy, které se skládají z tkaniny ze skelných vláken a jsou prosyceny fenolickou pryskyřicí PH600. Materiálové vlastnosti jsou uvedeny v Příloze 9.28. Voština viz Příloha 9.29, byla použita ve dvou různých výškách. První varianta měla výšku 10 mm a jádro bylo vyplněno v celé výšce. Druhá varianta voštiny měla výšku 30 mm a plničem byla vyplněna zhruba do poloviny výšky



jádra. Pro zkoušky čtyř bodovým ohybem a vytržením kolmo na osu insertu byly vyrobeny varianty konfigurace v závislosti na směru buněk jádra (směr L a W). Byla použita nomexová voština s velikostí buňky 3,2 mm a hustotou 48 kg/m<sup>2</sup>. Pro insertové spoje byl použit insert NAS 1836-08-11 viz Příloha 9.33. Jako plnič voštinového jádra byl použit materiál z modifikované epoxydové pryskyřice, viz Příloha 9.30. Pro vlepení insertu do plniče bylo použito dvousložkové epoxydové lepidlo, viz příloha 9.31.

Rozměry vzorků byly navrhovány tak, aby se na výsledcích daných testů neprojevil vliv upevnění ve stroji a dalších podmínek, které by mohly mít vliv na celkový výsledek. Na základě tohoto požadavku byly vzorky navrženy podle odborných prací, které se zabývaly obdobnou tematikou. [4, 10, 11, 26, 27, 28, 29, 40, 70]

Přehled získaných informací je zobrazen v Tab. 3.1, Tab. 3.2 a Tab. 3.3.

Vytržení ve směru osy insertu			
Reference	Rozměry [mm]	Počet zkoušených vzorků v sérii	Průměr otvoru v přípravku [mm]
[27]	100 x 100 x 21,1	4	60
[11]	127 x 127 x 15	-	-
[40]	120 x 120 x 17,78/22,26/27,94	5 pro každou konfiguraci	-
[28]	50 x 50 x 21	9, 9	35
[45]	140×140×25,2	-	60
[55]	140 x 140 x 25,2	6, 6	60
[60]	120 x 120 x 13	5	80

**Tab. 3.1:** Přehled informací pro vytržení ve směru osy insertu

Vytržení kolmo na osu insertu		
Reference	Rozměry [mm]	Počet zkoušených vzorků v sérii
[40]	60 x 120 x 17,78/22,26/27,94	-
[28]	120 x 50 x 21	9, 9

**Tab. 3.2:** Přehled informací pro vytržení kolmo na osu insertu

Ohyb		
Reference	Rozměry [mm]	Počet zkoušených vzorků v sérii
[4]	50/150/230/400/500 x 40 x 9,4	5 pro každou konfiguraci

**Tab. 3.3:** Přehled informací pro ohybové zkoušky

### 3.1 Geometrie vzorků

#### 3.1.1 Vzorky pro čtyř bodový ohyb

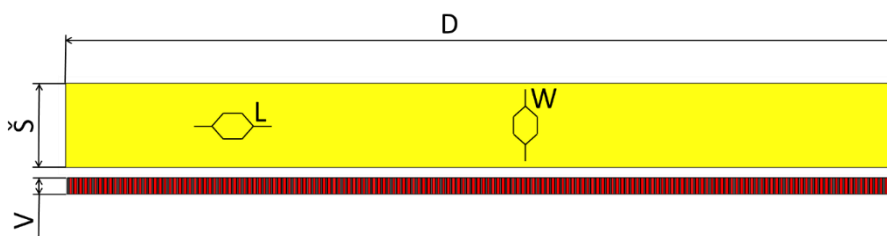
Vzorky pro čtyř bodový ohyb byly navrženy s ohledem na možný typ porušení, který je závislý na jejich délce. Na základě literatury byly určeny tři různé délky tak, aby při testu bylo možné pozorovat co nejvíce typů porušení. Geometrie vzorků je zobrazena na Obr. 3.1 a seznam jednotlivých variant je uveden v Tab. 3.4.

Označení testu	Rozměry		Skin			Jádro	
	$D$	$\check{S}$	Materiál	Skladba*	Tloušťka**	$V$	Směr
4PB_01	500	50	PHG600-44-50	Jedna vrstva	0,25	10	L
4PB_02	500	50	PHG600-44-50	Dvě vrstvy	0,25	10	L
4PB_03	500	50	PHG600-68-37	Dvě vrstvy	0,13	10	L
4PB_04	250	50	PHG600-44-50	Jedna vrstva	0,25	10	L
4PB_05	250	50	PHG600-44-50	Dvě vrstvy	0,25	10	L
4PB_06	250	50	PHG600-68-37	Dvě vrstvy	0,13	10	L
4PB_07	167	50	PHG600-44-50	Jedna vrstva	0,25	10	L
4PB_08	167	50	PHG600-44-50	Dvě vrstvy	0,25	10	L
4PB_09	167	50	PHG600-68-37	Dvě vrstvy	0,13	10	L

\*Počet vrstev na horní/spodní straně vzorku

\*\*Určuje tloušťku jedné vrstvy

**Tab. 3.4:** Varianty vzorků pro čtyř bodový ohyb



**Obr. 3.1:** Geometrie vzorků pro čtyř bodový ohyb

#### 3.1.2 Určení minimálního průměru vyplnění jádra [31]

Pro navržení poloměru plniče je použit postup, který je popsán v Inert Design Handbook [31]. Efektivní poloměr plniče  $b_p$  analyticky popisuje vliv plniče na své okolí a je rozhodující pro roznesení zatížení do jádra kolem, ale i pod plničem. Určení hodnoty  $b_p$  je graficky znázorněno na Obr. 3.2.

- Efektivní poloměr plniče  $b_p$  bere v úvahu vyšší tuhost a pevnost stěn voštinového jádra, které mají dvojnásobnou tloušťku stěn buněk a tudíž i menší pravděpodobnost jejich porušení.
- Efektivní poloměr plniče  $b_p$  je definován jako průměrná vzdálenost mezi nejbližší buňkou s jednotkovou tloušťkou stěny a středem insertu. Vzorec pro výpočet je dán Rovnicí (1), kde  $b_n$  udává vzdálenost mezi buňkou s jednotkovou tloušťkou stěny a středem insertu,  $n$  udává počet určených vzdáleností  $b_n$ .

$$b_p = \frac{1}{n} \sum b_n \quad \text{Rovnice (1)}$$

Pro všechny kombinace poloměru hlavy inserty a velikosti buňky můžeme získat minimální hodnotu  $b_p$ , která je dána Rovnicí (2), kde  $b_i$  udává poloměr hlavy insertu,  $S_c$  udává velikost buňky voštinového jádra.

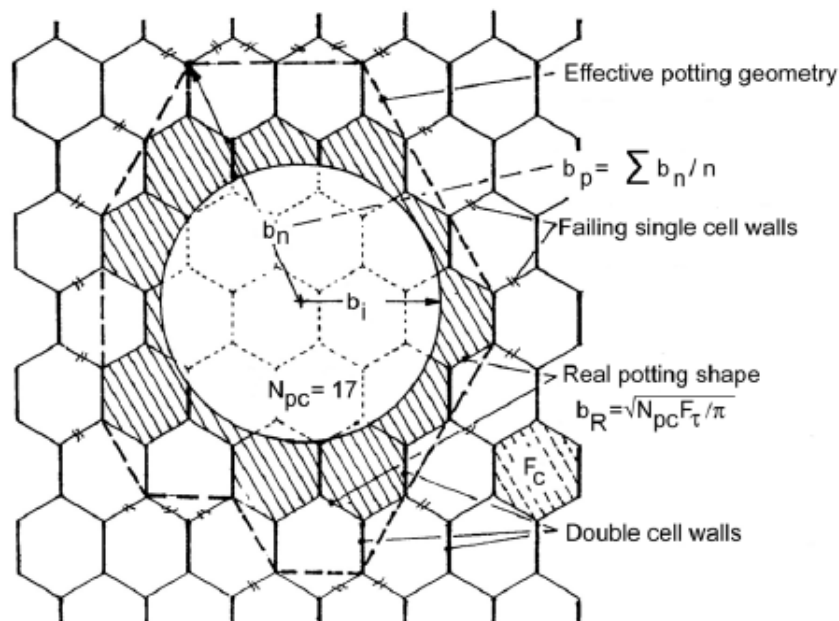
$$b_{p_{min}} = 0,93192 \cdot b_i + 0,874 \cdot S_c - 0,66151 \quad \text{Rovnice (2)}$$

S použitím Rovnice (2) je poté určen minimální poloměr plniče, který bude použit pro vzorky obsahující inserty. Pro insertový spoj vyšetřovaný v této práci platí:

$$S_c = 3,2 \text{ mm}, b_i = 5,73 \text{ mm}.$$

$$b_{p_{min}} = 0,93192 \cdot 5,73 + 0,874 \cdot 3,2 - 0,66151 = 7,48 \text{ mm}$$

Na základě tohoto výsledku byl navržen poloměr plniče 12,5 mm, který byl doporučen na základě již existujících konstrukčních řešení insertových spojů. Navržený poloměr má dostatečně vyšší hodnotu, než je minimální, což je výhodné z hlediska nepřesností při kusové ruční výrobě.



**Obr. 3.2:** Geometrie objemové výplně jádra [31]

### 3.1.3 Vzorky pro vytržení ve směru osy insertu

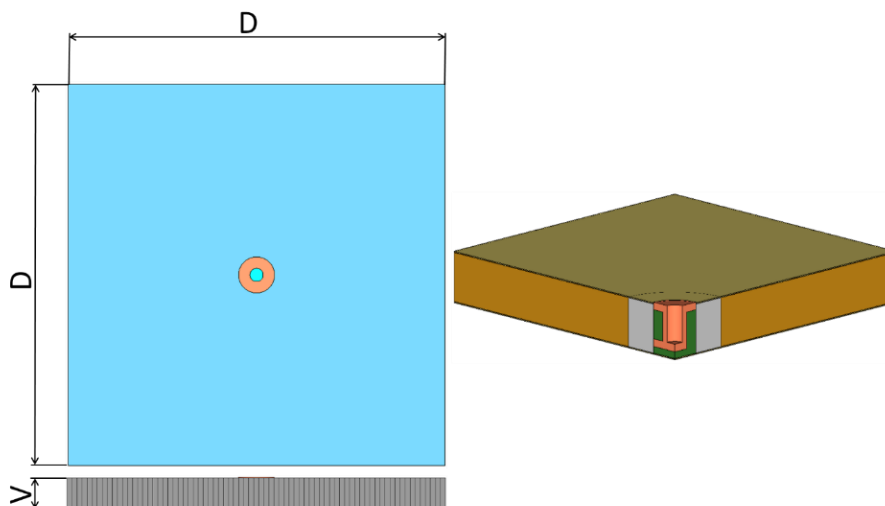
Vzorky pro vytržení ve směru osy insertu musely být navrženy tak, aby jejich velikost byla dostačující a na výsledcích experimentu se neprojevoval vliv upevnění vzorku ve zkušební stroji. Geometrie vzorků je zobrazena na Obr. 3.3 a seznam jednotlivých variant je uveden v Tab. 3.5.

Označení testu	Rozměry		Skin		Jádro	
	$D$	Materiál	Skladba*	Tloušťka**	$V$	Směr
PO_01	120	PHG600-44-50	Jedna vrstva	0,25	10	L/W
PO_02	120	PHG600-44-50	Dvě vrstvy	0,25	10	L/W
PO_03	120	PHG600-68-37	Dvě vrstvy	0,13	10	L/W
PO_04	120	PHG600-44-50	Dvě vrstvy	0,25	30	L/W
PO_05	120	PHG600-68-37	Dvě vrstvy	0,13	30	L/W

\*Počet vrstev na horní/spodní straně vzorku

\*\*Určuje tloušťku jedné vrstvy

**Tab. 3.5:** Varianty vzorků pro vytržení ve směru osy insertu



**Obr. 3.3:** Geometrie vzorků pro vytržení ve směru osy insertu

### 3.1.4 Vzorky pro vytržení kolmo na osu insertu

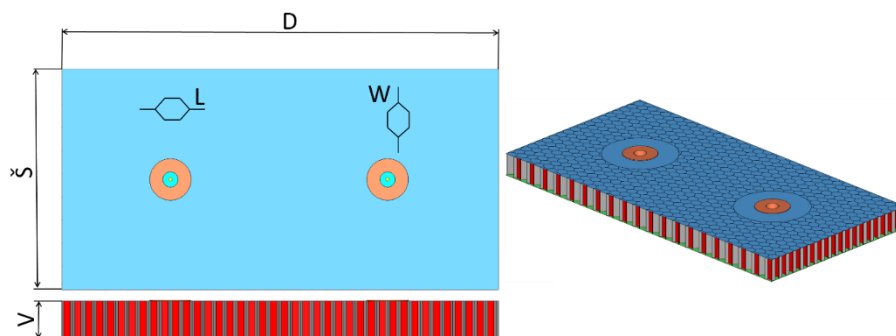
U tohoto typu zatížení je vícero variant upevnění vzorku ve zkušební stroji a jeho zkoušení. Na základě literatury uvedené v Kapitole 3 a možnosti použití již hotových přípravků byla navržena geometrie vzorků, která obsahuje dva insertové spoje. Nevýhodou tohoto řešení je velká náročnost pro dodržení geometrie při výrobě. Geometrie vzorků je zobrazena na Obr. 3.4 a seznam jednotlivých variant je uveden v Tab. 3.6.

Označení testu	Rozměry		Skin			Jádro	Směr
	$D$	$\check{S}$	Materiál	Skladba*	Tloušťka**		
SH_01	120	60	PHG600-44-50	Jedna vrstva	0,25	10	L
SH_02	120	60	PHG600-44-50	Dvě vrstvy	0,25	10	L
SH_03	120	60	PHG600-68-37	Dvě vrstvy	0,13	10	L
SH_04	120	60	PHG600-44-50	Jedna vrstva	0,25	10	W
SH_05	120	60	PHG600-44-50	Dvě vrstvy	0,25	10	W
SH_06	120	60	PHG600-68-37	Dvě vrstvy	0,13	10	W
SH_07	120	60	PHG600-44-50	Dvě vrstvy	0,25	30	W
SH_08	120	60	PHG600-68-37	Dvě vrstvy	0,13	30	W

\*Počet vrstev na horní/spodní straně vzorku

\*\*Určuje tloušťku jedné vrstvy

**Tab. 3.6:** Varianty vzorků pro vytržení kolmo na osu insertu



**Obr. 3.4:** Geometrie vzorků pro vytržení kolmo na osu insertu

## 4 Výroba vzorků

Zkušební vzorky byly vyrobeny autorem této práce ve spolupráci s firmou LA Composites, která poskytla materiál a odbornou pomoc. Je potřeba podotknout, že výroba probíhala ručně a kusově, což může mít za důsledek geometrické nepřesnosti nebo sníženou únosnost daných struktur.

Výroba probíhala v těchto krocích:

1. Voština byla nařezána na kusy tak, aby se vešla na určené přípravky.
2. Na separovaném přípravku byl do voštiny přidán plnič, do kterého v konečné fázi budou vlepny inserty, viz Obr. 4.1.



**Obr. 4.1:** Voštinové jádro s přidaným plničem

3. Vysušení voštinových jader a vytvrzení plniče probíhalo v peci po dobu jedné hodiny a teplotě 125°C. Na Obr. 4.2 je vidět umístění přípravku s voštinovými jádry v peci.



**Obr. 4.2:** Umístění přípravku v peci

4. Kladení jednotlivých vrstev sendvičové struktury na separovanou formu v daném pořadí. Nejprve byly položeny prepregy, na nichž bylo umístěno voštinové jádro. Poté na jádro z vnější strany byly položeny vrstvy prepregu. Počet vrstev a materiál prepregů je dán variantou složení viz Kapitola 3. V dalším kroku byla na předešlé vrstvy pokládána odtrhová tkanina. Na odtrhovou tkaninu byla dána vrstva tuhého laminátu, který měl zlepšit výsledný povrch horní vrstvy. Dále následovala separační fólie a odsávací rohož. Separační fólie zabezpečovala oddělení výrobku a ostatních pomocných materiálů. Odsávací rohož zde byla použita za účelem aplikace vakua a tudíž lepšímu rozložení tlaku. Odsávací ventil, pro pozdější vytvoření vakua, byl umístěn na formě mimo plochu skladby materiálu z důvodu, aby nedošlo k lokálnímu poškození povrchové vrstvy. U menších forem, kde nebyla možnost umístit odsávací ventil přímo na formu, byla později vytvořena tzv. kapsa, která se nacházela mimo prostor formy. Kolem skladby byla na formě vytvořena z vytvrzené pěny tzv. ohrádka, která zabraňovala zborcení okrajů po aplikaci vakua, viz Obr. 4.3.





**Obr. 4.3:** Ukázka využití tzv. ohrádky

Na závěr byla forma překryta vakuovací fólií (plachetkou), která za pomoci lepicí pásky utěsnila prostor uvnitř formy, viz Obr. 4.4 a po připojení vakuových hadic došlo k vytvoření vakua s přibližnou hodnotou podtlaku 0.8 bar.

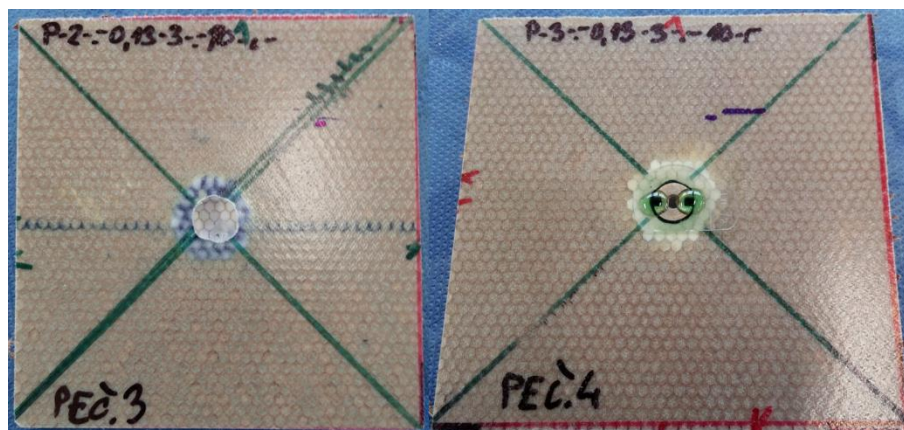


**Obr. 4.4:** Vytvoření vakua na přípravku

5. V dalším kroku byly formy umístěny do autoklávu k vytvrzení. Vytvrzování probíhalo po dobu dvou hodin při teplotě 125°C.
6. Po vyjmutí z autoklávu a očištění sendvičů, byly následně velké panely nařezány na jednotlivé rozměry vzorků. Po tomto kroku byly hotové vzorky určené pro čtyř bodový ohyb.



7. Do vzorků připravených pro insertové spoje, byla následně vyvrtána díra v místě plniče a dále byla vyfrézována.
8. Do připravených děr byly vlepeny inserty pomocí dvousložkového lepidla. Pro dodržení přesné polohy insertu, jsou k nim dodávány lepicí lišty. Tyto lišty se nalepí na hlavu insertu a dále přilepí na vrchní část skladby tak, aby insert byl ve správné poloze. Lišty v sobě mají dvě díry, kterými může unikát přebytečné lepidlo, viz Obr. 4.5.

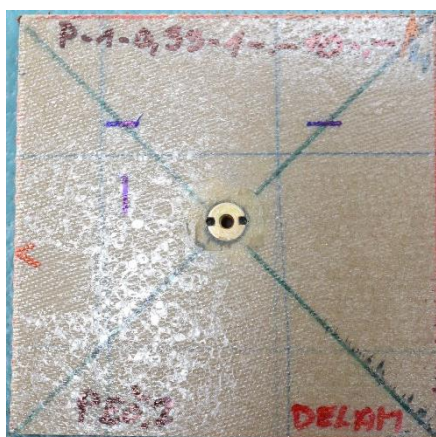


**Obr. 4.5:** Ukázka vlepení insertu do plniče

### Výrobní vady

Určité vzorky vykazovaly výrobní vady, které mohou ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti sendvičové struktury. Zjištěné vady:

- Geometrické nepřesnosti vzorků
- Špatně vyplněné jádro plničem
- Bublinky v lepidle kolem insertu
- Špatné vytvrzení potahů určitého množství vzorků, z důvodu mírně deformované formy viz Obr. 4.6



**Obr. 4.6:** Ukázka špatně vytvrzeného potahu

## 5 Mechanické zkoušky vzorků

V této kapitole bude popsán postup a výsledky zkoušek vzorků, které byly navrženy v Kapitole 3. Zkoušky byly rozděleny do tří skupin podle způsobu zatěžování:

- 1) Čtyř bodový ohyb
- 2) Vytržení ve směru osy insertu
- 3) Vytržení kolmo na směr osy insertu

### 5.1 Popis použitého zařízení

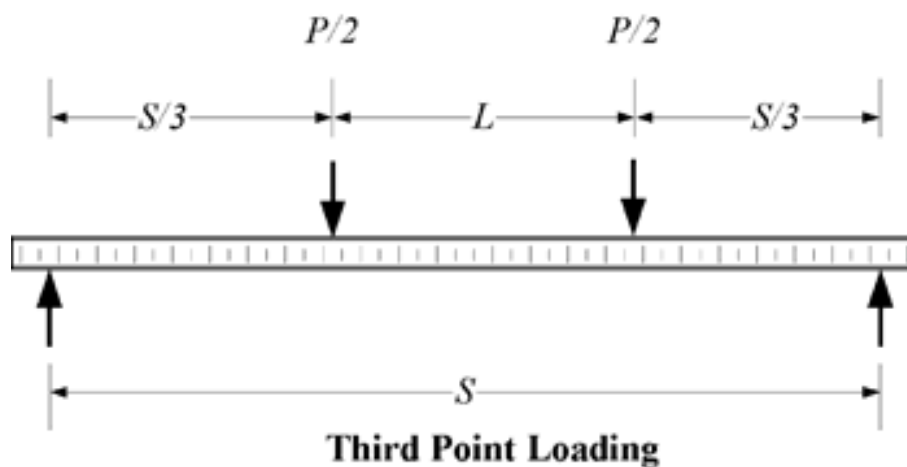
Všechny typy testů byly prováděny na elektromechanickém zkušebním stroji TIRA 2300 s řízeným posuvem příčnicku a siloměrem rozsahu 20 kN. Pro sběr dat z tenzometrů a průhybového snímače se použila měřicí stanice HBM Spider 8. Jeden vzorek z každé konfigurace pro čtyř bodový ohyb byl osazen tenzometrem HBM 6/350 LY 11.

### 5.2 Konfigurace testu pro čtyř bodový ohyb

Test pro čtyř bodový ohyb byl navržen ve smyslu normy ASTM C393, aby byl vzorek rozdělen podporami a zátěžným přípravkem na třetiny viz Obrázek Obr. 5.1. Toto nastavení bylo použito pro všechny délky vzorků, jak je ukázáno v Tab. 5.1.

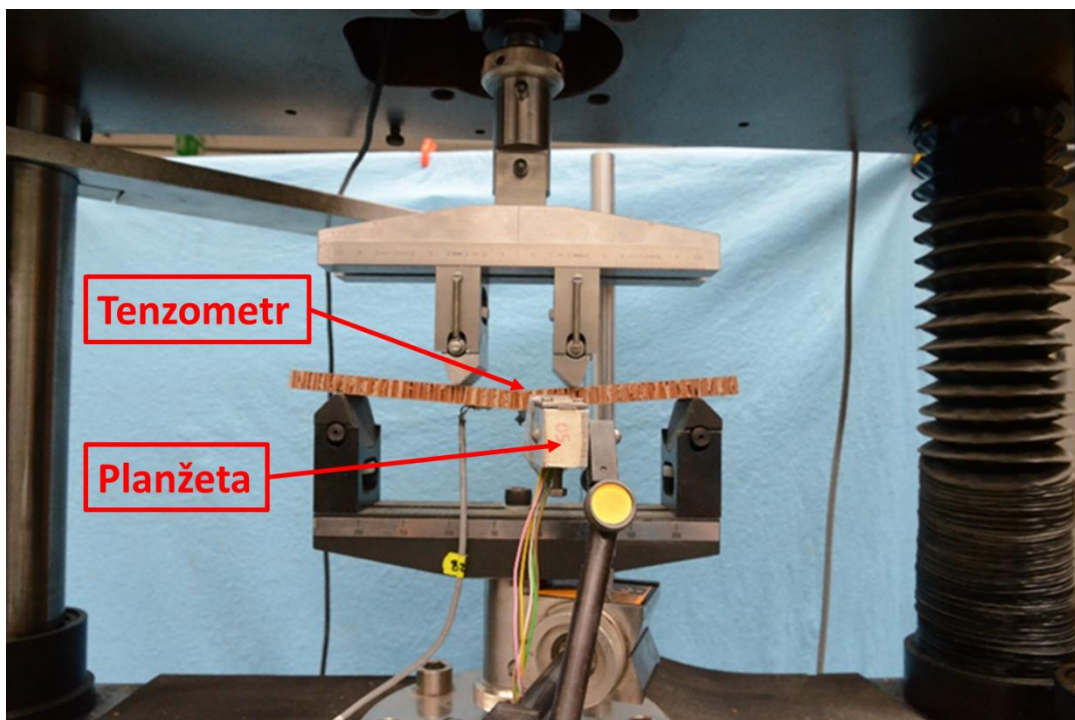
	Jednotky	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Délka Vzorku	[mm]	500	250	167
Vzdálenost mezi podporami	[mm]	460	200	100
Vzdálenost mezi zátěžnými přípravky	[mm]	153,3	66,7	33,3

Tab. 5.1: Popis nastavení čtyř bodového pro jednotlivé vzorky



Obr. 5.1: Základní nastavení testu pro čtyř bodový ohyb [70]

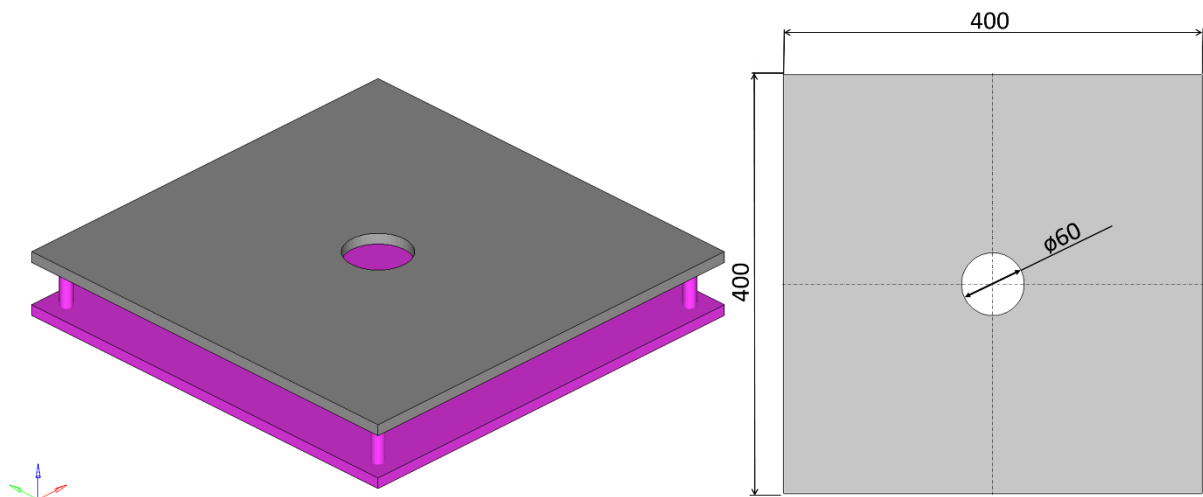
Údaje závislosti síly na posuvu příčnicku byly získávány přímo ze zkušebního stroje. Dále byl použit průhybový snímač pro měření průhybu ve středu vzorku. Průhyb vzorků dosahoval však velkých hodnot, při kterých už by docházelo k trvalému poškození průhybového snímače, a z tohoto důvodu byl vždy v průběhu testu odpojen. U jednoho vzorku z dané konfigurace byl ve středu na horní straně potahu přilepen tenzometr, který měřil poměrné prodloužení v tomto místě. Zobrazení uspořádání testu je vidět na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Uspořádání testu pro čtyř bodový ohyb

### 5.3 Konfigurace testu pro vytržení ve směru osy insertu

Pro případ vytržení ve směru osy insertu byl použit přípravek, který je zobrazen na Obr. 5.3. Díky tomuto přípravku bylo zatížení insertu čistě tahové. Uložení vzorku do přípravku je vidět na Obr. 5.4. Při tomto testu jsou získávány data naměřená zkušebním strojem, jelikož by bylo problematické zapojení tenzometrů při použití daného přípravku.



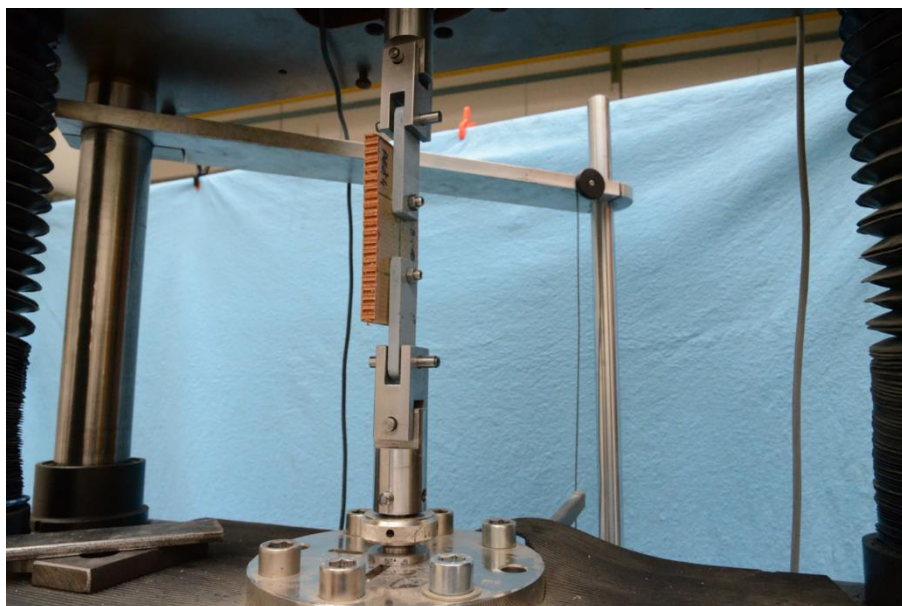
**Obr. 5.3:** Přípravek pro vytržení ve směru osy insertu



**Obr. 5.4:** Uspořádání testu pro vytržení ve směru osy insertu

#### **5.4 Konfigurace testu pro vytržení kolmo na směr osy insertu**

Pro případ vytržení kolmo na směr osy insertu je uložení vzorky v testovacím stroji zobrazeno na Obr. 5.5. Při tomto testu jsou získávány pouze data naměřená zkušebním strojem. Díky uložení vzorku nepůsobí na vzorek pouze čistý smyk, ale jde o kombinované namáhání smyku a ohybu, který vzniká kvůli tloušťce přípravku.



**Obr. 5.5:** Uspořádání testu pro vytržení kolmo na směr osy insertu

## 5.5 Popis módů porušení

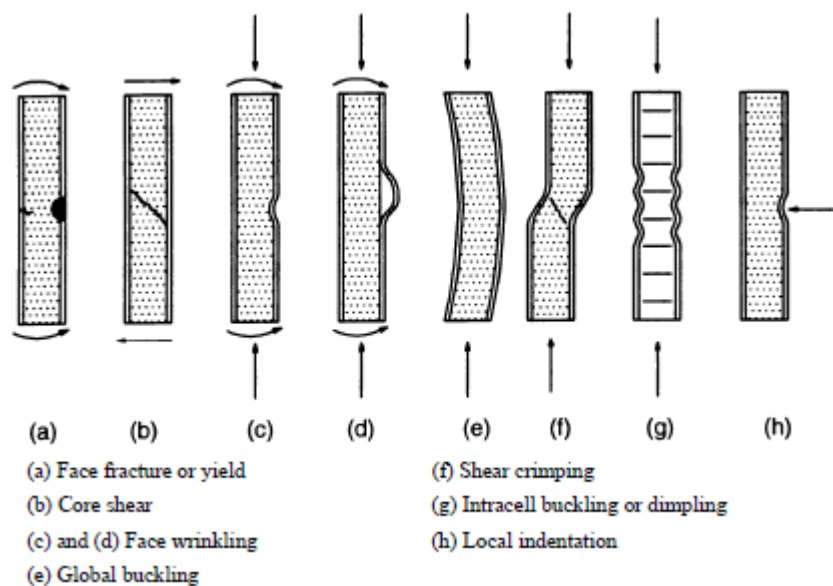
Jeden z výstupů jednotlivých zkoušek je popis dominantního módu porušení daného vzorku. Tyto jednotlivé módy budou popsány písmennou zkratkou, která vychází z [70]. Tímto popisem bude přesně určen typ poruchy, oblast výskytu poruchy a která část sendvičové struktury byla porušena. Rozdělení písmenných zkratek je zobrazeno v Tab. 5.2.

První písmeno		Druhé písmeno		Třetí písmeno	
Typ porušení	Označení	Oblast porušení	Označení	Umístění porušení	Označení
Porušení jádra	C	V místě zatížení	A	Jádro	C
Delaminace skinu od jádra	D	V místě měření	G	Spojení jádro-skin	A
Porušení skinu	F	Porušení na více místech	M	Spodní vrstva skinu	B
Složená porucha	M(x,y,z)	Mimo místo měření	O	Horní vrstva skinu	T
Smykové porušení	S	Různé	V	Obě vrstvy skinu	F
Explosivní	X	Neznámé	U	Různé	V
Jiné	O			Neznámé	U

**Tab. 5.2:** Rozdělení písmenných zkratek [70]

Grafické zobrazení jednotlivých módů porušení sendvičové struktury je ukázáno na Obr. 5.6.





**Obř. 5.6:** Grafické zobrazení módů porušení [70]

## 5.6 Postup vyhodnocení experimentálních výsledků

Naměřená data, získaná ze zkušebního stroje, byla statisticky vyhodnocena. Pro požadovanou přesnost hodnocení byl na základě literatury navržen minimální počet vzorků roven pěti pro každou konfiguraci. Vyhodnocením výsledků zkoušek byla získána výsledná střední hodnota s příslušejícím konfidenčním intervalem, který pokrývá střední hodnotu s pravděpodobností 95%. Pro určení konfidenčního intervalu bylo použito Studentovo rozdělení a následující postup:

Střední hodnota byla určena podle Rovnice (3).

$$\bar{X}(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i \quad \text{Rovnice (3),}$$

kde  $\bar{X}(x_i)$  označuje střední hodnotu,  $n$  určuje počet vzorků,  $x_i$  udává jednotlivé výsledky na dané hladině.

Dále je počítán rozptyl souboru naměřených dat kolem střední hodnoty podle Rovnice (4)

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}(x_i))^2 \quad \text{Rovnice (4),}$$

kde,  $s^2(x_i)$  udává rozptyl hodnot.

Na základě rozptylu hodnot je poté podle Rovnice (5) určena směrodatná odchylka, která udává míru rozptýlení naměřených dat.

$$s(x_i) = +\sqrt{s^2(x_i)} \quad \text{Rovnice (5),}$$

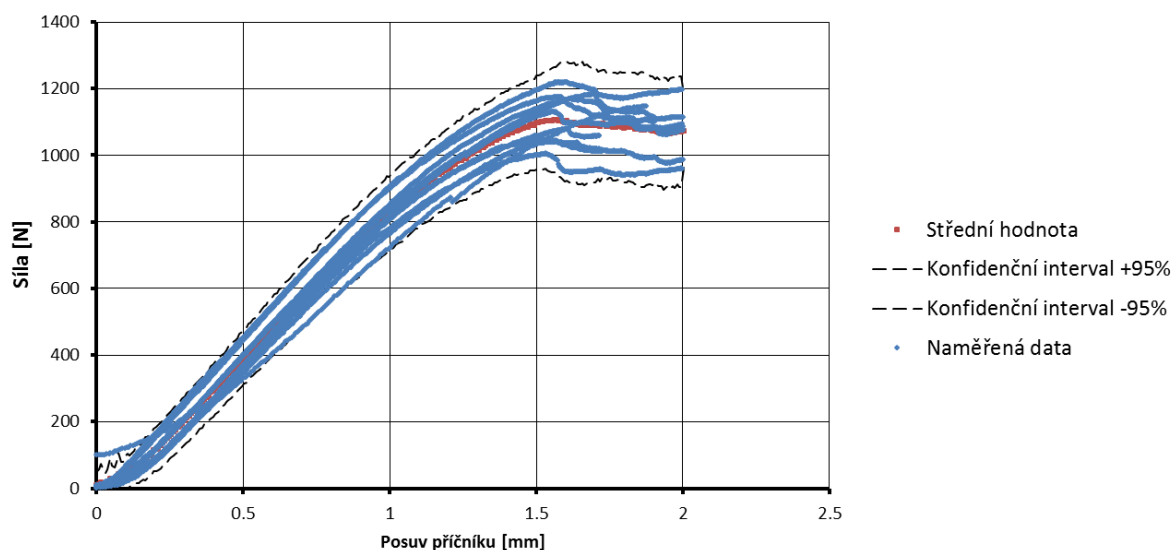
kde  $s(\bar{X})$  udává směrodatnou odchylku a je definována jako kladná odmocnina z rozptylu.

Oboustranný konfidenční interval pro parametr  $\bar{X}(x_i)$  se vypočte pomocí výběrových hodnot  $x_i, s(x_i), n$  a kritické hodnoty  $t_\alpha(\vartheta)$  Studentova rozdělení pro zvolenou hladinu spolehlivosti  $\alpha$  a je dán nerovností uvedenou v rovnici (6)

$$\bar{X}(x_i) - t_\alpha(\vartheta) \cdot s(x_i) < \bar{X}(x_i) < \bar{X}(x_i) + t_\alpha(\vartheta) \cdot s(x_i) \quad \text{Rovnice (6),}$$

přičemž počet stupňů volnosti  $\vartheta = n - 1$ .

Graf 5.1 zobrazuje výsledné vyhodnocení souboru naměřených dat. Modrou barvou jsou zobrazena naměřená data, červenou barvou je zobrazena střední hodnota a černou přerušovanou čarou je zobrazen konfidenční interval s hladinou spolehlivosti 95%.



**Graf 5.1:** Výsledný konfidenční interval

## 5.7 Výsledky zkoušek

Jednotlivé testy vzorků byly prováděny do úplného porušení, popřípadě pro vybrané vzorky byl test přerušen po prvním měřeném poklesu síly, aby bylo možné určit, která porucha nastane při dané konfiguraci jako první. Rychlost posuvu příčnicku byla volena tak, aby se daný průběh zatížení dal pokládat za statický a vzorkovací frekvence byla zvolena s ohledem na dynamické jevy, které při porušení nastaly.

Pro vyhodnocení jednotlivých testů byl vytvořen program, který vypočítává střední hodnotu na základě postupu uvedeného v Kapitole 5.6. Daný postup popisuje průběh střední hodnoty do prvního porušení vzorku z dané série. Pro určení střední hodnoty, kde by bylo zahrnuto porušení vzorků, by musela být použita statistická metoda, která dokáže porušené vzorky správně zařadit do statistického souboru s příslušnou vahou. Takto získaný průběh střední hodnoty je ovšem dostačující pro výpočtové ověření tuhosti.

### **5.7.1 Výsledky zkoušek čtyř bodového ohybu**

Výsledky zkoušek čtyř bodového ohybu jsou uvedeny v Příloze 9.1 až 9.9. Označení výsledků se řídí označením testu, které je uvedeno v Tab. 3.4.

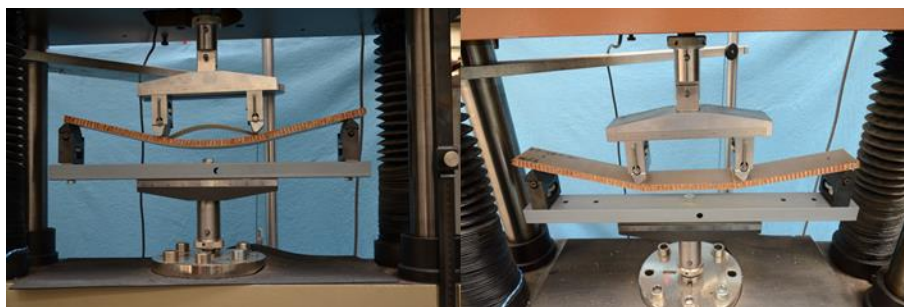
Pro vzorky s délkou 500 mm a 250 mm všech konfigurací byla získána lineární závislost mezi zatížením a posuvem příčnicku až do konečného porušení. Vzorky s délkou 167 mm už vykazovaly nelineární průběh a to především kvůli lokálnímu vtlačování zátěžného přípravku do vzorku. Na základě tohoto zjištění vyplývá, že při nižších délkách už je tuhost natolik veliká, že dříve než se vzorek poruší díky ohybovému namáhání, dojde k jeho lokální trvalé deformaci a to především lokální ztrátou stability jádra.

Porušení vzorků probíhalo převážně delaminací vrchní vrstvy potahu od voštinového jádra nebo porušením horního potahu. U jednotlivých zkoušek bylo možné pozorovat, že výsledné porušení je závislé na volbě strany vzorku, na kterou je vyvíjena síla. U vzorků, na které bylo tlačeno na stranu, která nebyla položena směrem do formy při vytvrzování, mnohem častěji nastalo porušení díky delaminaci. V žádné ze zkoušek nedošlo ke smykovému porušení jádra, což může nasvědčovat špatnému přilnutí skinu k jádru nebo malé pevnosti použitých potahů.

Delaminace byla dominantním porušením pro vzorky s prepregem PHG600-44-50, který je procentuálně méně prosycen pryskyřicí než například druhý použitý prepreg PHG600-44-37. U vzorků s prepregem PHG600-44-37 docházelo především k porušení vrchní vrstvy potahu.

Zobrazení reálných porušení získaných z jednotlivých testů je možné vidět na obrázcích v Příloze 9.1 až 9.9, kde je zobrazeno typického porušení pro danou konfiguraci. Vybrané typy porušení jsou zobrazeny na Obr. 5.7.





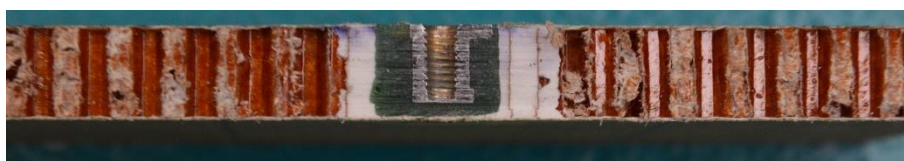
**Obr. 5.7:** Typy porušení při čtyř bodovém ohybu: Delaminace horní potahu od jádra (vlevo), porušení potahu (vpravo)

### 5.7.2 Výsledky zkoušek vytržení ve směru osy insertu

Výsledky zkoušek vytržení ve směru osy insertu jsou uvedeny v Příloze 9.10 až 9.14. Označení výsledků se řídí označením testu, které je uvedeno v Tab. 3.5.

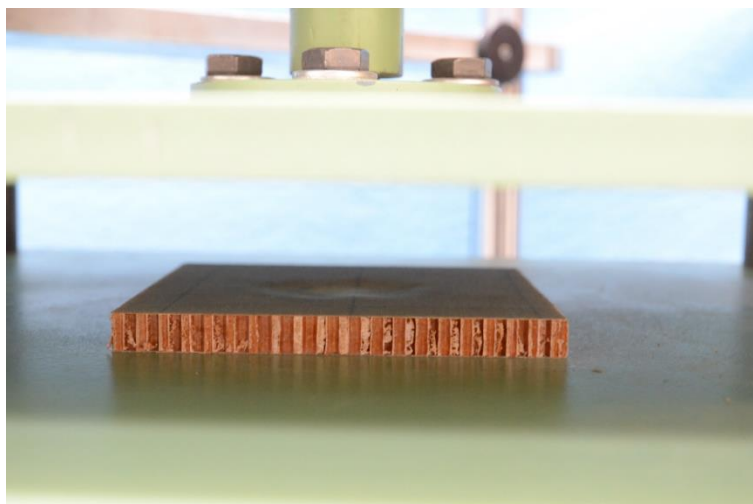
Výsledky těchto zkoušek vykazují v první části grafu lineární průběh závislosti zatížení na posuvu příčnicku. Z tohoto průběhu je tedy zřejmé, že dané vzorky mají konstantní tuhost až do prvního porušení. Od místa prvního porušení už je daný průběh nelineární, což je způsobeno kombinací poruch, které při tomto zatěžování nastávají.

V Kapitole 2.3.1.3 byl popsán průběh porušení u plně zapuštěného insertu a podle předpokladu by v místě řezu mělo být vidět smykové porušení jádra. Na Obr. 5.8 je vidět řez vzorku, kde byl zastaven test po zaznamenání poklesu zátěžné síly. Po prozkoumání vzorků z přerušovaných testů však nebyla nalezena viditelná trvalá deformace nebo porušení, které zapříčinilo pokles síly při měření.



**Obr. 5.8:** Řez vzorkem

Na základě všech měření bylo zjištěno, že nejpravděpodobnějším prvním porušením vzorku je delaminace plniče od potahu na spodní straně. Namáhání na spojení mezi plničem a potahem je vidět na Obr. 5.9. Delaminace plniče od spodního potahu je vidět v řezu na Obr. 5.10.

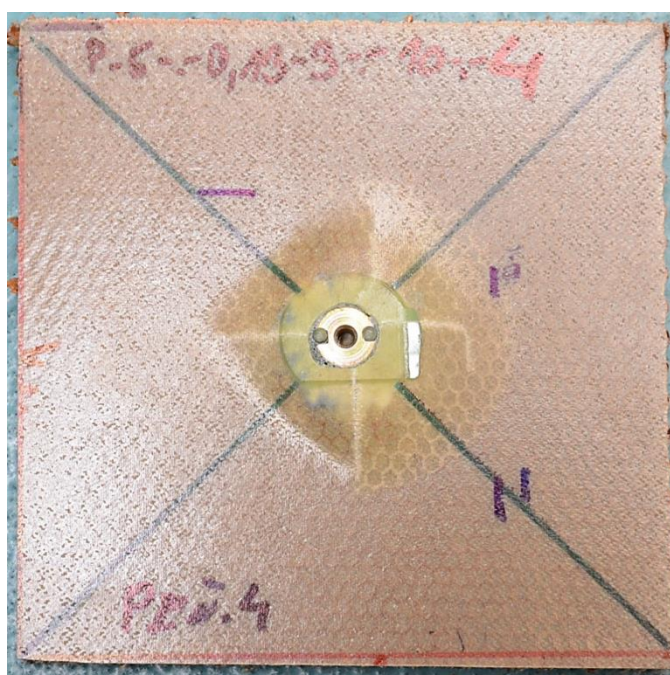


**Obr. 5.9:** Namáhání spojení plnič/spodní potah



**Obr. 5.10:** Delaminace plniče od spodního potahu

Po delaminaci plniče od spodního potahu dochází ke ztrátě tuhosti a celé zatížení je poté přenášeno spojením plniče a horního potahu. Díky tomu dále dochází k porušení horního potahu a jeho delaminaci od plniče, jak je vidět na Obr. 5.11.



**Obr. 5.11:** Porušení vrchního potahu

V případě částečně zapuštěného insertu mělo podle Kapitoly 2.3.1.3 dojít ke smykovému porušení jádra a tahovému porušení plniče. V řezu, který je zobrazen na Obr. 5.12, je ovšem vidět pouze porušení plniče, což ukazuje na vysokou pevnost použitého voštinového jádra, respektive nízkou pevnost použitého plniče.



**Obr. 5.12:** Porušení plniče při částečně zapuštěném insertu

### 5.7.3 Výsledky zkoušek vytržení kolmo na osu insertu

Výsledky zkoušek kolmo na osu insertu ohybu jsou uvedeny v Příloze 9.15 až 9.22. Označení výsledků se řídí označením testu, které je uvedeno v Tab. 3.6.

Popis průběhu této zkoušky nebyl nalezen v žádné literatuře, a tudíž není možné jednotlivé výsledky porovnat a tím ověřit jejich teoretickou správnost, jako tomu bylo u zkoušek vytržení ve směru osy insertu.

U této zkoušky nebylo možné, díky geometrii přípravku, docílit zatížení pouze čistým smykem. Díky tomu byl insertový spoj namáhán kombinovaným zatížením od smyku a ohybu, což zapříčiňuje složité kombinované porušení. Porušení, které se objevily u tohoto typu vzorku:

- Porušení potahu ve směru zatěžování
- Ohybové porušení plniče
- Delaminace plniče od horního a spodního potahu
- Tahové porušení jádra

Výsledky těchto zkoušek vykazují v první části grafu lineární průběh závislosti zatížení na posuvu příčnicku. Z tohoto průběhu je tedy zřejmé, že dané vzorky mají konstantní tuhost až do prvního porušení. U určitého počtu vzorků byla lineární část v grafu odsunuta více vpravo. Tento jev je zapříčiněn prokluzem mezi maticí a přípravkem, z čehož je zřejmé, že výsledný průběh testu je závislý na utahovacím momentu šroubu. V průběhu prokluzu nebylo zaznamenáno žádné porušení, tudíž by tento jev neměl mít vliv na celkovou maximální



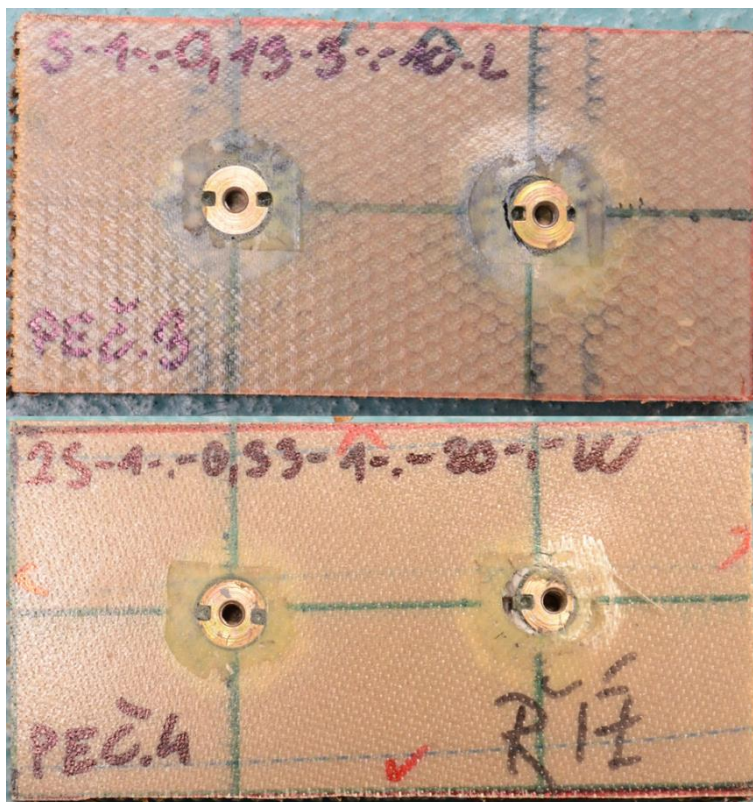
únosnost insertového spoje. Od místa prvního porušení už je daný průběh nelineární, což je způsobeno kombinací poruch, které při tomto zatěžování nastávají.

Na Obr. 5.13 je vidět řez vzorků, kde byl zastaven test po zaznamenání poklesu zátěžné síly. Po prozkoumání vzorků z přerušených testů nebyla však nalezena viditelná trvalá deformace nebo porušení, které zapříčinilo pokles síly při měření.



**Obr. 5.13:** Řez vzorku s plně zapuštěným insertem (nahore), Řez vzorku s částečně zapuštěným insertem (dole)

Na základě získaných výsledků je nejpravděpodobnější první poruchou, porušení plniče, jak je vidět na Obr. 5.14, kde je zřetelné posunutí insertu oproti původní poloze.



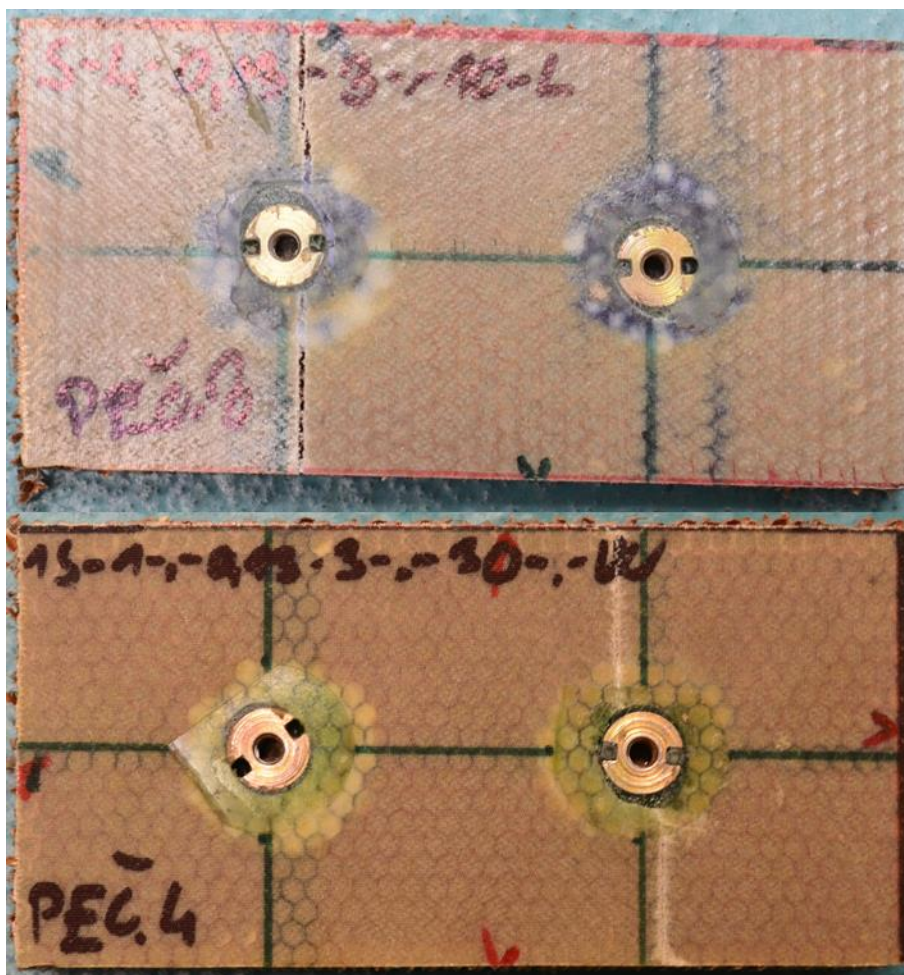
**Obr. 5.14:** Řez vzorku s plně zapuštěným insertem (nahore), Řez vzorku s částečně zapuštěným insertem (dole)

Celková deformace insertového spoje je vidět na Obr. 5.15, kde je patrné jak porušení plniče, tak delaminace plniče od horního a spodního potahu.



**Obr. 5.15:** Řez celkovou poruchou vzorku

U vzorků, kde byl použitý prepreg PHG600-68-37, docházelo velmi často kromě porušení plniče také k porušení horního potahu, a to pro plně i částečně zapuštěný insert. Porušení potahu pro tuto konfiguraci vzorků je vidět na Obr. 5.16.



**Obr. 5.16:** Porušení horního potahu u vzorku s plně zapuštěným insertem (nahore),  
Porušení horního potahu u vzorku s částečně zapuštěným insertem (dole)

## 6 Numerické řešení sendvičových struktur

Pro možnost numerických simulací sendvičových struktur budou v této kapitole uvedeny základní možnosti jejich modelování. Pro vytvoření modelů pomocí metody konečných prvků byl použit program Hypermesh v12.0 a pro řešení lineárních úloh byl použit řešič Optistruct v12.0.

Výsledky výpočtů budou porovnávány s experimentálně získanými daty, na základě geometrie vzorků, kde se potah sendvičové struktury skládal ze dvou vrstev prepregu PHG600-68-37. Tento typ vzorků byl zvolen na základě jejich geometrické přesnosti a žádné výrobní poruše potahových vrstev. Dobrá kvalita zpracování je velmi důležitá pro shodu experimentálních a numerických výsledků, jelikož dané simulace budou prováděny na teoreticky bezchybném vzorku.

Popis materiálu jádra byl získán z [45, 50], kde jsou uvedené materiálové hodnoty, které byly ověřeny a měly by dávat dobrou shodu s experimentálními daty. Pro materiál potahů nebyla nalezena reference, ve které by byly uvedeny materiálové hodnoty, a proto budou použity hodnoty uvedené v materiálovém listě, viz Příloha 9.28.2. Hodnoty, které jsou uvedeny v materiálovém listě, byly získány pomocí experimentu, kde vzorek neměl stejnou skladbu, jako je řešena v této práci. Z toho vyplývá možnost, že dané materiálové hodnoty budou způsobovat nepřesnosti ve výpočtu.

U všech variant modelů byl potah tvořen 2D vrstvenými elementy a to z důvodu, že se u žádného testu neprojevovalo interlaminární porušení, které by bylo nutné postihnout. Díky tomuto poznatku není nutné modelovat jednotlivé vrstvy pomocí 3D elementů, kde by mohly vzniknout numerické problémy s řešením velmi plochých prvků.

Vzorky pro čtyř bodový ohyb s délkou 500 mm a 250 mm mohou být modelovány s hrubší sítí, jelikož průběh průhybu je spojitý bez lokálních extrémů. Pro ostatní typy vzorků už je nutné vytvořit síť jemnější, z důvodů správného popisu lokálních zatížení a interakce mezi sendvičovou strukturou a insertovým spojem. Obecně byla kvalita sítě kontrolována na splnění geometrických podmínek pro tvar elementu. U všech modelů byly předepsané podmínky splněny a v modelech se nevyskytovaly singulární body, ve kterých by se zobrazily nespojitě výsledky.

U těchto úloh nejsou využívány žádné kontakty a veškerá spojení jsou realizovaná přímým propojením sítí jednotlivých komponent.

Jednotlivé modely byly zatěžovány silou a okrajové podmínky byly nastaveny tak, aby co nejméně ovlivňovaly výsledky. Hodnota zátěžné síly mohla být volena libovolně, jelikož hledaným výsledkem lineárního výpočtu je získání směrnice, která udává závislost zatížení na deformaci, která bude porovnána s experimentálně získaným průběhem.

## 6.1 MKP model s vrstvenými 2D elementy

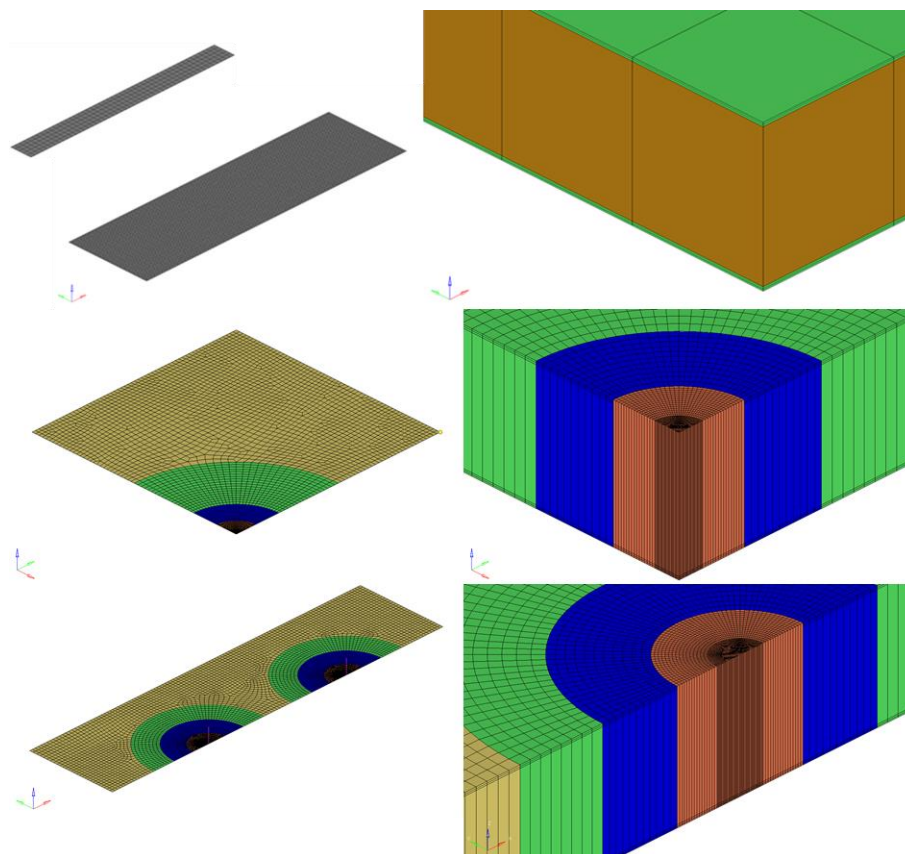
Tento typ modelu je tvořen pouze 2D skořepinovými elementy, které jsou vytvořeny ve střednici daného vzorku. Síť je tvořena elementy typu CQUAD4, což je skořepinový element se čtyřmi uzly umístěnými ve vrcholech, kde každý z nich má šest stupňů volnosti. Jelikož model je tvořen pouze 2D elementy, byly použity rovinné lineární, teplotně nezávislé ortotropní materiály. Materiálové konstanty byly odečteny z materiálových listů a jejich shrnutí je uvedeno v Příloze 9.32.1. V tomto případě materiálové hodnoty jádra udávají jeho chování jako chování celku.

Model dané sendvičové struktury vzniká pomocí modulu pro kompozitní materiály, který je obsažen v programu HyperMesh v12.0. V tomto modulu se tvoří jednotlivé vrstvy, které jsou přiřazovány jako vlastnosti jednotlivých elementům. Na Obr. 6.1 je vidět síť vytvořená pomocí 2D elementů a vizualizace skladby jednotlivých vrstev, které jsou skládány normálově a symetricky k dané síti.

Tento postup je velmi vhodný a rychlý pro modelování sendvičových panelů. Jakmile musí být v modelu zahrnuty inserty, popřípadě jiné konstrukční prvky, začne být model náchylnější na správnost zadání. Na Obrázku Obr. 6.1 je vidět, že každá lokální úprava musí být brána v potaz při tvoření sítě, aby mohla být přiřazena správná materiálová vrstva dané oblasti. V tomto případě je to oblast insertového spoje, kde na Obr. 6.1 zelené a žluté komponenty zobrazují voštinové jádro a dané potahy, když to modré a světle hnědé komponenty zobrazují oblasti, kde musely být vrstvy s materiály insertu a plniče.

Takto vytvořený model je vhodný pro rychlé navrhování či základní ověření v první fázi projektu, kde je optimalizován tvar a použitá skladba pro danou konstrukční část. Tento postup je určený pro tenkostěnné konstrukce, u kterých je v možné v souladu s teorií použití 2D skořepinových elementů. Výhodou tohoto postupu je malé množství elementů a tudíž kratší výpočtový čas, ale oproti tomu na úkor získání výsledků detailnějšího chování dané konstrukce.





**Obr. 6.1:** Síť 2D elementů (vlevo), Vizualizace skladby sendvičové struktury (vpravo)

## 6.2 MKP model s objemovými elementy

Pro lepší popis složitého chování sendvičových struktur je nutné zpřesnit popis jádra, než tomu bylo v Kapitole 6.1. Jednou z možností je modelování materiálu jádra pomocí objemových elementů. Tímto je možné například z výsledků odečíst změnu namáhání v celém průřezu jádra. Nevýhodou oproti předchozímu postupu je navýšení výpočtové náročnosti, jelikož počet elementů se zvýšil osmkrát a počet uzlů šestkrát.

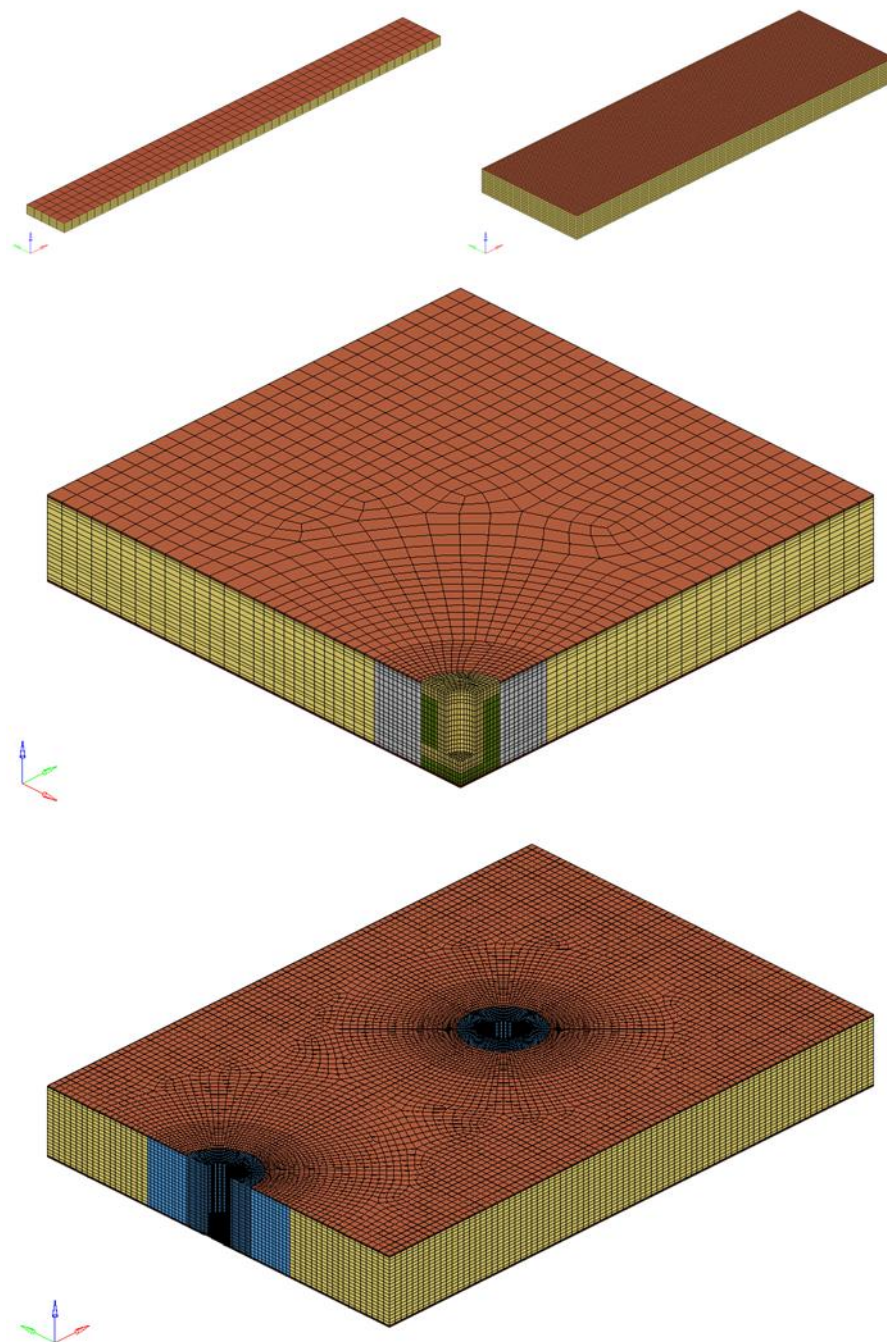
V modelu bylo pro popis potahů užito elementů typu CQUAD4, což je skořepinový element se čtyřmi uzly umístěnými ve vrcholech, kde každý z nich má šest stupňů volnosti. Těmto elementům pak byly přiřazeny vlastnosti jednotlivých vrstev pomocí implementovaného kompozitního modulu v programu HyperMesh v12.0. Pro elementy potahu byl použit rovinný lineární, teplotně nezávislý ortotropní materiál. Objemové elementy tvořící jádro byly typu CHEXA, což je šestistěnný element s osmi uzly, umístěnými ve vrcholech, kde každý z nich má tři translační stupně volnosti.



Byly vytvořeny dvě varianty materiálu, který byl použitý pro voštinové jádro, z nichž v jedné byl použit lineární, teplotně nezávislý, isotropní materiál a v druhé lineární, teplotně nezávislý, ortotropní materiál. Oba tyto materiály popisují vlastnosti jádra jako celku.

Jelikož je velmi těžké získat všechny potřebné materiálové konstanty pro 3D ortotropní materiál, je v této práci ukázáno, jak se bude chovat sendvičová struktura s isotropním jádrem, jehož materiálové vlastnosti byly navrženy v několika iteracích podle shody numerických výpočtů lineární analýzy a získaných experimentálních výsledků pro čtyř bodový ohyb. Na základě porovnání výsledků vzorků s insertovým spojem, kde byly vzorky zatěžovány ve dvou různých směrech, je ukázáno, jestli by isotropní popis jádra nebyl dostačující v porovnání se složitým popisem ortotropního materiálu. Konstanty pro ortotropní materiál použité pro lineární výpočty byly nalezeny v [50]. Shrnutí použitých materiálových hodnot pro oba typy materiálu jsou ukázány v Příloze 9.32.2.

Modely pro jednotlivé typy vzorků jsou ukázány na Obr. 6.2 je vidět, že při tomto postupu modelování je možné detailně modelovat celý insertový spoj. Z experimentálních výsledků bylo zjištěno, že je možné insertový spoj zjednodušit tak, že bude tvořený jako jedna komponenta, které bude přiřazený materiál plniče. Tohoto lze využít díky tuhosti plniče, která je oproti sendvičové struktuře daleko vyšší. Pro příklady vytržení kolmo na osu insertu toto zjednodušení platí pouze v lineární části závislosti síly na posuvu, jelikož bylo zjištěno, že jedno z možných porušení je porušení plniče, popřípadě i lepidla. Z tohoto důvodu by bylo nutné užít nelineárních výpočtů, které by toto porušení braly v potaz, což znamená nutnost modelovat detailně jednotlivé prvky insertového spoje.



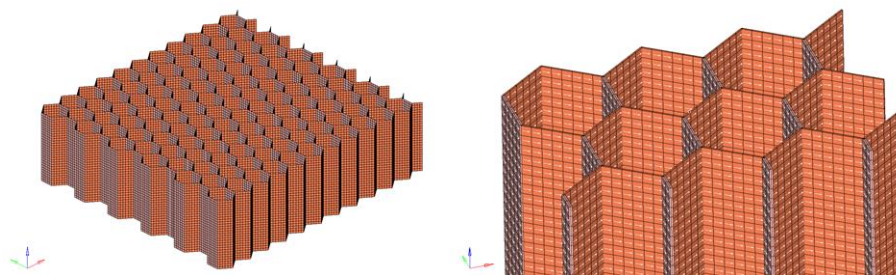
**Obr. 6.2:** Modely jednotlivých vzorků s objemovým modelem jádra

### 6.3 MKP model s detailním popisem jádra

Pro nejpřesnější model je nutné detailně modelovat jádro, jak je vidět na Obr. 6.3. Geometrie jednotlivých buněk jádra byla vytvořena na základě [50]. V modelu jádra jsou respektovány stěny buněk, které mají dvojnásobnou tloušťku, jak je ukázáno na Obr. 6.3. V této kapitole bude ukázána shoda pouze s lineární závislostí síly na deformaci. Pro plné využití

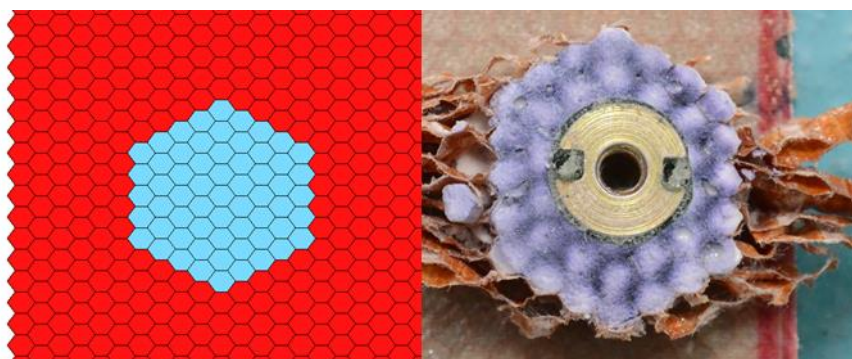
tohoto typu modelu by bylo nutné využívat nelineárních analýz, kde by bylo možné simulovat velké deformace a případnou ztrátu stability jádra.

Síť je tvořena elementy typu CQUAD4, což je skořepinový element se čtyřmi uzly umístěnými ve vrcholech, kde každý z nich má šest stupňů volnosti. Jelikož model je tvořen pouze 2D elementy, byly použity rovinné lineární, teplotně nezávislé ortotropní materiály. Pro potah je použitý stejný materiál jako v u předchozích modelů. V tomto případě je nutné pro jádro použít materiál nomexového papíru, jelikož už zde nejde pouze o náhradu tuhosti jádra jako v předešlých případech. Materiálové konstanty pro nomexový papír byly nalezeny v [50] a použité hodnoty jsou ukázány v Příloze 9.32.3. U elementů nomexového jádra je nutné správně určit materiálové směry, jelikož díky výrobě vykazuje ortotropní chování. Elementům potahu a jádra byly přiřazeny jednotlivé materiálové vrstvy pomocí kompozitního modulu, který je obsažen v programu HyperMesh v12.0.



**Obr. 6.3:** Detailní model jádra se zobrazením hlavních materiálových směrů

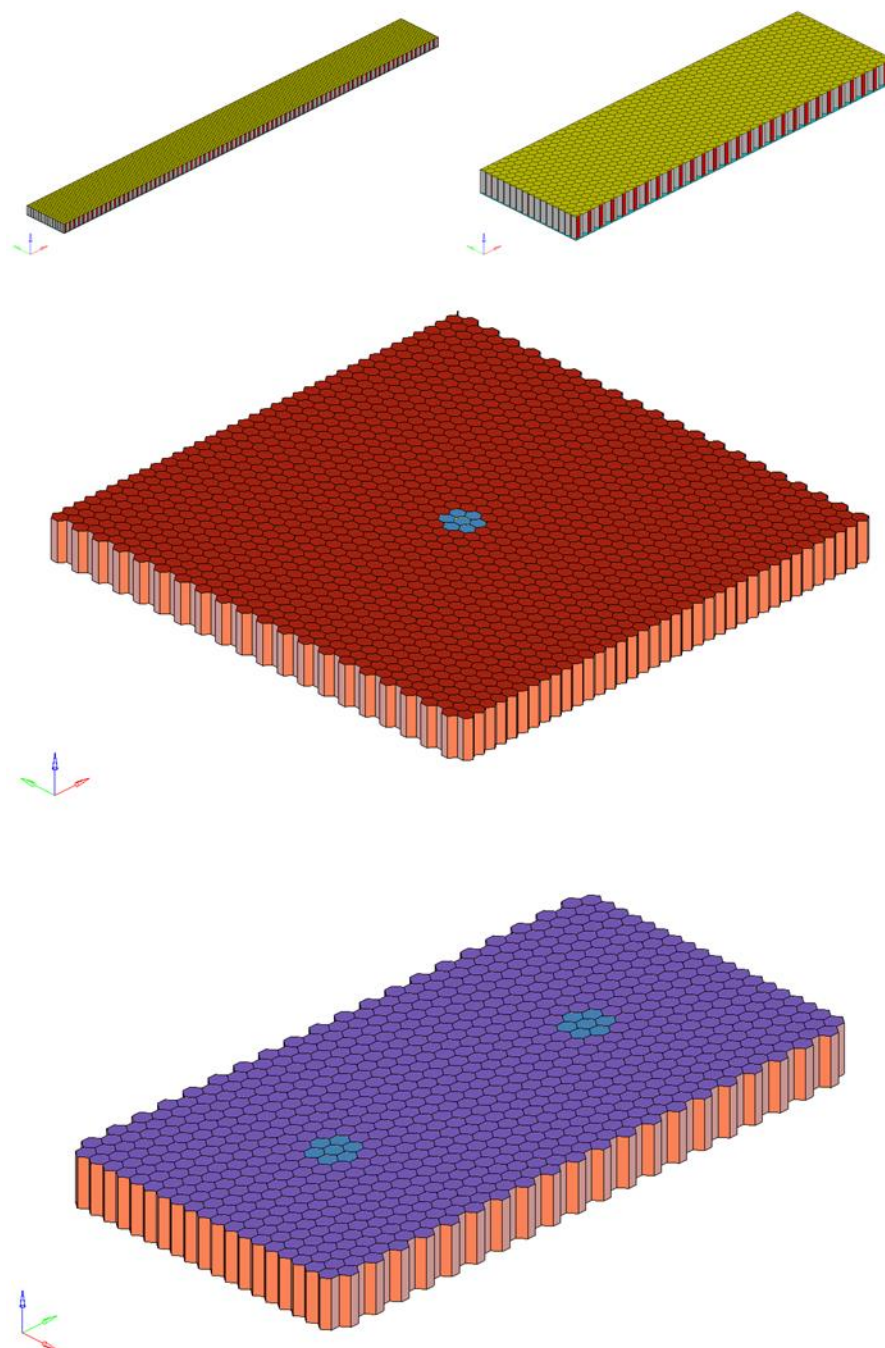
Nevýhodou tohoto modelu je velký počet elementů, který je desetkrát větší než u modelů s jádrem tvořeným objemovými elementy. Na druhou stranu je u tohoto modelu možné lépe vytvořit geometrii plniče, kde mohou být přímo vyplněné příslušné buňky, a tím docílit reálného tvaru plniče (viz Obr. 6.4) a ne jenom válcového zjednodušení.



**Obr. 6.4:** Porovnání reálného a vymodelovaného plniče

Na Obr. 6.5 jsou vidět modely s detailním 2D voštinovým jádrem. U modelů s insertovým spojem je vidět, že není model potahu dotážený až do kraje vzorku. Je to z důvodu

správného napojení sítě na jádro. Z výsledků výpočtů je pak vidět, že toto zjednodušení nemá velký vliv na chování modelu, jelikož se nachází v dostatečné vzdálenosti od hlavních koncentrací namáhání.

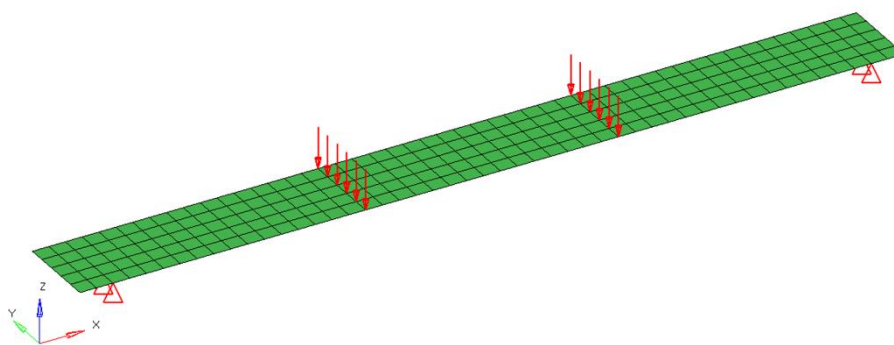


**Obr. 6.5:** Modely jednotlivých vzorků s detailním popisem jádra



## 6.4 Výpočet čtyřbodového ohybu

Na Obr. 6.6 je vidět poloha působišť zátěžné síly a okrajových podmínek. Tyto polohy se řídí pomocí Tab. 5.1 uvedené v Kapitole 5.2. Pro všechny délky vzorků a typy modelů byly použity stejné okrajové podmínky, u kterých byla snaha o uzavření co nejmenšího počtu stupňů volnosti. V tomto případě byly zakázány posuvy v ose Y, Z a rotace kolem os X, Z. Tímto nastavením by mělo být dosaženo přibližné náhrady dotykového kontaktu mezi vzorkem a přípravkem.



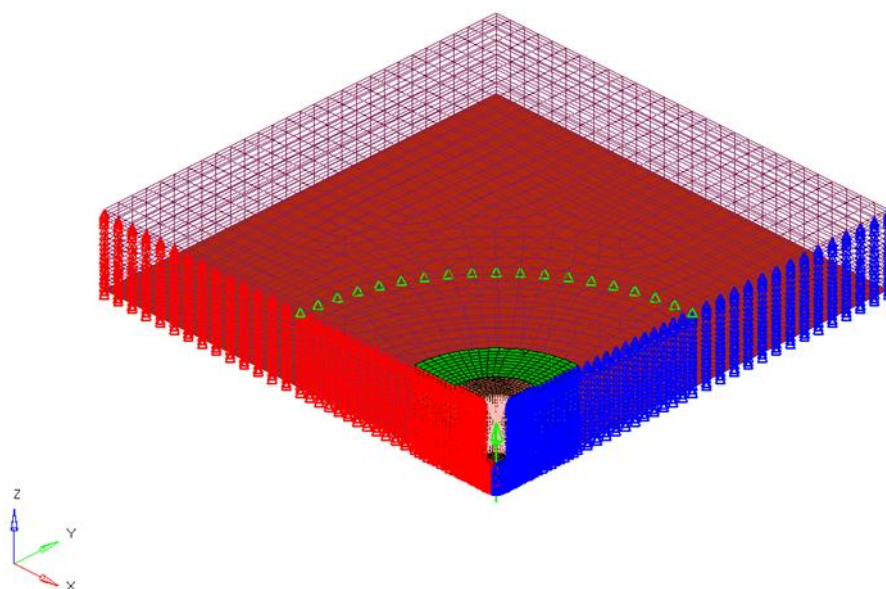
**Obr. 6.6:** Zatížení a okrajové podmínky

V Příloze 9.3 a 9.6 jsou uvedené výsledné průběhy závislosti zatížení na posuvu příčnicku pro vzorky s délkou 500 mm a 250 mm, kde je viditelná velmi dobrá shoda. V průběhu závislosti síly a poměrného prodloužení u vzorků s délkou 500 mm je viditelná odchylka, která je ovšem pro všechny typy modelů přibližně stejná, viz Graf 9.64. Tato odchylka je pravděpodobně způsobena nalepením tenzometrického snímače, který mohl být natočený od podélného směru.

U vzorků s délkou 167 mm je vidět v Příloze 9.9 odchylka výsledků u modelu s vrstvenými 2D elementy a u modelu s objemovými elementy s ortotropním materiálem jádra. U těchto dvou modelů je možné pozorovat nižší tuhost oproti ostatním modelům a měření, viz Graf 9.69 a Graf 9.71. Oproti tomu je vidět, že Graf 9.70 ukazuje pro všechny modely přibližně stejnou odchylku v porovnání s výsledky z tenzometrického snímače. Na základě tohoto výsledku je možné vytvořit závěr, že dané dva modely mají odchylku výsledků způsobenou nízkou tuhostí ve směru zatěžování, a tudíž mají špatnou odezvu na lokální zatížení, které v daném místě způsobují povrchovou deformaci sendviče.

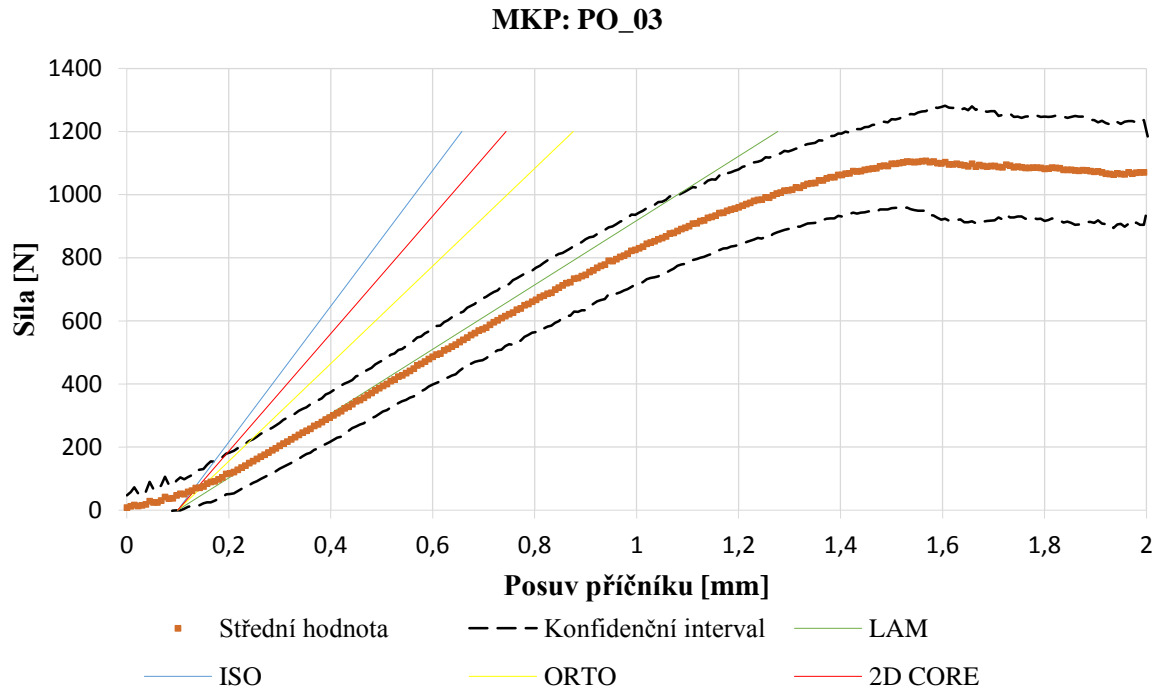
## 6.5 Výpočet vytržení ve směru osy insertu

Na Obr. 6.7 je vidět poloha působíště zátěžné síly a okrajových podmínek. Pro všechny typy modelů byly použity stejné okrajové podmínky, u kterých byla snaha o uzavření co nejmenšího počtu stupňů volnosti. V tomto případě byl zakázán posuv v ose Z (označen zeleně), dále byla zadána symetrie ve směru os X (označena modře) a Y (označena červeně). Tímto nastavením by mělo být dosaženo přibližné náhrady dotykového kontaktu mezi vzorkem a přípravkem.



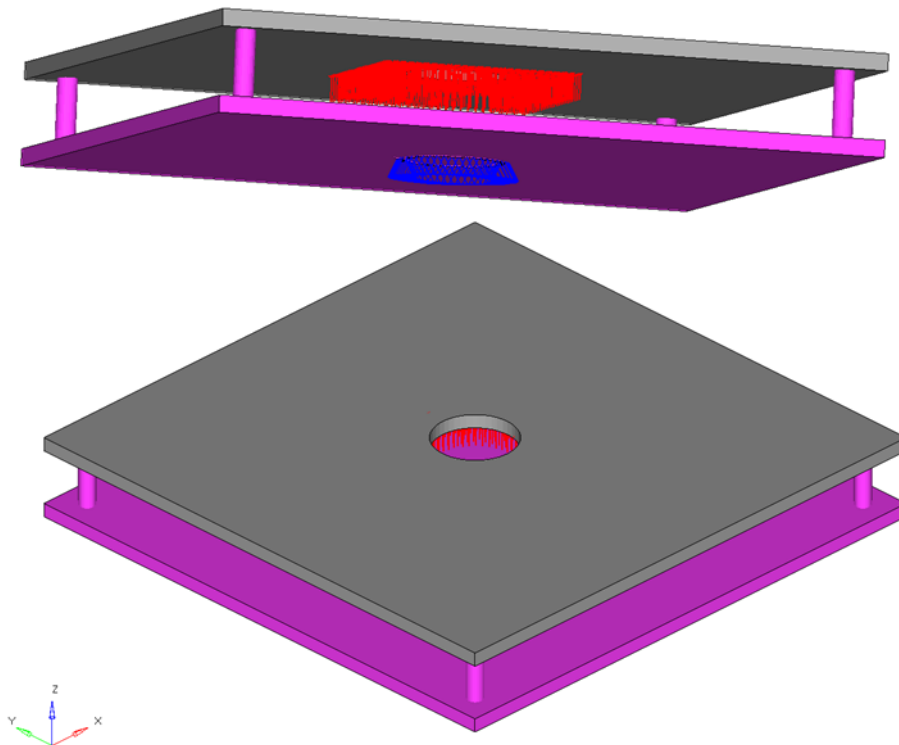
**Obr. 6.7:** Zatížení a okrajové podmínky

Výsledné deformace vzorků získané lineárním výpočtem jsou uvedeny v Příloze 9.26. Graf 6.1 zobrazuje uvedené výsledné průběhy závislosti zatížení na posuvu příčnicku. Počátek získaných průběhů je posunut o 0,1 mm na ose X, jelikož tento bod by byl přibližně získán protažením lineární části experimentálního průběhu. Z výsledků je vidět, že kromě modelu s 2D vrstvenými elementy, mají modely výrazně vyšší tuhost. To je pravděpodobně způsobeno přidáním velmi tuhého insertového spoje do modelu a malou volnou plochou sendvičové struktury v jeho okolí.



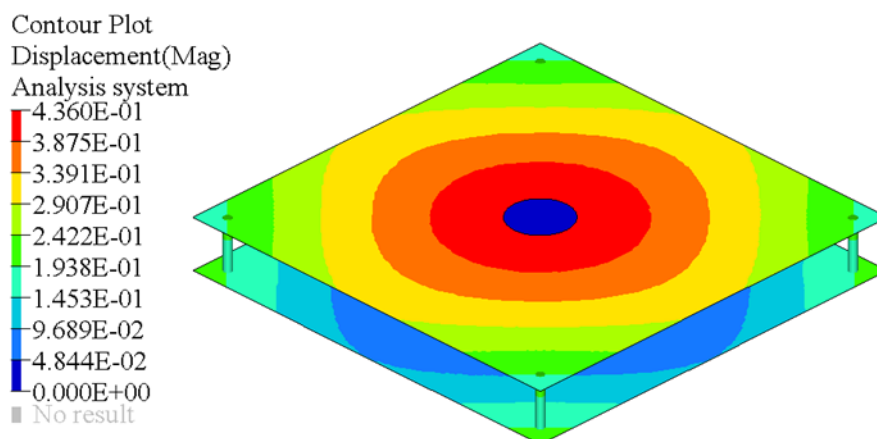
**Graf 6.1:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na posuvu příčnicku

Výsledky testů mohou být ovlivněny poddajností přípravku, který byl použit. Na základě tohoto předpokladu byl vytvořen výpočetní model, aby bylo možné zjistit ovlivnění výsledného průběhu, jestliže se do něj započte deformace přípravku.



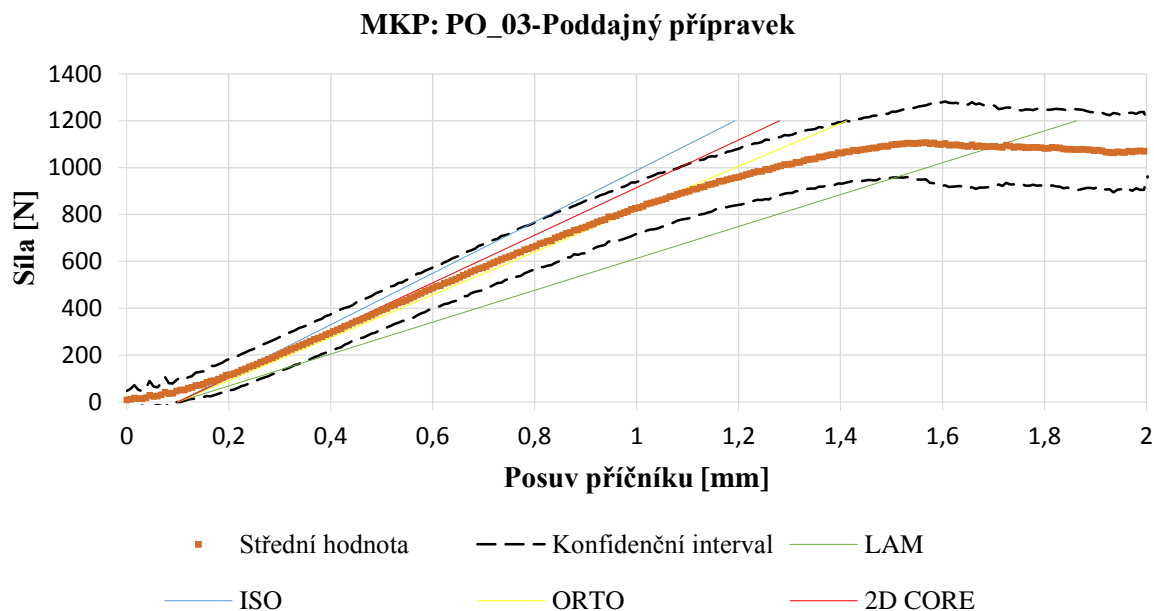
**Obr. 6.8:** Zatížení a okrajové podmínky na přípravek

Na Obrázku Obr. 6.8 je vidět vytvořený výpočtový model se zatížením a okrajovými podmínkami. Zatížení bylo realizováno pomocí tlaku (označen červeně), které odpovídá kontaktnímu tlaku mezi vzorkem a přípravkem. Na spodní straně je vidět umístění okrajových podmínek, které v daném místě odebírají všechny stupně volnosti.



**Obr. 6.9:** Výsledná deformace přípravku

Výsledná deformace přípravku při daném zatížení je zobrazena na Obr. 6.9. Jestliže rozpočítáme experimentálně získanou deformaci mezi deformaci přípravku a vzorku, získáme nové průběhy závislosti síly na posuvu příčnicku, které zobrazuje Graf 6.2.



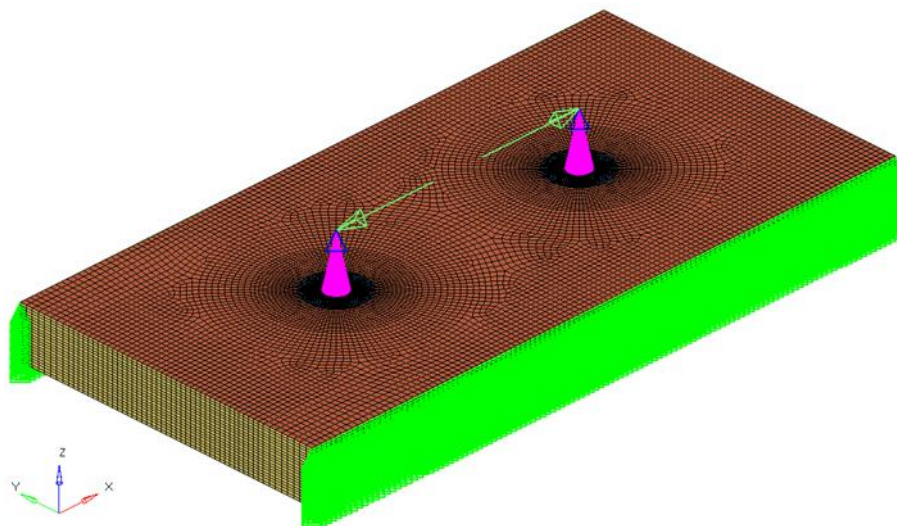
**Graf 6.2:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti při deformaci přípravku

U nově získaných průběhů, viz Graf 6.2, je vidět mnohem lepší shoda s experimentálně získaným průběhem. Nejlepší shodu vykazuje model s objemovými elementy a ortotropním materiálem jádra.



## 6.6 Výpočet vytržení kolmo na směr osy insertu

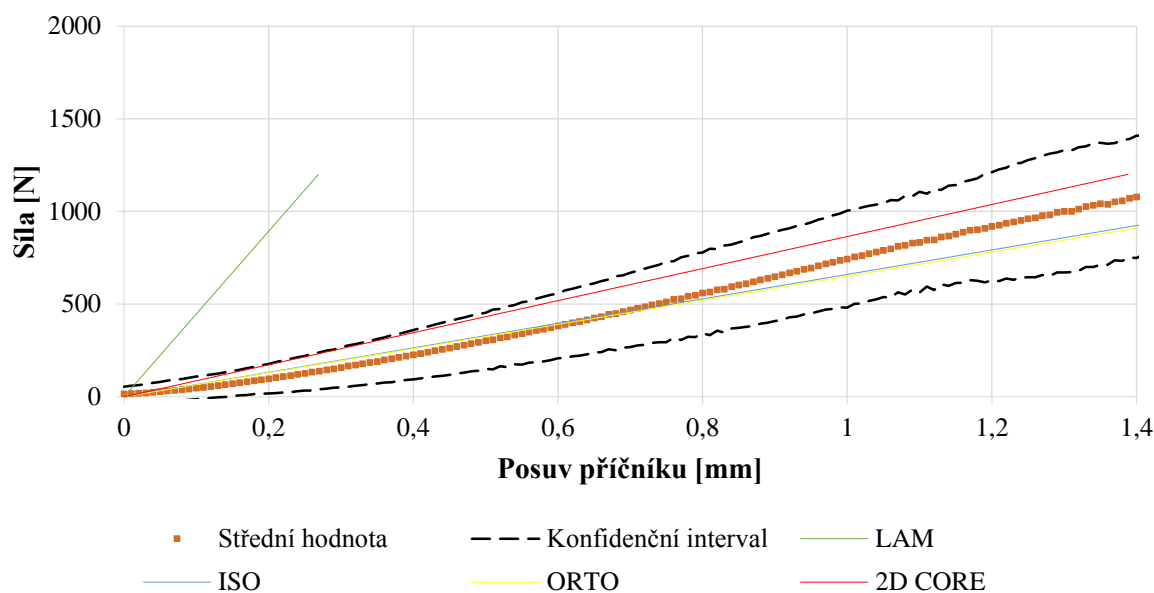
Na Obr. 6.10 je vidět poloha působišť zátěžných sil a okrajových podmínek. V tomto případě nejsou užity okrajové podmínky k uchycení modelu ve směru zatěžování, z toho vyplývá, že jedna zadaná síla je zátěžná a druhá o stejné velikosti a opačného směru je síla reakční. Působišťe síly bylo posunuto do středu přípravku, čímž by se do modelu měl zanést přídatný ohyb a výpočet bude lépe odpovídat reálné zkoušce. Síla je do modelu přenesena pomocí RBE2 tuhého elementu. Pro všechny typy modelů byly použity stejné okrajové podmínky, u kterých byla snaha o uzavření co nejmenšího počtu stupňů volnosti. V tomto případě byl zakázán posuv v ose Y (označen modře) a rotace kolem osy X (označena zeleně), aby se zabránilo kroucení modelu.



**Obr. 6.10:** Zatížení a okrajové podmínky

Výsledné deformace vzorků získané lineárním výpočtem jsou uvedeny v Příloze 9.27. Graf 6.3 zobrazuje výsledné průběhy závislosti zatížení na posuvu příčnicku. Z výsledků je vidět, že kromě modelu s 2D vrstvenými elementy, který vykazuje výrazně vyšší tuhost, mají ostatní modely velmi dobrou shodu. Model s 2D vrstvenými elementy popisuje reálnou geometrii vzorku velmi zjednodušeně, proto pravděpodobně není schopný správně popsat více lokálních vyztužení sendvičové struktury.

### MKP: SH\_03



**Graf 6.3:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na posuvu příčnicku

## 7 Nelineární simulace

Tato kapitola se bude zabývat komplexnějším popisem chování modelu, kde dochází k vytržení ve směru osy insertu. Jak bylo zmíněno v Kapitole 5.7.2, nejpravděpodobnější poruchou při tomto zatěžování je delaminace plniče od spodního potahu. Toto porušení způsobuje ztrátu tuhosti insertového spoje a projevuje se snížením měřené síly, viz Graf 9.42.

Nelineární analýza modelu pro vytržení kolmo na osu insertu nebyla počítána z důvodu nedostatečné znalosti materiálového modelu plniče, jehož porušení by mělo způsobovat první pokles tuhosti, viz kapitola 5.7.3.

Numerická analýza včetně přípravy modelu a výpočtové sítě byla vytvořena v programu ANSYS Workbench 16.1, a to za využití prostředí programů DesignModeler a ANSYS Mechanical. Tento program byl zvolen díky jeho implementovanému řešení kontaktních úloh pomocí zóny kohezních prvků. Využitím těchto kontaktních prvků je možné simulovat odlepení dvou na sebe přilehlých komponent.

Pro větší přesnost bude tato úloha řešená jako kontaktní, díky čemuž jsou do výpočtu vneseny nelinearity. První nelinearitou je přenos sil mezi vzorkem a přípravkem, který je realizovaný pomocí dotykového kontaktu bez tření mezi vzorkem a přípravkem. Dotykový kontakt bez tření byl zvolen z důvodu neznalosti koeficientu tření mezi laminátem a ocelí.

Úloha s tímto typem kontaktu dále vykazovala lepší konvergenci řešení než pokusy s kontaktem třecím. Druhou nelinearitou je kontakt, který způsobí odlepení mezi spodním potahem a plničem. Kontakt byl realizovaný v jednom případě již zmíněnou zónou kohezních prvků a ve druhém případě byl napsán podprogram, který řídil odlepení mezi komponentami.

Hlavním vstupem do analýzy jsou experimentálně zjištěné zátěžné stavy. Pro měkké zatížení modelu byl použit naměřený posuv příčnicku, který určoval vynucenou deformaci v daném místě modelu. Na základě zátěžného stavu pro vytržení ve směru osy insertu byly u modelu sledovány výsledné reakce, podle kterých byly modifikovány materiálové hodnoty, aby bylo docíleno odpovídající tuhosti. Poté se získané materiály využili pro simulaci čtyř bodového ohybu, a tím by měla být potvrzena tuhost modelu i při jiném typu zatížení.

Výpočtové modely byly zjednodušeny na interakci mezi vzorkem a přípravkem. Dalším zjednodušením je modelování potahů pomocí 2D elementů, které na rozdíl od lineárních výpočtů nebyly modelovány pomocí vrstev, ale byla použita tuhostní náhrada jedné vrstvy o dvojnásobné tloušťce. Jelikož nebyly pozorovány jakékoliv interlaminární poruchy, nemělo by toto zjednodušení výrazně ovlivnit celkový výsledek. Připojení potahu a jádra je v těchto analýzách realizováno pomocí lineárního kontaktu, který pevně spojuje obě komponenty (Označení kontaktu v programu ANSYS: „Bonded“). Daný kontakt se řídil formulací tzv. „Pure Penalty“. Mezi vzorkem a přípravkem byl použit dotykový kontakt bez tření (Označení kontaktu v programu ANSYS: „Frictionless“), který se řídil formulací tzv. „Augmented Lagrange“.

Daná analýza byla řešená jako statická časově nezávislá, jelikož i u reálných experimentů byla snaha o statické zatěžování. Pro potah byly použity 2D lineární Quad4 elementy, pro voštinové jádro a plnič byly použity kvadratické objemové CHEXA elementy. Pro materiál jádra a potahu byl použit ortotropní materiálový model a pro plnič byl přiřazen isotropní materiálový model.

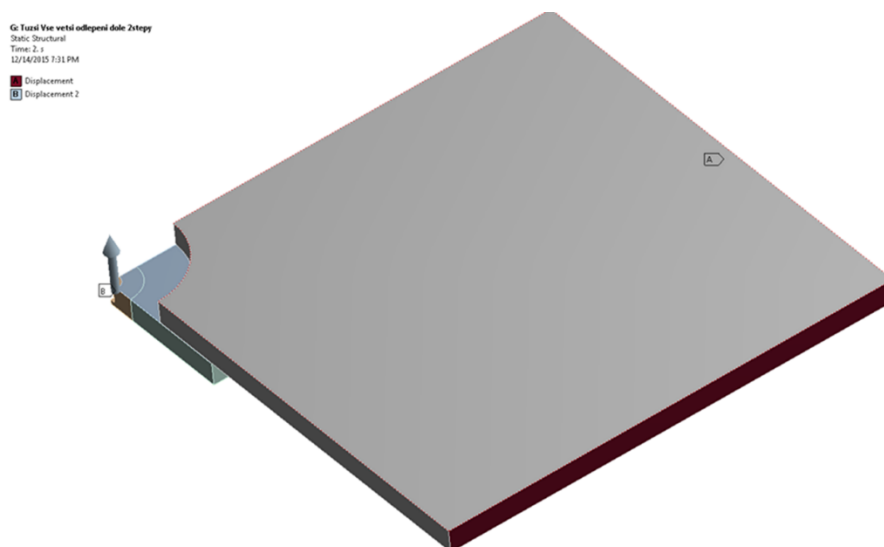
## **7.1 Návrh materiálů pro nelineární analýzu**

Jak bylo zmíněno výše, je nutné pro potřeby nelineární analýzy určit materiálové vlastnosti jednotlivých komponent. Pro účely návrhu materiálů je vytvořen model pro vytržení ve směru osy insertu, kde ještě nejsou použity kontakty pro odlepení plniče od spodního potahu. Dále je vytvořen ověřovací model pro analýzu čtyř bodového ohybu, na jejímž základě se určí správnost navržených materiálů. Pro první iteraci návrhu materiálu byly zvoleny materiály,

keré byly použity u lineárních výpočtů pro model s objemovými elementy a ortotropním popisem materiálu jádra.

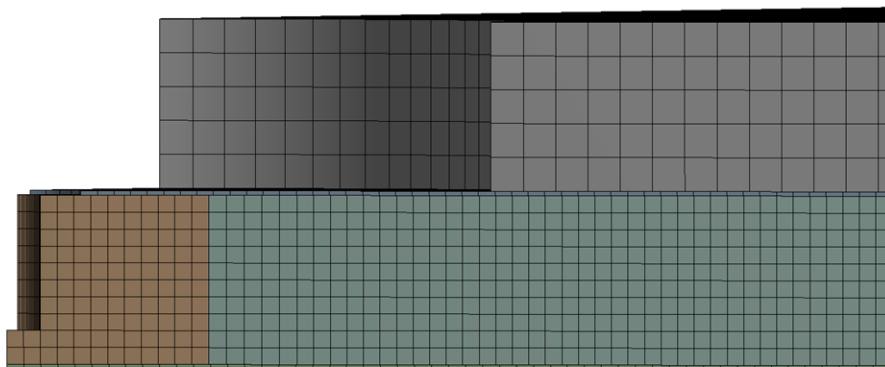
### 7.1.1 Nelineární výpočet vytržení ve směru osy insertu

Na Obr. 7.1 je vidět výpočtový model pro nelineární analýzu vytržení ve směru osy insertu. Na základě předchozích výpočtů a výsledků testů je insertový spoj nahrazen jednou komponentou, které je přiřazen isotropní materiálový model odpovídající materiálu plniče. Zatěžování pomocí předepsaného posuvu je umístěno uvnitř závitové díry insertu (zobrazeno šedou šipkou). Okrajové podmínky zakazující posuvy ve všech třech osách jsou aplikovány na vnější plochy přípravku (zobrazeno červeně). Model je pro zjednodušení a zkrácení výpočtového času vytvořen ve čtvrtinovém řezu. Okrajové podmínky symetrie jsou přiřazeny plochám v rovině řezů.



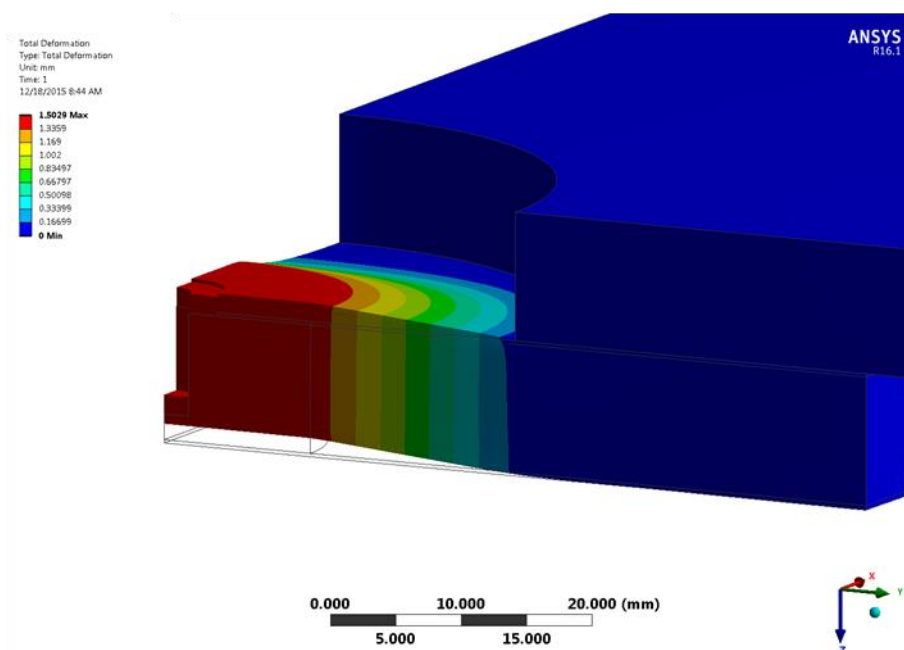
**Obr. 7.1:** Zatížení a okrajové podmínky

Pro získání přesných výsledků a docílení lepší stability nelineárního výpočtu je nutné vytvořit síť, ve které nebudou vznikat singulární body a nebudou do sebe penetrovat jednotlivé komponenty v důsledku dotyku komponent s velkou vzdáleností mezi uzly sítě. Vzhledem k použité síti viz Obr. 7.2, je kvalita elementů velmi vysoká, což bylo ověřeno výpočtem na modelu s hustší sítí, přičemž výsledky se jen minimálně lišily.

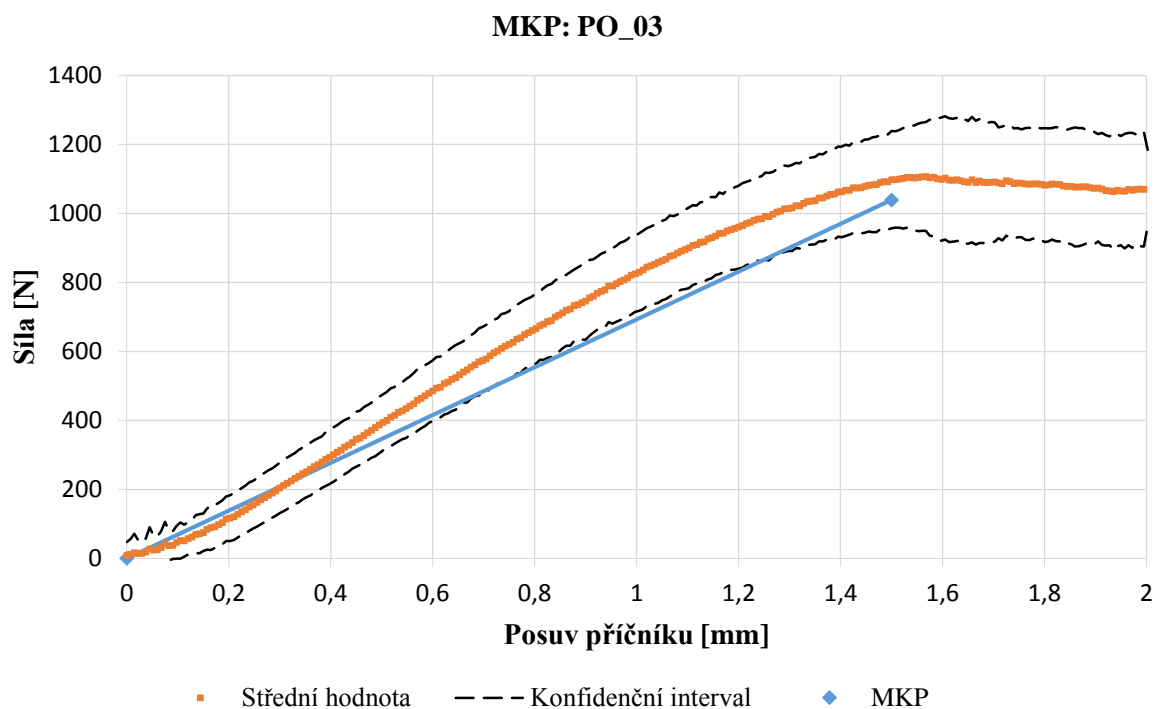


**Obr. 7.2:** Zobrazení konečně prvkové sítě

Výsledná deformace modelu je zobrazena na Obr. 7.3 a průběh závislosti síly na posuvu příčnicku ukazuje Graf 7.1. Tyto výsledky platí pro optimalizované materiálové konstanty, které jsou uvedeny v Příloze 9.32.4. Z těchto výsledků a optimalizovaných materiálových konstant je patrné, že po přidání dotykových kontaktů bez započítání tření, došlo k výraznému změkčení modelu oproti výsledkům lineárních analýz. Výsledek ovšem spadá do konfidenčního intervalu a tudíž je považován za dostačující shodu výpočtu s experimentem.



**Obr. 7.3:** Zobrazení výsledné deformace



**Graf 7.1:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na posuvu příčnicku

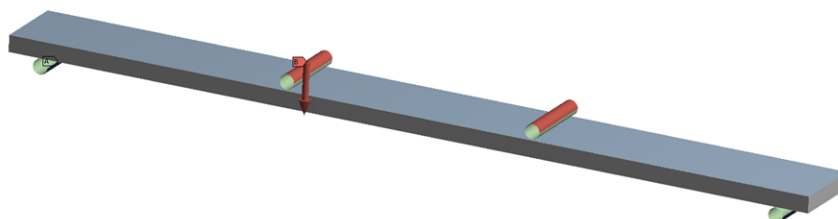
### 7.1.2 Nelineární výpočet čtyř bodového ohybu

Na Obr. 7.4 je ukázán výpočtový model pro nelineární analýzu čtyř bodového ohybu. V tomto případě dochází k měkkému zatěžování modelu pomocí vynuceného posuvu horních zátěžných těles, které reprezentují zatěžovací část přípravku. Geometrie zátěžných těles je pouze zjednodušením dotykové plochy přípravku za účelem adekvátního přenesení zatížení mezi přípravkem a vzorkem. Zátěžným tělesům byl přiřazen isotropní materiál odpovídající oceli. U tohoto typu zatížení nedochází k přenosu tak velkých sil, aby bylo nutné započítávat do výsledků deformaci přípravku.

Zátěžné i opěrné tělesa byly modelovány pomocí 2D skořepinových elementů a byly rozděleny na dvě poloviny. Na polovinu vzdálenější od povrchu vzorku byly aplikovány okrajové podmínky a na druhou polovinu byly zadány dotykové kontakty mezi vzorkem a přípravkem. Tento postup byl zvolen za účelem odstranění numerických nepřesností, které by mohly vzniknout díky zadání předepsaných posuvů a kontaktů na jedné ploše.

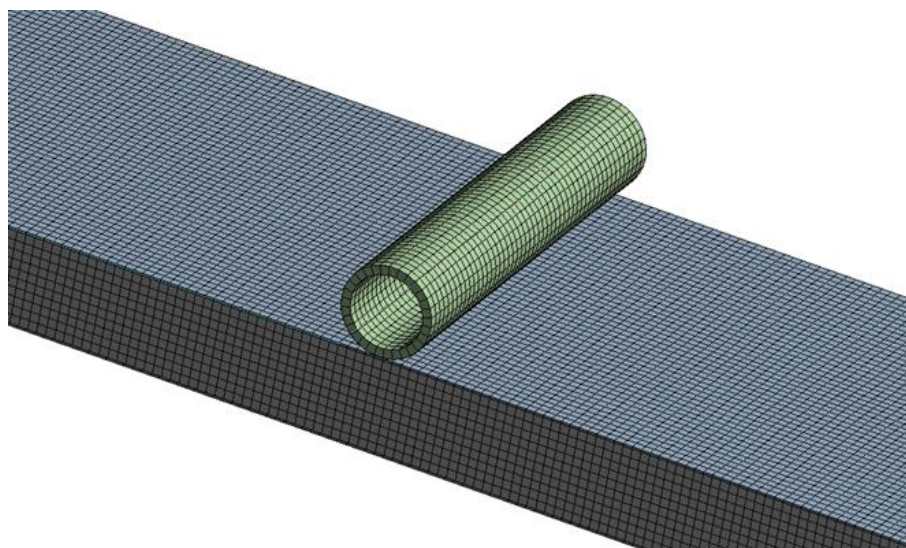
Okrajové podmínky zakazující posuvy ve všech osách jsou umístěny na spodních opěrných tělesech (označeny modře) a na horních zátěžných tělesech je předepsaný posuv, který je dán zátěžným stavem získaným z experimentu.

It: Copy of frictionless augmented lagrange - 22mm  
State: Structural  
Time: 1, 6  
13.12.2015 17:26  
■ Displacement  
■ Displacement 2



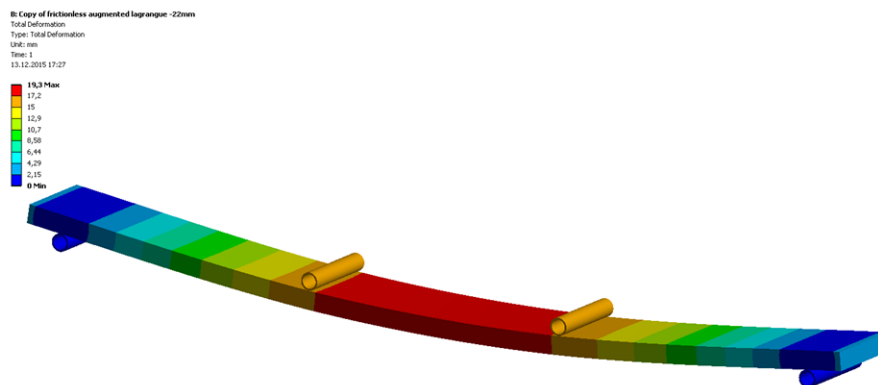
**Obr. 7.4:** Zatížení a okrajové podmínky

Na Obr. 7.5 je ukázána konečně prvková síť modelu pro čtyřbodový ohyb, která splňuje stejné podmínky, jaké byly pro případ vytržení ve směru osy insertu.



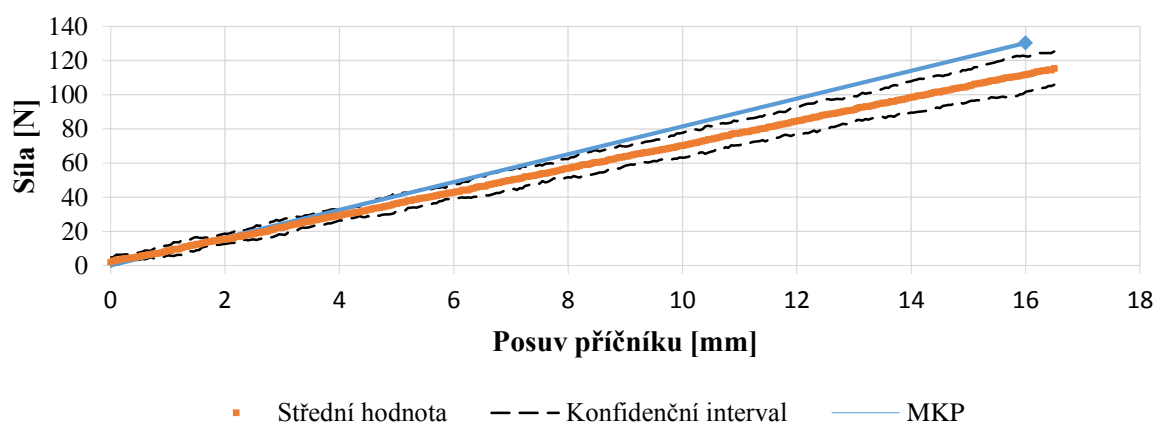
**Obr. 7.5:** Zobrazení konečně prvkové sítě

Výsledná deformace modelu je zobrazena na Obr. 7.6 a průběh závislosti síly na posuvu příčnicku ukazuje Graf 7.2. Tyto výsledky platí pro kontrolu optimalizovaných materiálových konstant, které jsou uvedeny v Příloze 9.32.4. Graf 7.2 ukazuje odchylku, která je způsobena vyšší tuhostí modelu, než byla tuhost zkušebních vzorků. Hodnoty výsledných výpočtových sil a střední hodnoty měřené síly se při posuvu zátěžného přípravku o 16 mm liší o 14%. Tato odchylka je přijatelná, jelikož materiálové modely jsou navrženy hlavně pro účely modelu pro vytržení ve směru osy insertu.



**Obr. 7.6:** Zobrazení výsledné deformace

### MKP: 4PB\_03



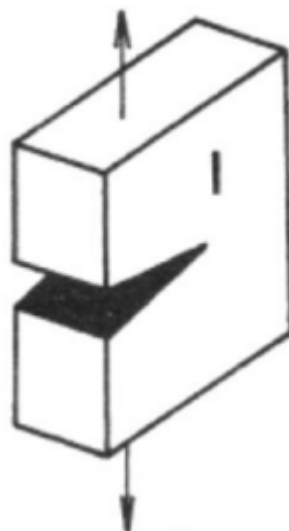
**Graf 7.2:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na posuvu příčnicku

## 7.2 Nelineární výpočet se započítáním delaminace

Pro simulaci odlepení plniče od spodního potahu je využit kontakt, který je implementovaný v programu ANSYS 16.1. Použitý kontakt pro delaminaci (Označení kontaktu v programu ANSYS: „Debonding“) je rozšířením pevného kontaktu, který drží jednotlivé komponenty pevně u sebe. Z toho vyplývá, že dané komponenty jsou pevně spojeny do té doby, než je splněna podmínka pro odlepení, kdy se v místech splnění podmínky daný pevný kontakt vypne.

Případ odlepení byl řešen jako mód I, při kterém je šíření trhliny řízeno tahovou složkou tenzoru napětí. Jak je vidět na Obr. 7.7, při tomto módu zatížení dochází k rozevírání čela trhliny.



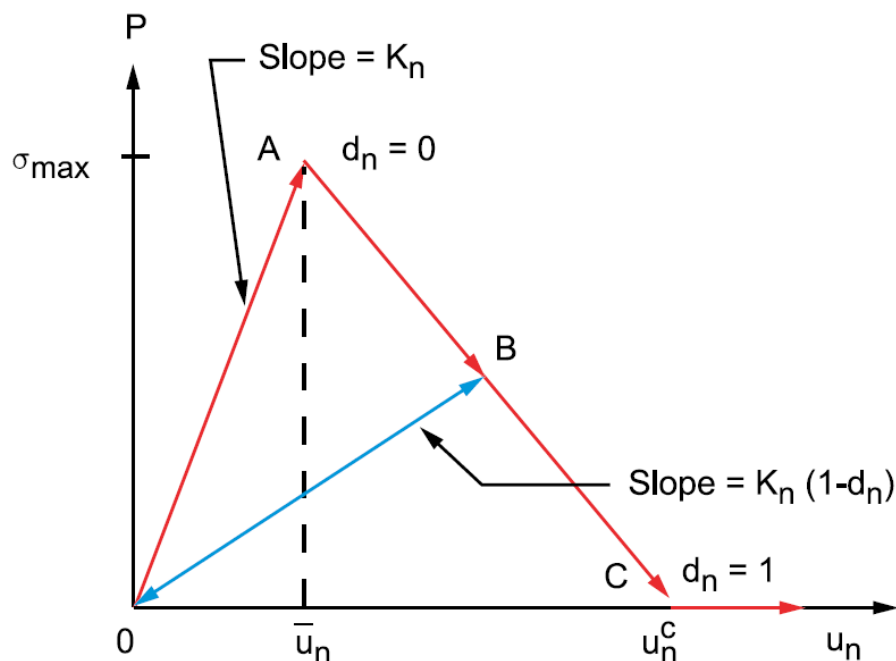


**Obr. 7.7:** Tahový mód I pro šíření trhliny [75]

Pro kontakt, který řídí delaminaci je mód I definován jako separace styčných ploch ve směru normály, což je zapříčiněno usmýknutím v tangenciálním směru. Závislost mezi normálovým kontaktním napětím a vzdáleností kontaktních ploch je zobrazuje Graf 7.3. V grafu je vidět lineární elastické zatěžování (úsečka OA), která je následována lineárním změkčením (úsečka AC). Maximálního napětí v normálovém směru je dosaženo v bodě A, kde začíná delaminace daného kontaktu. V bodě C pak dosáhne hodnota normálového napětí nulové hodnoty, což znamená úplnou delaminaci kontaktních ploch.

Plocha, která je ohraničena křivkou OAC, udává nutnou energii pro úplnou delaminaci kontaktních ploch a je nazývána kritickou lomovou energií. Směrnice úsečky OA je dána poměrem vzdálenosti kontaktních ploch při maximálním normálovém kontaktním napětí. Směrnice přímky AC udává závislost jak se zvyšující se vzdáleností kontaktních ploch od bodu A klesá normálové kontaktní napětí. Tento pokles, který zobrazuje růst trhliny, je závislý na použitém materiálu a to zejména, jestli je materiál křehký nebo houževnatý.

Jakmile je jednoduše přesazen bod A, už je v modelu zanesena trhlina, a tudíž se předpokládá, že po odlehčení a znovuzatížení poroste zatížení podle jiné směrnice než tomu bylo u úsečky OA. Při zanesení trhliny do modelu dojde ke snížení jeho tuhosti, a proto směrnice lineárního elastického zatížení bude nižší, jak je popsáno úsečkou OB, viz Graf 7.3.



**Graf 7.3:** Křivka normálového kontaktního napětí a vzdálenosti kontaktních ploch pro bilineární materiál kohezní zóny [80]

Veličiny popisující Graf 7.3:

- $P$  = normálové kontaktní napětí
- $K_n$  = normálová kontaktní tuhost
- $u_n$  = vzdálenost kontaktních ploch
- $\bar{u}_n$  = vzdálenost kontaktních ploch při maximálním normálovém napětí
- $u_n^C$  = vzdálenost kontaktních ploch při úplné delaminaci
- $d_n$  = delaminační parametr

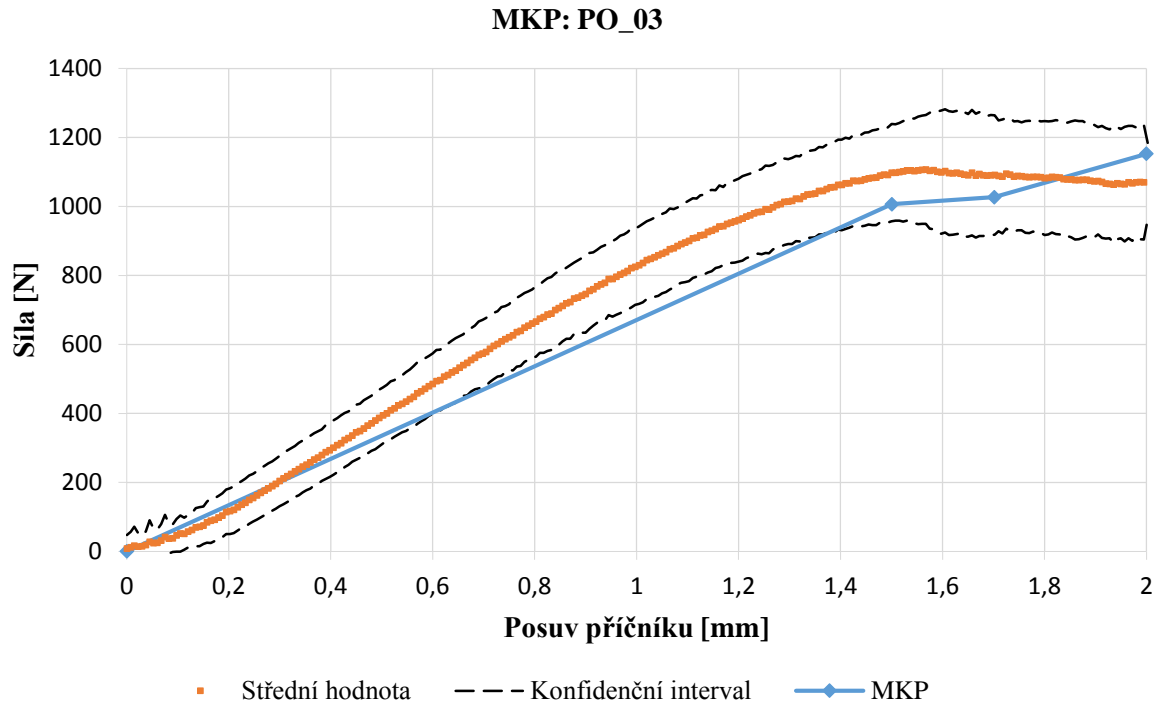
Při zadávání delaminačního kontaktu nejvíce záleželo na parametru maximálního normálového kontaktního napětí, při kterém se dané styčné plochy začnou separovat. Pro počáteční odhad tohoto parametru byly použity výsledky normálového kontaktního napětí, které byly získány z výsledků uvedených v Kapitole 7.1.1. U tohoto kontaktu se však v průběhu návrhu vyskytl problém, že dané kontaktní plochy byly separovány buďto ihned při započetí zatěžování nebo nebyly separovány vůbec. Po několika iteracích bylo určeno rozmezí  $0,01 - 0,1 \text{ N/mm}^2$ , ve kterém by se měl vyskytovat parametr maximálního kontaktního napětí, pro odlepení odpovídající experimentálně získanému průběhu.

Na základě nezdaru s delaminačním kontaktem byly vytvořeny příkazy, které řídí odlepení kontaktních ploch uvnitř analýzy v programu ANSYS. Jednou variantou je vypnutí

lineárního pevného kontaktu při dosažení kritické deformace, která byla získaná experimentem. Druhou variantou je vypnutí lineárního pevného kontaktu po dosažení určité hodnoty von Misesova ekvivalentního napětí. Toto napětí bylo vybráno na základě rozložení jeho výsledků v kritické oblasti. Zdrojové kódy variant jsou ukázány v Příloze 9.34.1 resp. 9.34.2. V obou případech dochází k okamžité delaminaci celé kontaktní plochy. Tímto postupem je zjednodušeně reprezentována rázová ztráta tuhosti, jako tomu bylo u měřených výsledků.

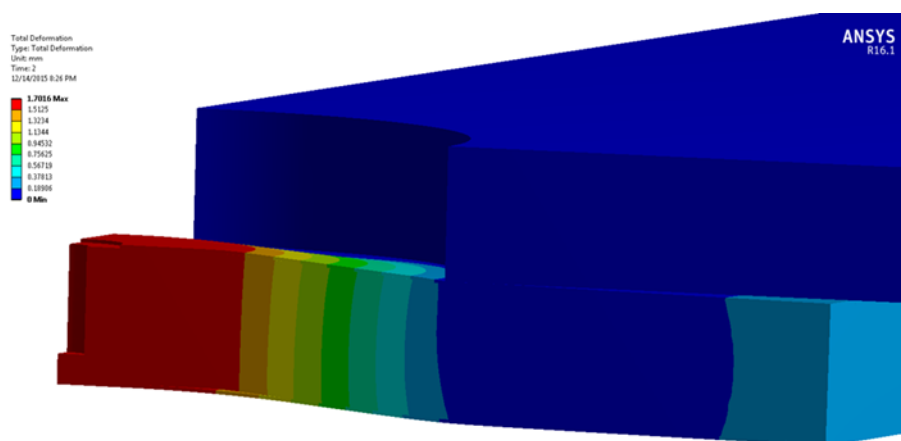
Pro získání konečných výsledků byl použit příkaz, který vypíná lineární pevný kontakt po dosažení určité vynucené deformace. Analýza je realizována tak, že je rozdělena do dvou kroků. V prvním kroku je dosaženo měkkým zatěžováním kritické deformace, při které byl experimentálně zjištěn výskyt první nelinearity. Po tomto kroku byly programově označeny kontaktní elementy v oblasti, kde mělo dojít k delaminaci a byly smazány. Smazáním kontaktních elementů došlo k rozpojení daných komponent a tudíž ke ztrátě tuhosti, která se projevila ve výsledném průběhu závislosti zatížení na deformaci. Jestliže docházelo k delaminaci pouze pod plochou plniče nebyla ztráta tuhosti dostačující, aby odpovídala experimentálním výsledkům. Na základě tohoto výsledku byla kontaktní plocha pro delaminaci zvětšena tak, že docházelo i k delaminaci jádra od spodního potahu.

Graf 7.4 ukazuje výsledný průběh závislosti zatížení na posuvu příčnicku. U hodnoty posuvu 1,5 mm je vidět vliv delaminace, který vede ke ztrátě tuhosti a změně směrnice dané závislosti. Od posuvu 1,7 mm nastává opětivé zvýšení tuhosti, což je v rozporu s měřenými výsledky. Vyšší výpočtová tuhost v poslední části grafu určuje maximální posuv, pro kterou je možné použít daný výpočtový model. Jestliže by výpočtová deformace překročila hodnotu 2 mm, výsledná síla by byla mimo konfidenční interval a zvyšovala by se chyba, se kterou by byl výpočet proveden. Na druhou stranu výsledky tužšího modelu budou více konzervativní, a i když se s deformací bude chyba výpočtu zvyšovat, výsledné hodnoty budou na straně bezpečnosti

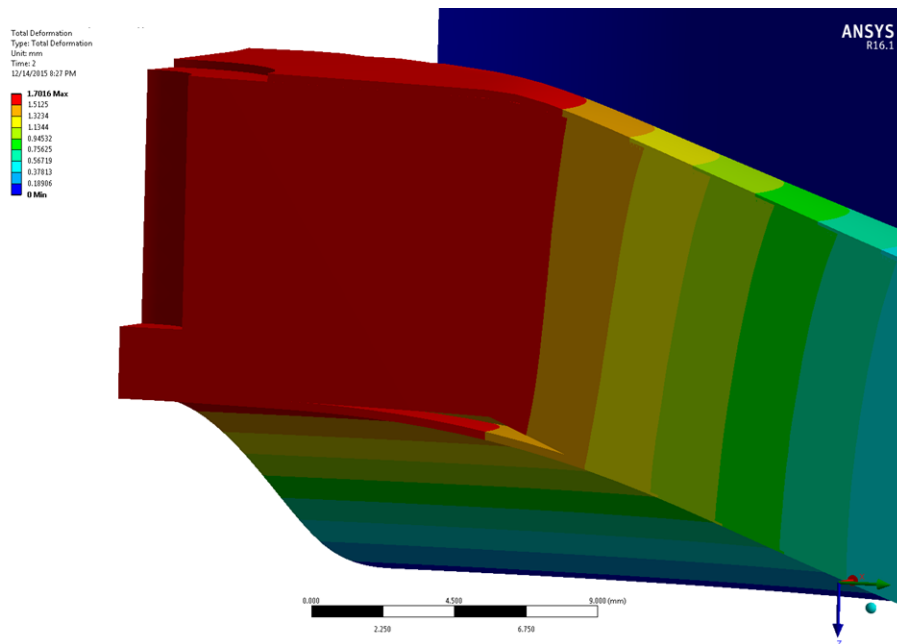


**Graf 7.4:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na posuvu příčnicku se započítáním delaminace

Na Obr. 7.8 je zobrazena výsledná deformace pro měkké zatížení o 1,7 mm. Na Obr. 7.9 je detailně zobrazena delaminace od spodního potahu. Nejlépe je delaminace viditelná na vnějším okraji plniče. Vnitřní část delaminovaného potahu měla tendenci po odlepení penetrovat do modelu plniče. Proto byl v oblasti delaminovaného povrchu přidán dotykový kontakt, který začal oddělovat komponenty ihned po programovém vypnutí pevného kontaktu.



**Obr. 7.8:** Zobrazení výsledné deformace



**Obr. 7.9:** Detail zobrazení výsledné deformace

## 8 Závěr

Diplomová práce se zabývá sendvičovými strukturami, které jsou ve velké míře užívané pro interiérové aplikace v letectví. Zaměření práce je na získání ohybové tuhosti sendvičových panelů a na konstrukční řešení pro přenos bodového zatížení, které je realizované pomocí insertových spojů.

Pro účely této práce byly vyrobeny zkušební vzorky o několika konfiguracích skladby sendvičové struktury a pro tři zvolené typy namáhání. Na základě testů zkušebních vzorků vzniklo relativně velké množství dat, které popisují komplikované chování tohoto typu kompozitního materiálu. Z výsledků experimentů je zjištěn typický mód porušení pro jednotlivé konfigurace. Dále je získán průběh závislosti síly na posuvu příčnicku, kde se z lineární části dají odečíst hodnoty zatížení, při kterých nedojde k trvalému poškození dané struktury. Tyto hodnoty zatížení mohou být použity přímo pro návrh nové konstrukce jako maximální dovolené hodnoty.

Lineární část průběhu závislosti síly na posuvu příčnicku byla využita pro návrh materiálů a modelů pro lineární statickou analýzu pomocí metody konečných prvků. Z analýz jednotlivých modelů byla zjištěna dobrá shoda mezi experimentálními a vypočtenými výsledky. Z těchto výsledků vyplývá, že pomocí metody konečných prvků je možné s velkou přesností

simulovat tuhost sendvičových konstrukcí. Toto tvrzení však platí pouze pro lineární elastické zatěžování.

Pro určité konstrukce existují předpisy kritického zatížení, při kterém dojde k trvalému poškození. Na základě tohoto požadavku byl vytvořen model pro vytržení ve směru osy insertu, u kterého dochází při dosažení kritického zatížení k delaminaci plniče od spodního potahu. Pro účely nelineárního výpočtu byl vytvořen příkaz v prostředí programu ANSYS 16.1, který řídil odlepení mezi danými komponentami. Díky tomuto postupu bylo možné určit ztrátu tuhosti modelu, která odpovídala experimentálně získaným výsledkům.

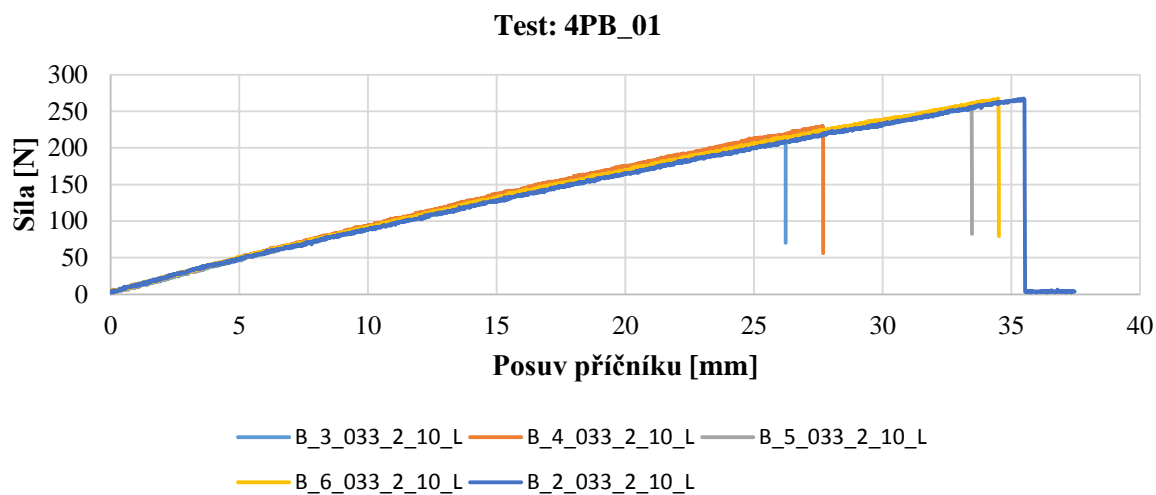
V této práci byla experimentálně určována a numericky ověřována tuhost sendvičové struktury jako celku. Znalost chování jednotlivých materiálů vycházela pouze z materiálových listů, které ale neobsahovaly veškeré nutné informace o mechanických vlastnostech. Z tohoto důvodu by měly být provedeny zkoušky jednotlivých materiálů pro možnost přesnějšího popisu sendvičové struktury. Na základě těchto zkoušek mohou být dále nalezeny parametry pro využití pevnostních kritérií kompozitních materiálů, které mohou být využity pro predikci porušení potahů.

## 9 Přílohy

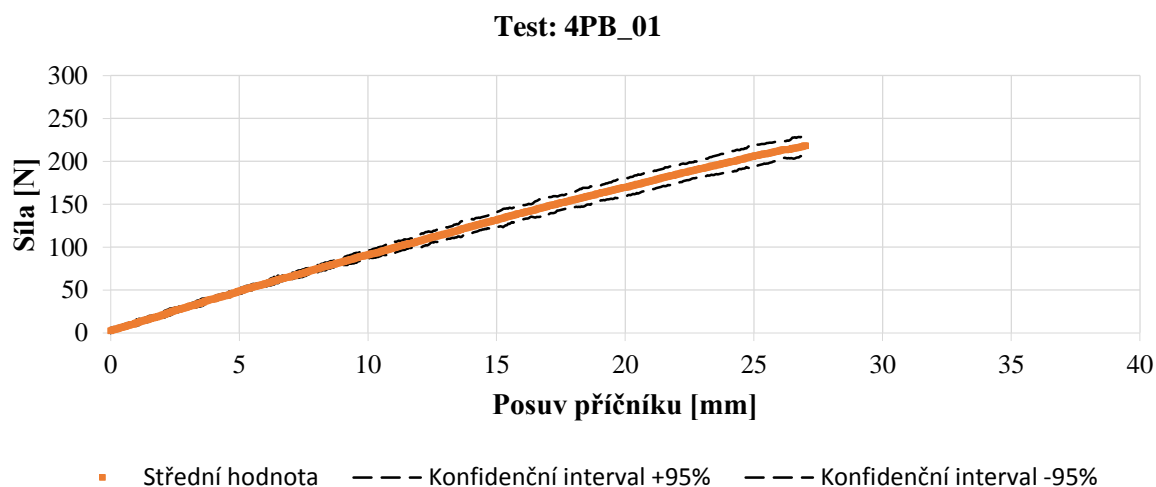
### 9.1 Výsledky testu s označením: 4PB\_01

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	<i>T1</i>	<i>TS</i>	<i>T3</i>	<i>Š1</i>	<i>ŠS</i>	<i>Š3</i>	<i>v</i>	<i>f</i>	<i>Fmax</i>	
B_3_033_2_10_L	10,45	10,42	10,40	50,57	49,99	50,49	8	12	218,1	DAT
B_4_033_2_10_L	10,41	10,41	10,42	50,45	50,13	50,39	8	12	229,7	DAT
B_5_033_2_10_L	10,41	10,40	10,40	50,08	50,01	50,60	8	12	259,1	DGT
B_6_033_2_10_L	10,44	10,42	10,44	50,56	50,03	50,41	8	12	267,6	FAT
B_2_033_2_10_L	10,42	10,41	10,41	50,39	50,11	50,23	4	6	267,4	DAT

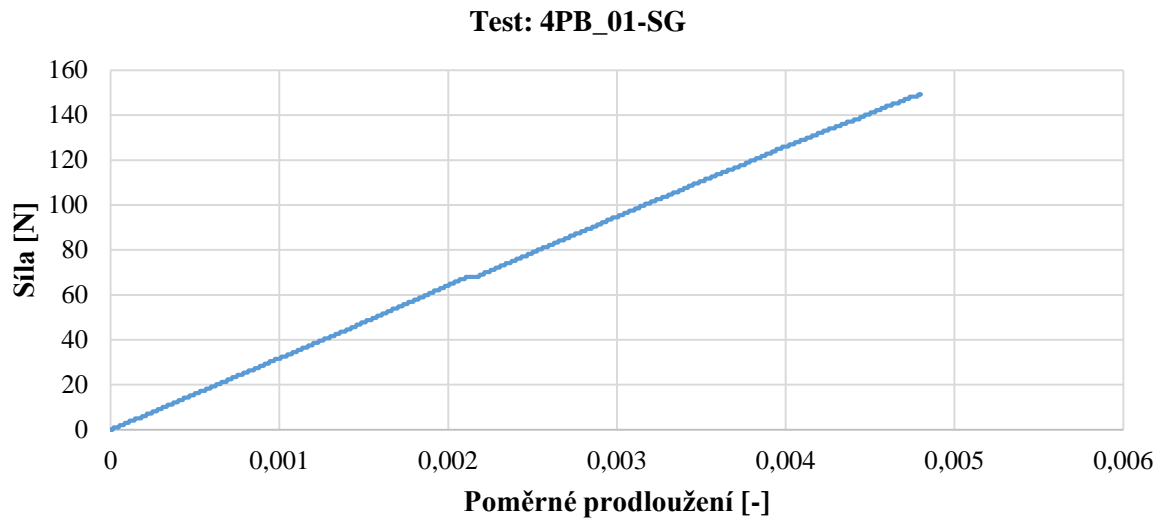
**Tab. 9.1:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků



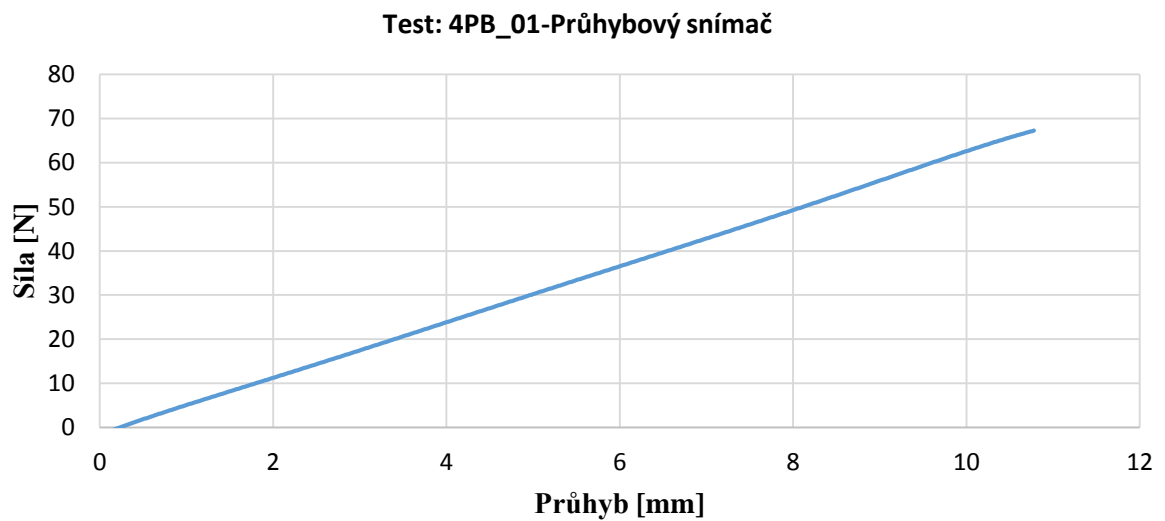
**Graf 9.1:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



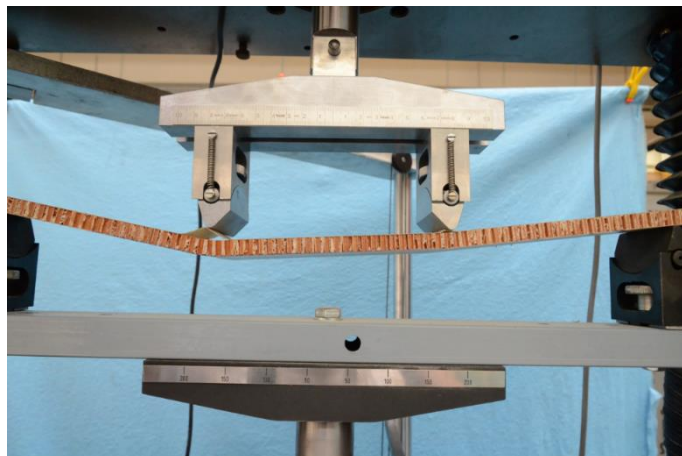
**Graf 9.2:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.3:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.4:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



**Obr. 9.1:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

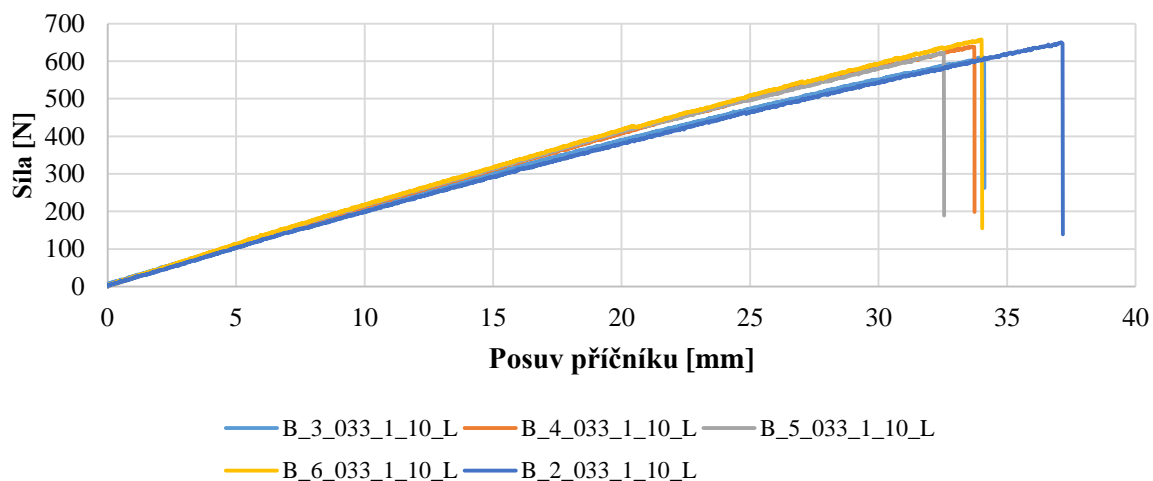


## 9.2 Výsledky testu s označením: 4PB\_02

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	$T_I$	$T_S$	$T_3$	$\check{S}_I$	$\check{S}_S$	$\check{S}_3$	$v$	$f$	$F_{max}$	
B_3_033_1_10_L	11,19	11,16	11,07	48,74	48,25	47,06	8	12	610,8	DGT
B_4_033_1_10_L	11,28	11,20	11,05	51,05	50,23	51,30	8	12	639,4	DAF
B_5_033_1_10_L	11,46	11,24	10,98	51,25	51,15	51,30	8	12	622,7	DGT
B_6_033_1_10_L	11,32	11,39	11,15	50,91	50,82	80,76	8	12	658,0	CAC
B_2_033_1_10_L	11,14	11,09	10,9	48,39	47,37	48,63	8	12	650,3	DGT

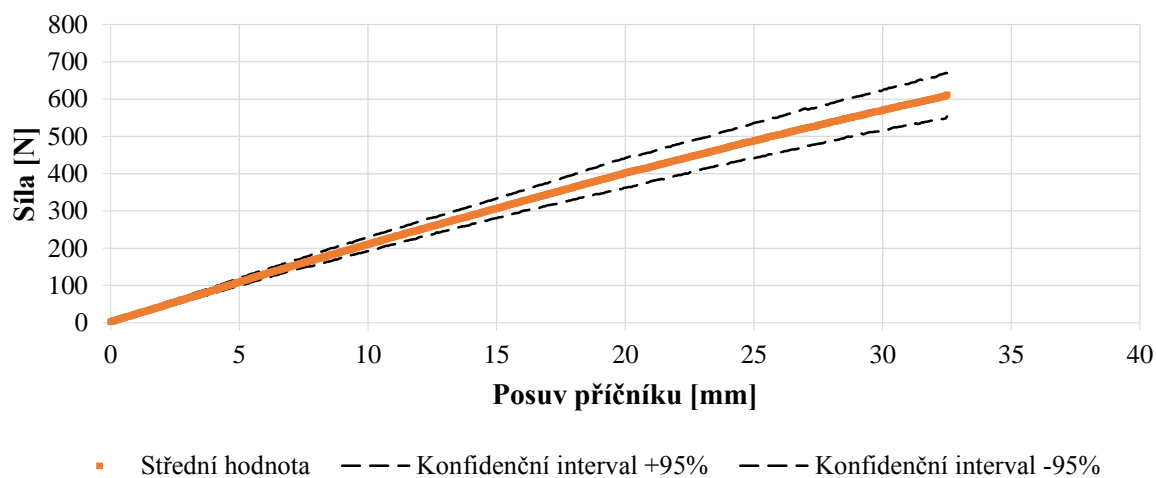
**Tab. 9.2:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: 4PB\_02

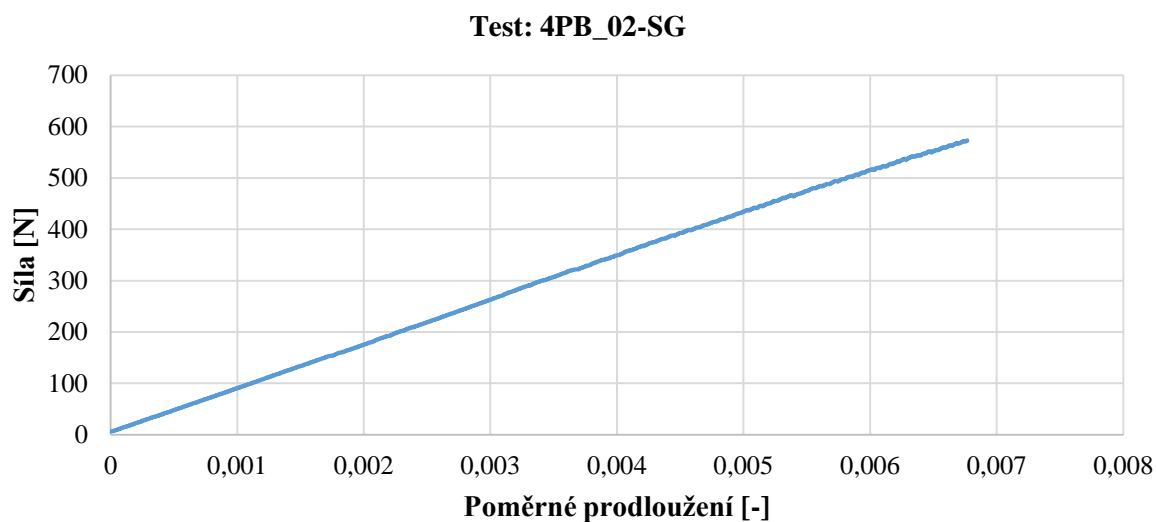


**Graf 9.5:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

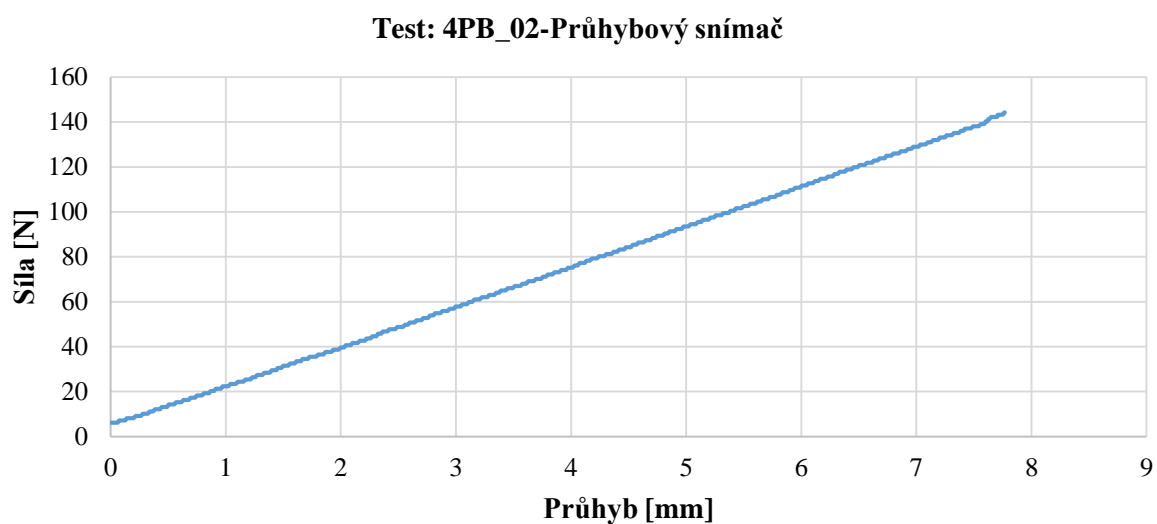
### Test: 4PB\_02



**Graf 9.6:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.7:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.8:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



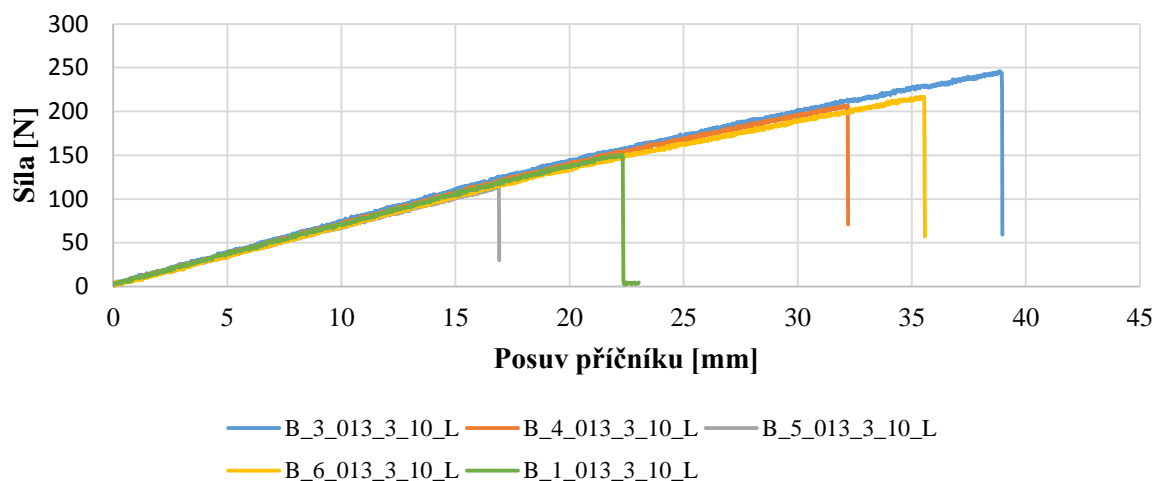
**Obr. 9.2:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

### 9.3 Výsledky testu s označením: 4PB\_03

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	<i>T1</i>	<i>TS</i>	<i>T3</i>	<i>Š1</i>	<i>ŠS</i>	<i>Š3</i>	<i>v</i>	<i>f</i>	<i>Fmax</i>	
B_3_013_3_10_L	10,54	10,54	10,35	50,64	49,51	49,34	8,00	12,00	246,0	FAT
B_4_013_3_10_L	10,59	10,44	10,36	50,59	49,91	50,54	8,00	12,00	206,5	FAT
B_5_013_3_10_L	10,54	10,40	10,34	49,40	48,67	49,86	8,00	12,00	114,3	DGA
B_6_013_3_10_L	10,51	10,40	10,35	48,75	50,05	50,51	8,00	12,00	216,5	FAT
B_1_013_3_10_L	10,53	10,42	10,36	49,80	49,90	49,90	8,00	6,00	150,4	FAT

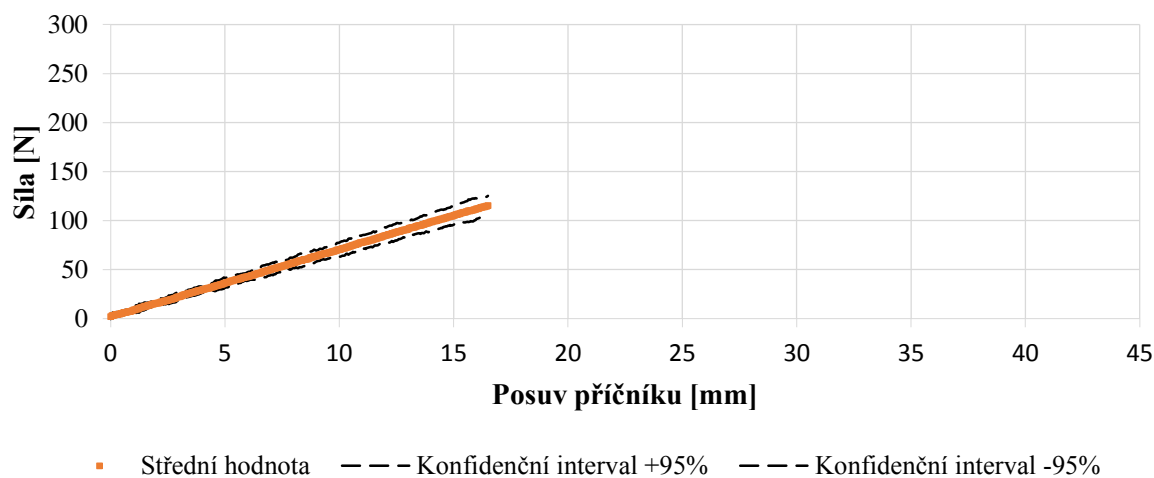
**Tab. 9.3:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

#### Test: 4PB\_03

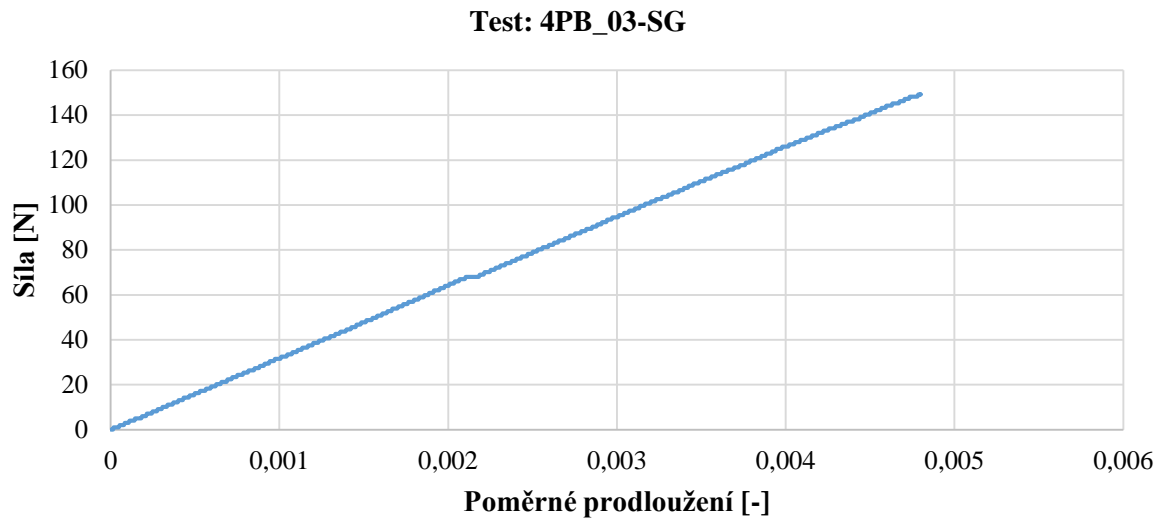


**Graf 9.9:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

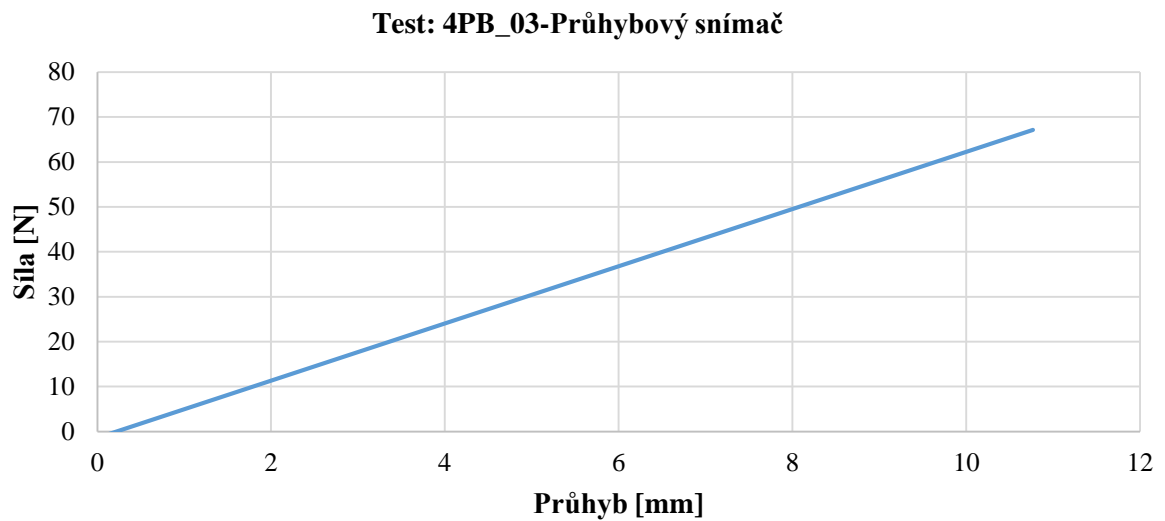
#### Test: 4PB\_03



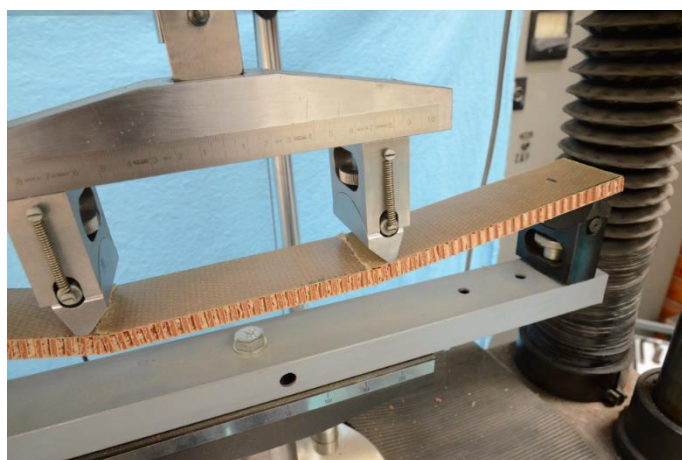
**Graf 9.10:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.11:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.12:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



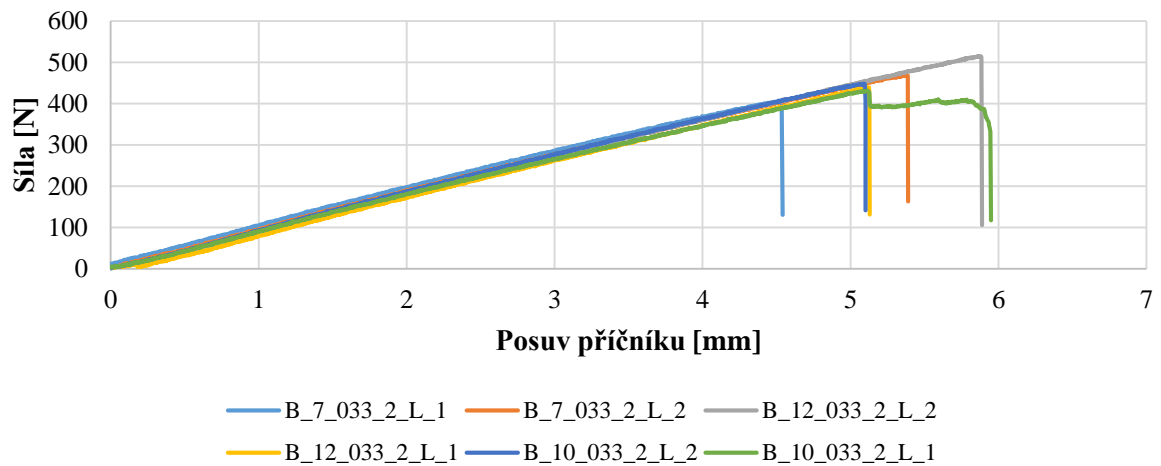
**Obr. 9.3:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

## 9.4 Výsledky testu s označením: 4PB\_04

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	<i>T1</i>	<i>TS</i>	<i>T3</i>	<i>Š1</i>	<i>ŠS</i>	<i>Š3</i>	<i>v</i>	<i>f</i>	<i>Fmax</i>	
B_7_033_2_L_1	10,45	10,43	10,43	49,57	59,81	49,95	4	12	406,2	FAT
B_7_033_2_L_2	10,42	10,45	10,44	50,21	50,11	50,99	2	12	469,4	FAT
B_12_033_2_L_2	10,42	10,43	10,42	50,31	50,37	50,65	2	12	515,0	DAT
B_12_033_2_L_1	10,43	10,45	10,43	49,94	49,92	50,12	2	12	439,1	DAT
B_10_033_2_L_2	10,44	10,45	10,44	50,20	49,98	49,36	2	12	448,4	DAT
B_10_033_2_L_1	10,45	10,44	10,45	50,44	50,28	50,19	2	12	431,1	FAT

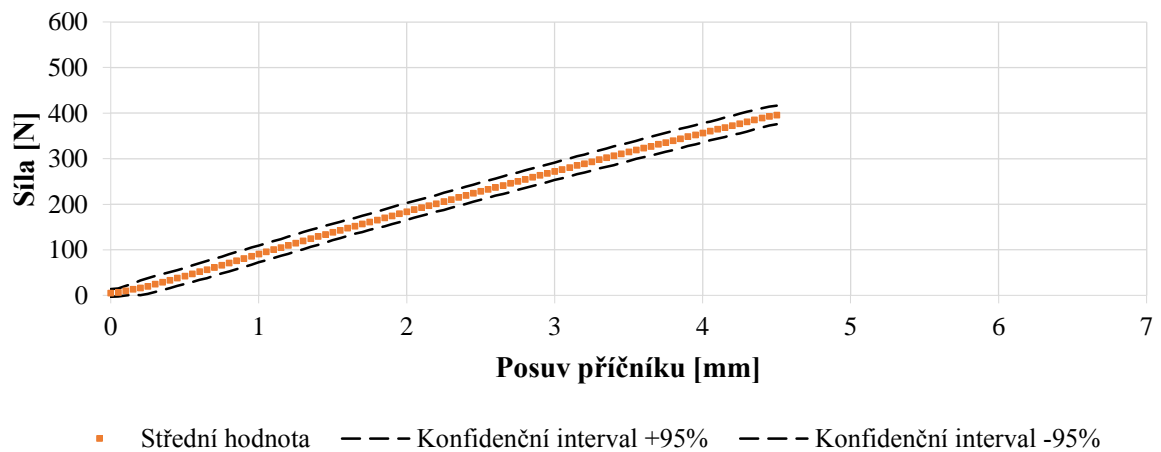
**Tab. 9.4:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: 4PB\_04

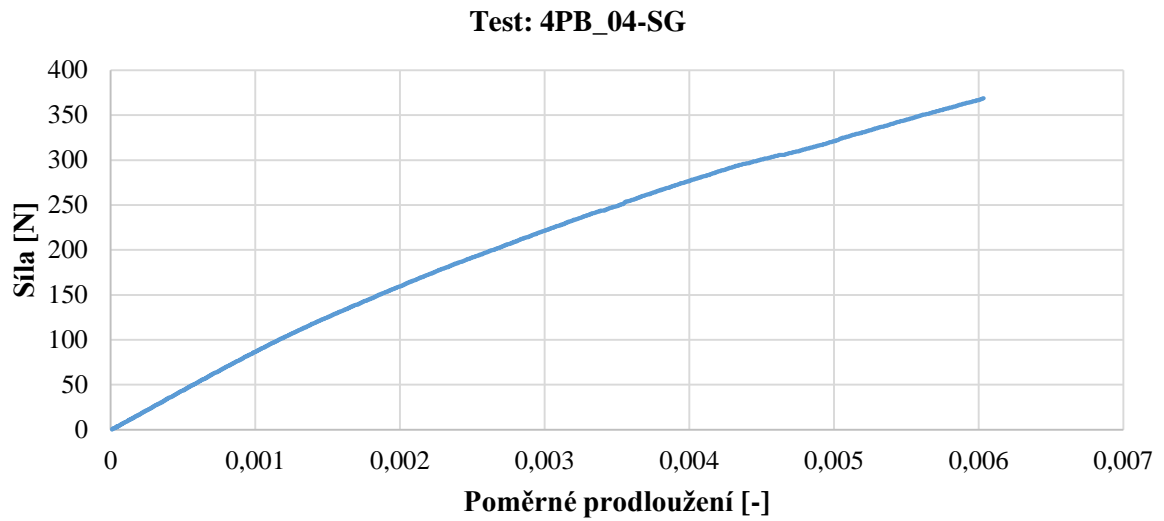


**Graf 9.13:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

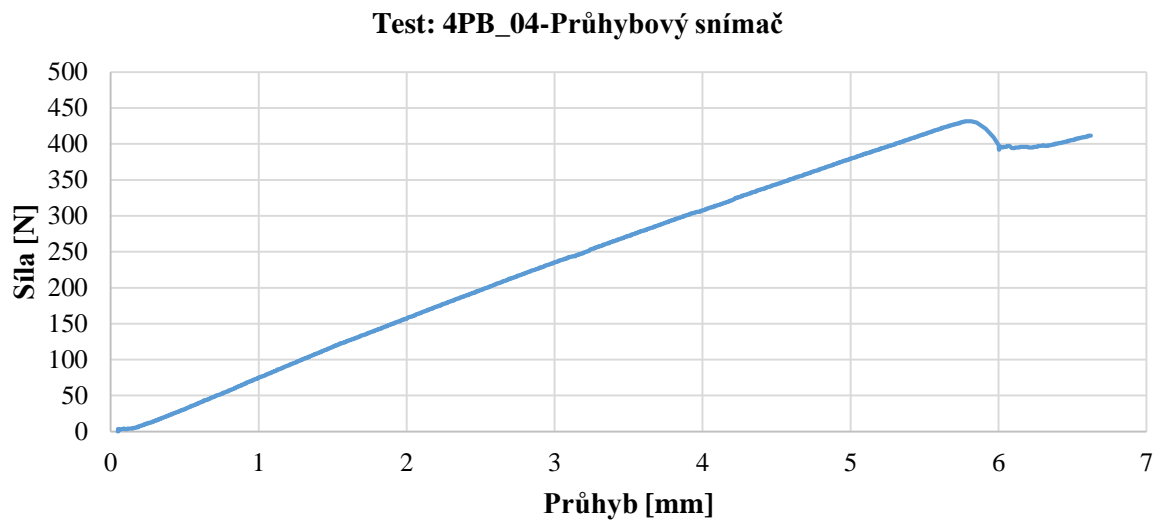
### Test: 4PB\_04



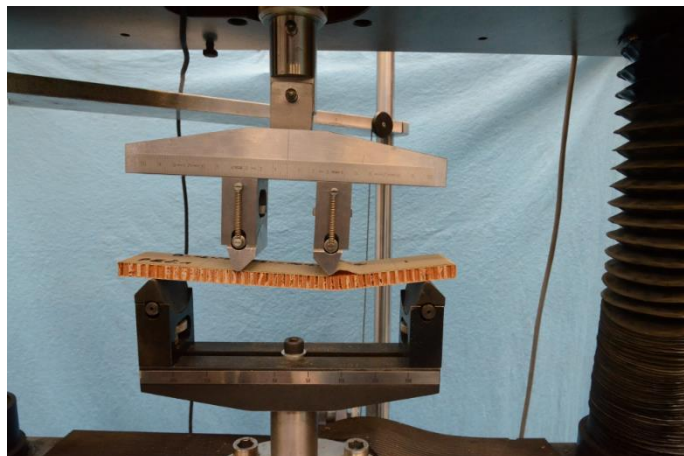
**Graf 9.14:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.15:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.16:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



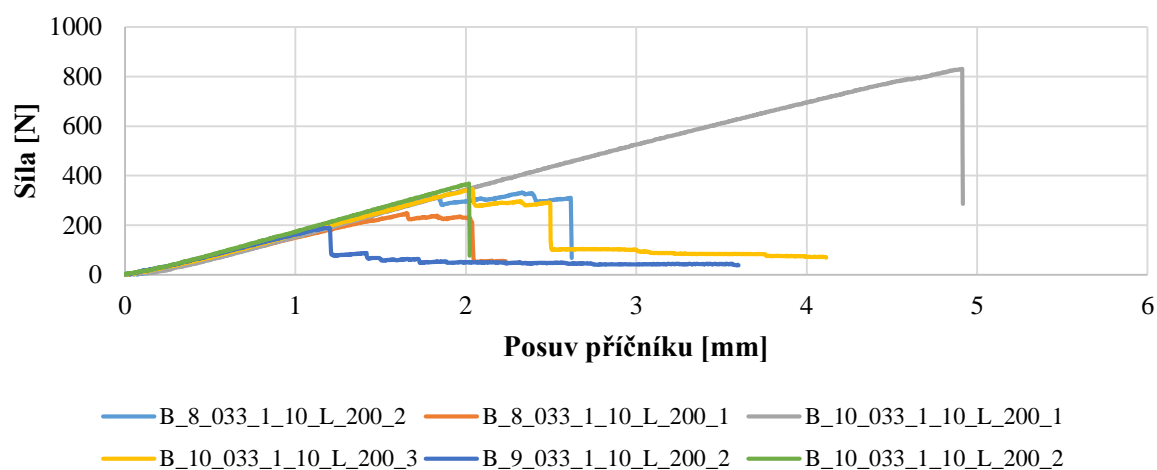
**Obr. 9.4:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

## 9.5 Výsledky testu s označením: 4PB\_05

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	$T1$	$T2$	$T3$	$\dot{S}1$	$\dot{S}2$	$\dot{S}3$	$v$	$f$	$F_{max}$	
B_8_033_1_10_L_200_2	10,95	11,25	11,38	49,95	49,82	50,10	2	12	332,3	DOA
B_8_033_1_10_L_200_1	11,32	11,45	11,32	50,17	49,99	49,89	2	12	248,6	COC
B_10_033_1_10_L_200_1	11,38	11,25	11,09	49,93	49,43	49,87	2	12	831,0	COC
B_10_033_1_10_L_200_3	11,22	11,49	11,38	50,10	49,95	49,93	2	12	347,0	DAF
B_9_033_1_10_L_200_2	11,29	11,41	11,35	50,10	49,98	49,91	2	12	190,5	DAF
B_10_033_1_10_L_200_2	10,95	11,23	11,32	49,95	49,87	49,88	2	12	369,1	FAT

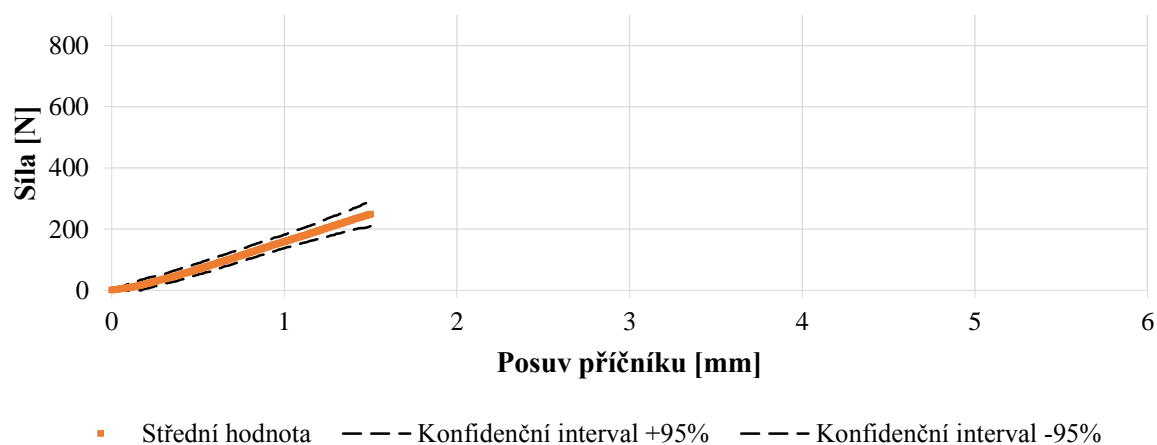
**Tab. 9.5:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: 4PB\_05

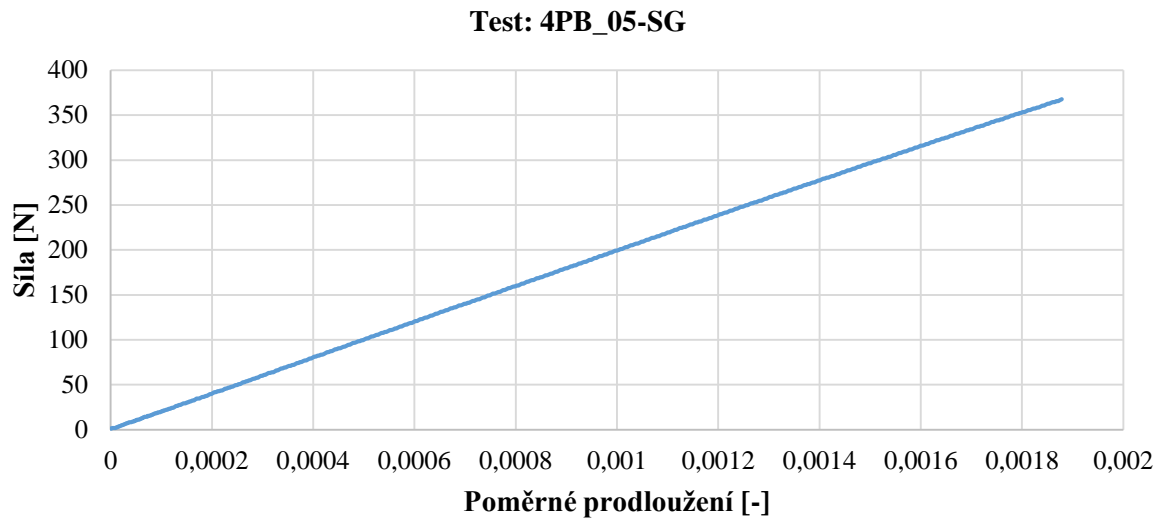


**Graf 9.17:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

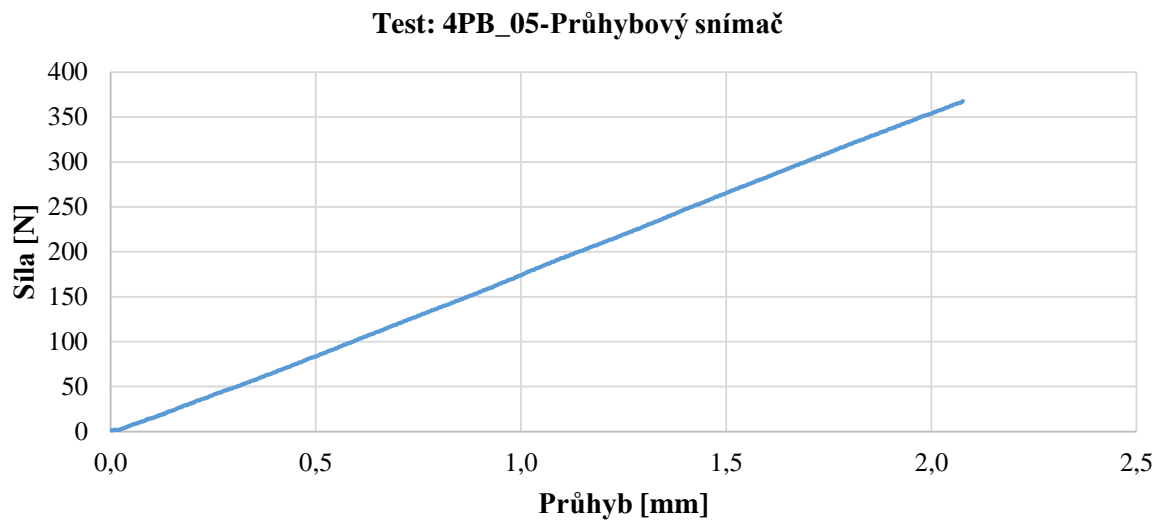
### Test: 4PB\_05



**Graf 9.18:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.19:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.20:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



**Obr. 9.5:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

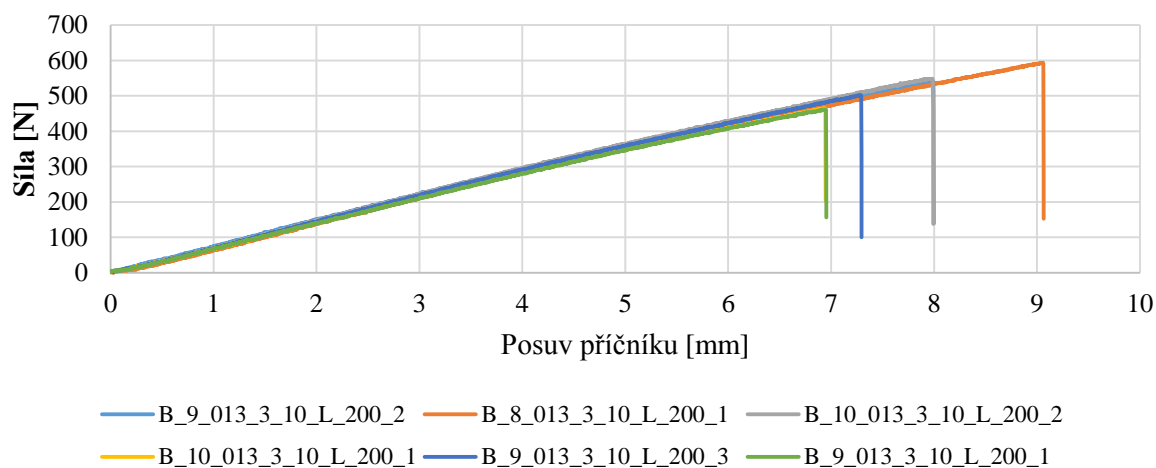


## 9.6 Výsledky testu s označením: 4PB\_06

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	$T1$	$TS$	$T3$	$Š1$	$ŠS$	$Š3$	$v$	$f$	$F_{max}$	
B_9_013_3_10_L_200_2	10,41	10,43	10,34	50,21	49,96	50,13	2	12	540,6	MAV
B_8_013_3_10_L_200_1	10,37	1,52	10,51	50,57	50,51	50,44	2	12	593,3	MAV
B_10_013_3_10_L_200_2	10,42	10,40	10,46	50,18	50,31	50,56	2	12	548,4	FAT
B_10_013_3_10_L_200_1	10,49	10,53	10,48	50,63	50,41	50,20	2	12	464,7	FAT
B_9_013_3_10_L_200_3	10,41	10,44	10,33	50,22	50,18	50,73	2	12	501,9	FAF
B_9_013_3_10_L_200_1	10,35	10,48	10,44	50,52	50,44	50,23	2	12	461,3	FAF

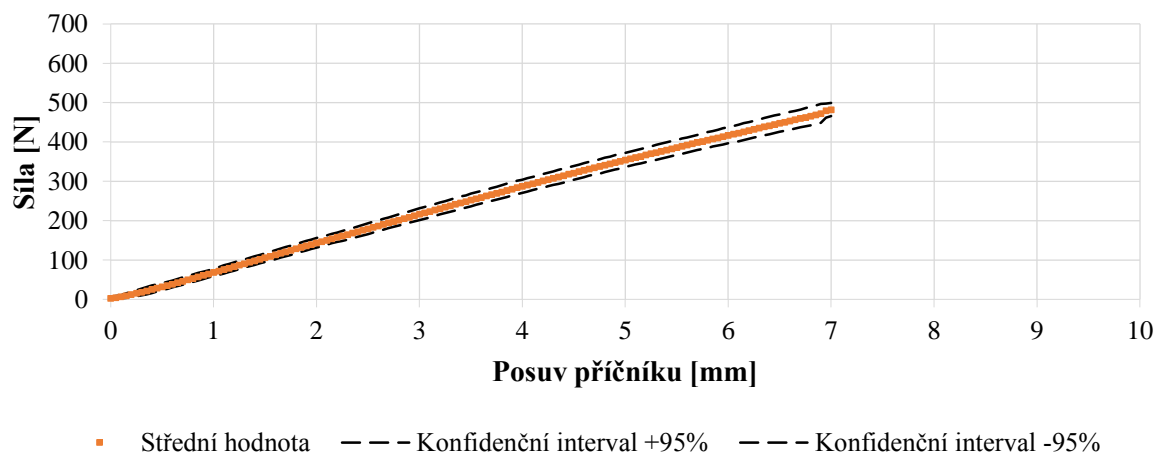
**Tab. 9.6:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: 4PB\_06

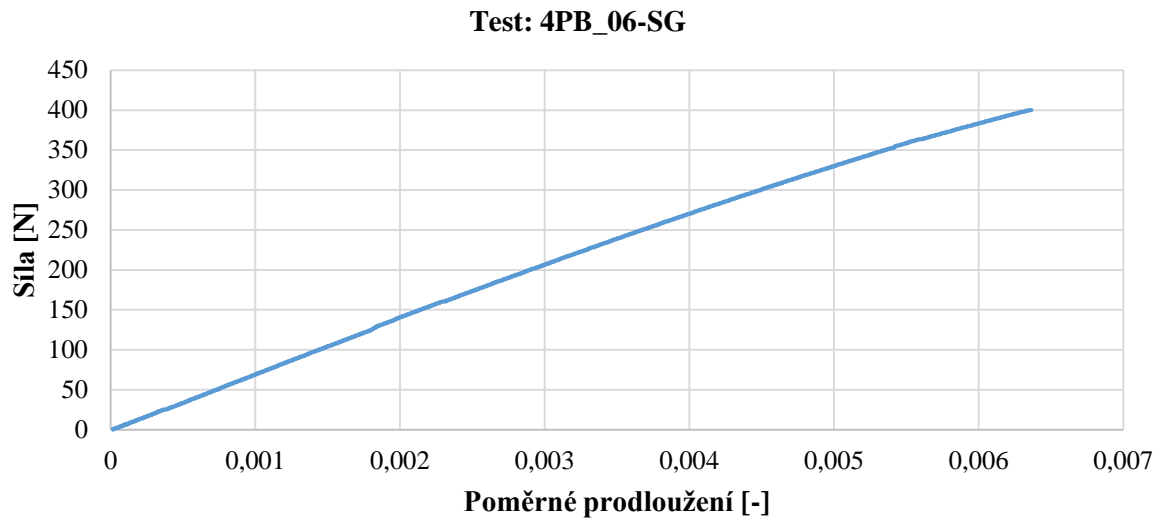


**Graf 9.21:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

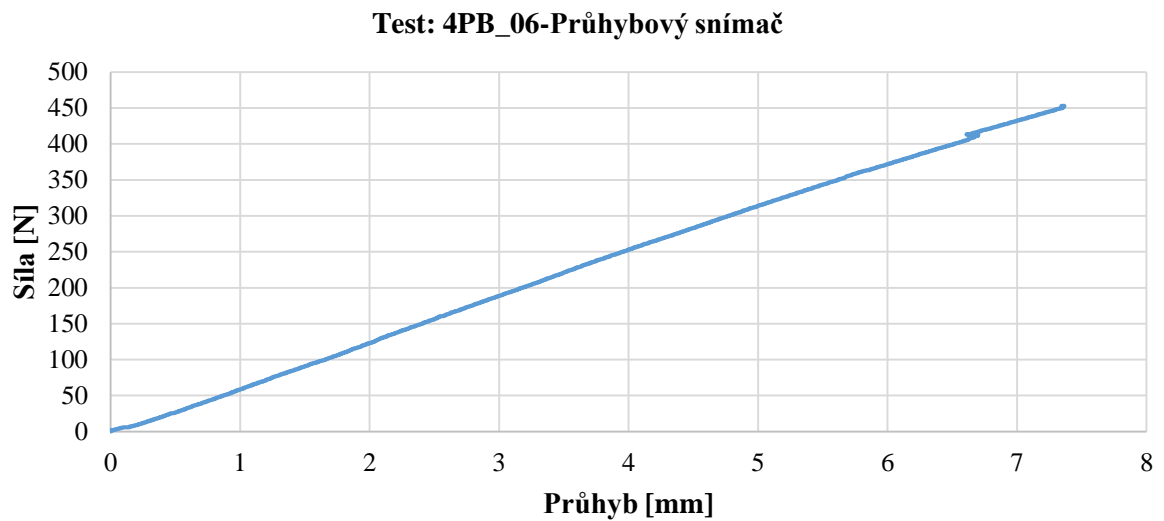
### Test: 4PB\_06



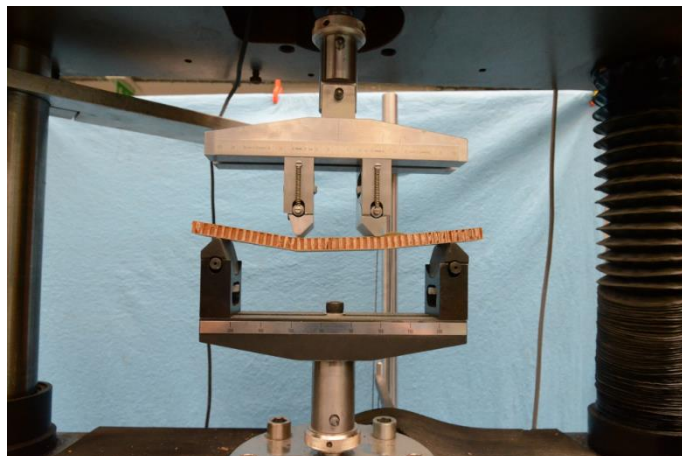
**Graf 9.22:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.23:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.24:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



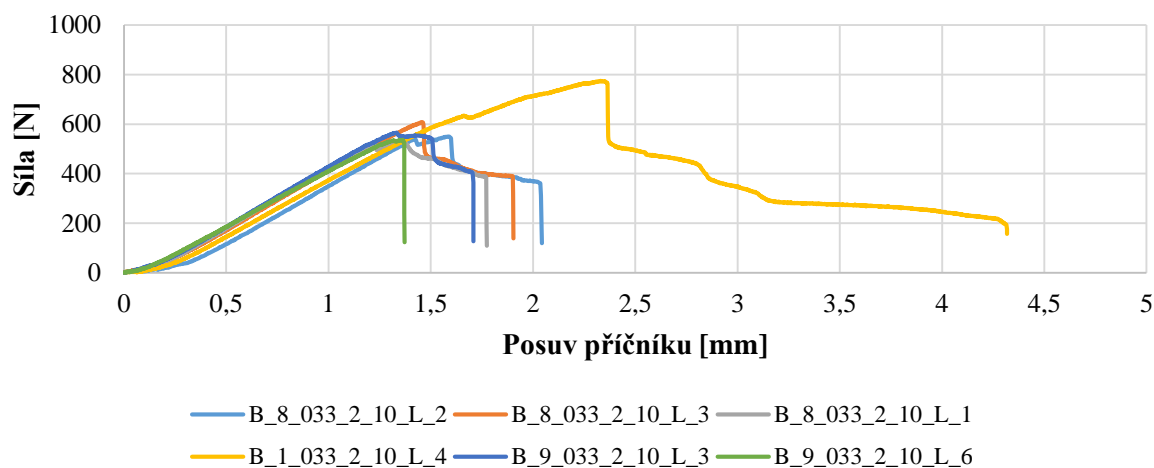
**Obr. 9.6:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

## 9.7 Výsledky testu s označením: 4PB\_07

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	$T_I$	$T_S$	$T_3$	$\check{S}_I$	$\check{S}_S$	$\check{S}_3$	$v$	$f$	$F_{max}$	
B_8_033_2_10_L_2	10,42	10,43	10,44	50,20	50,16	50,05	2	12	549,5	CAC
B_8_033_2_10_L_3	10,41	10,41	10,40	50,05	50,15	50,12	1	12	608,4	DAT
B_8_033_2_10_L_1	10,45	10,43	10,40	49,93	49,96	50,12	1	12	526,3	CAC
B_1_033_2_10_L_4	10,42	10,41	10,40	49,81	49,95	50,17	1	12	774,9	MAV
B_9_033_2_10_L_3	10,43	10,44	10,44	50,11	50,10	50,12	1	12	565,8	CAC
B_9_033_2_10_L_6	10,41	10,40	10,40	49,70	49,45	49,63	1	12	536,8	DAT

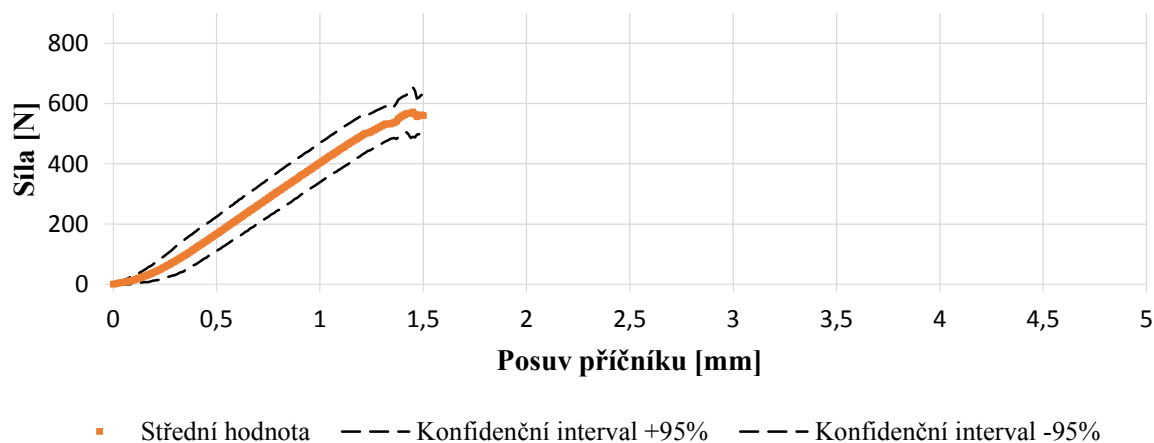
**Tab. 9.7:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: 4PB\_07

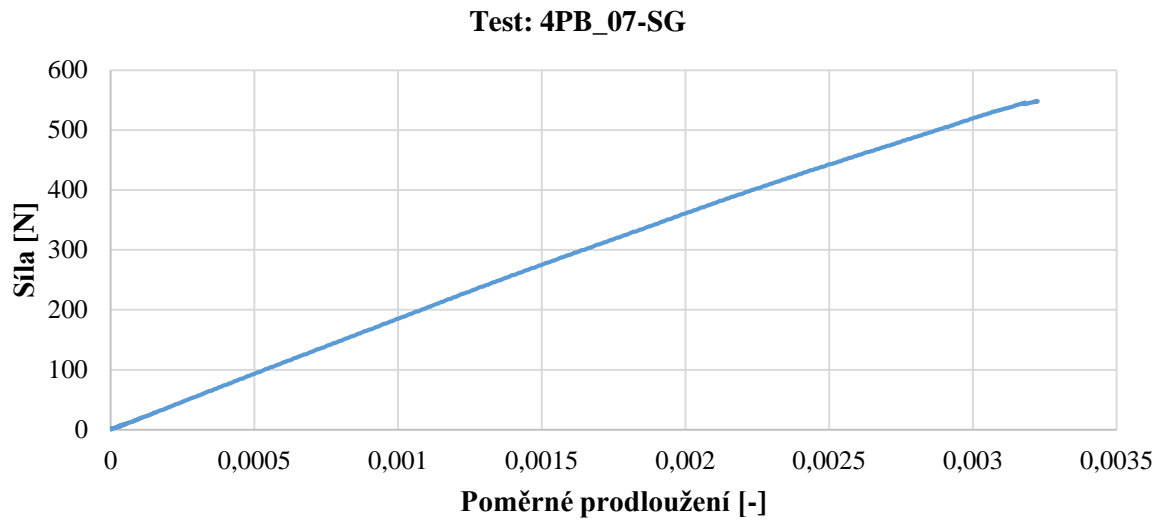


**Graf 9.25:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

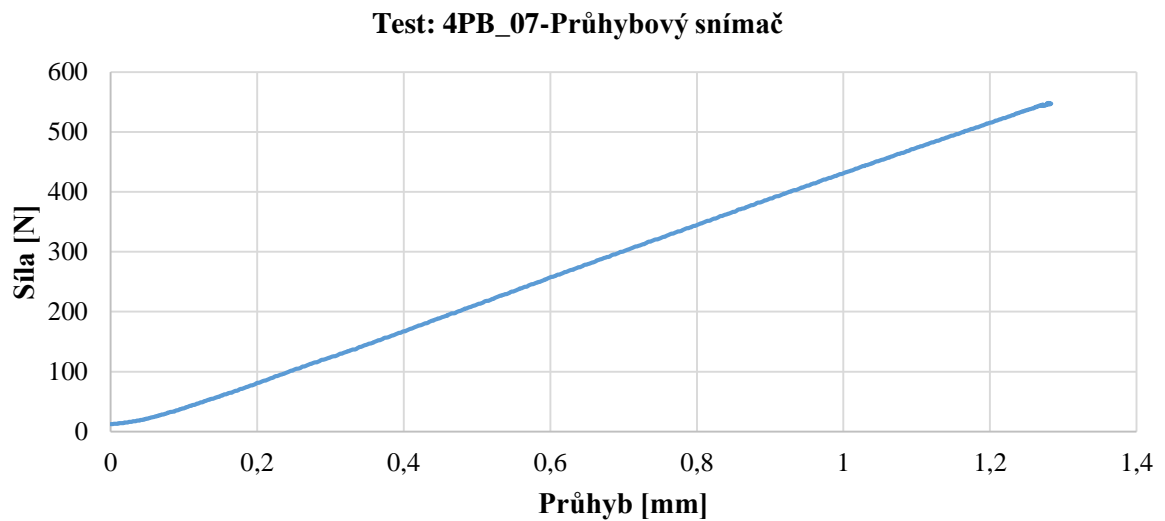
### Test: 4PB\_07



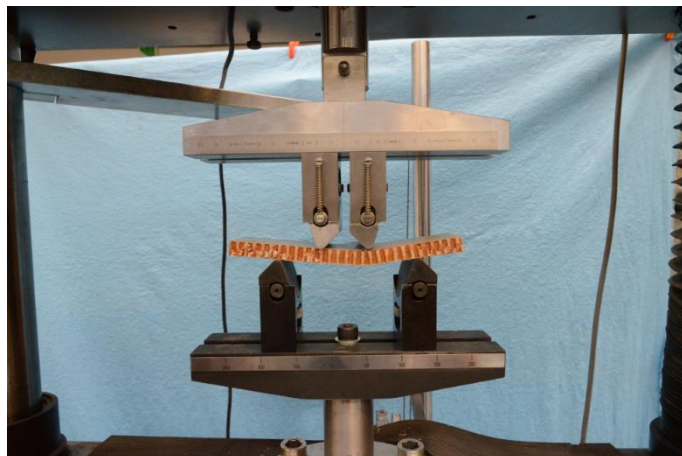
**Graf 9.26:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.27:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.28:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



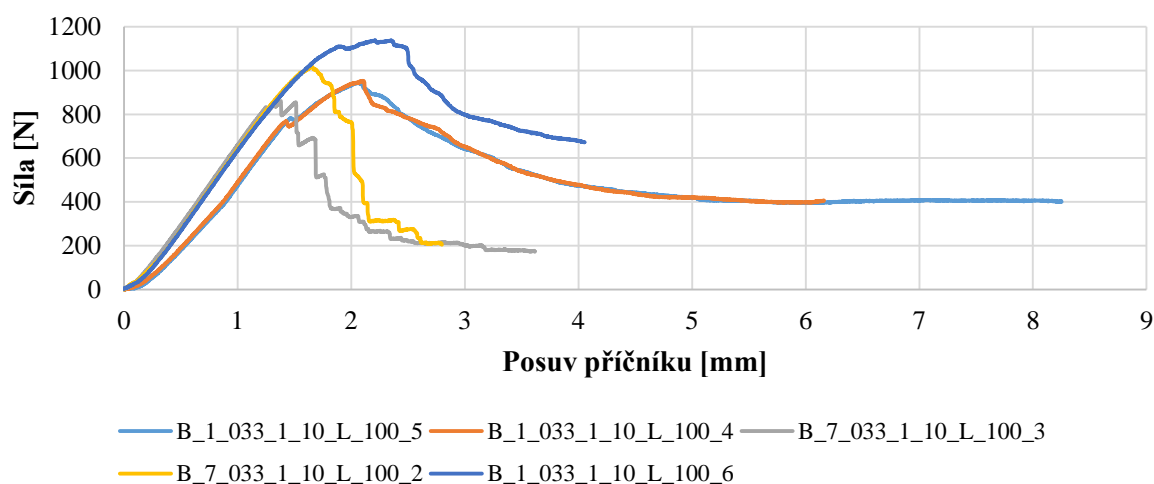
**Obr. 9.7:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

## 9.8 Výsledky testu s označením: 4PB\_08

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	$T1$	$TS$	$T3$	$\dot{S}1$	$\dot{S}S$	$\dot{S}3$	$v$	$f$	$F_{max}$	
B_1_033_1_10_L_100_5	10,97	10,94	10,84	51,01	51,03	50,98	1	12	944,7	CAC
B_1_033_1_10_L_100_4	10,94	10,98	10,99	53,04	52,62	51,96	1	12	953,2	CAC
B_7_033_1_10_L_100_3	11,28	11,33	11,24	50,00	49,94	49,71	1	12	860,3	DAF
B_7_033_1_10_L_100_2	11,24	11,20	1,99	49,51	49,62	49,70	1	12	1017,5	DAF
B_1_033_1_10_L_100_6	10,96	10,87	10,97	51,45	51,11	50,76	1	12	1138,3	CAC

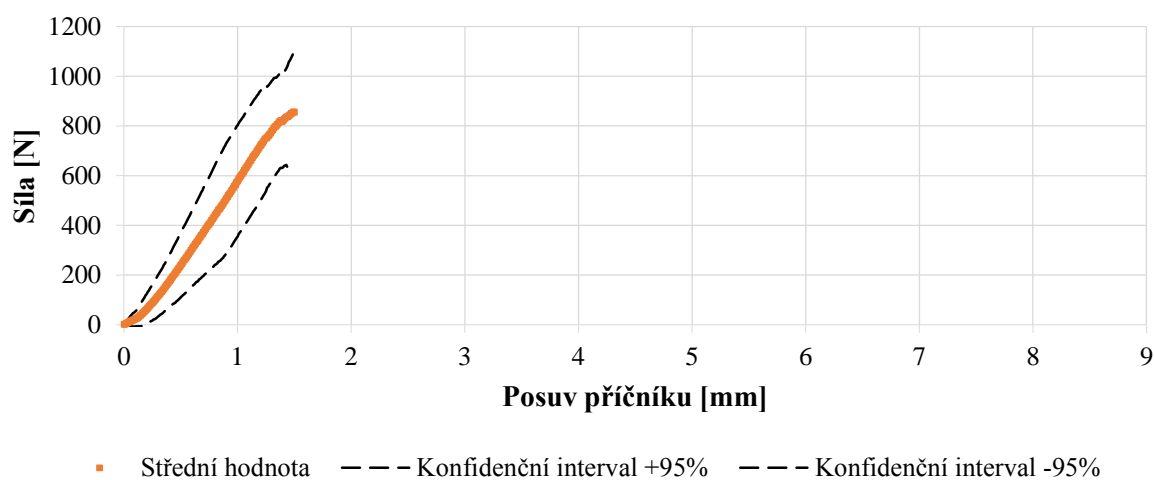
**Tab. 9.8:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: 4PB\_08

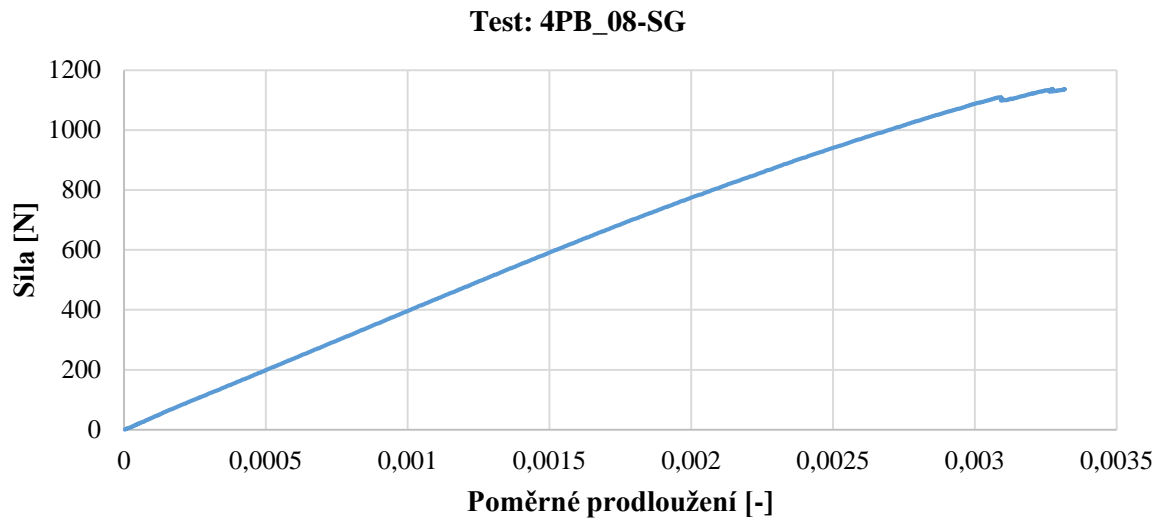


**Graf 9.29:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

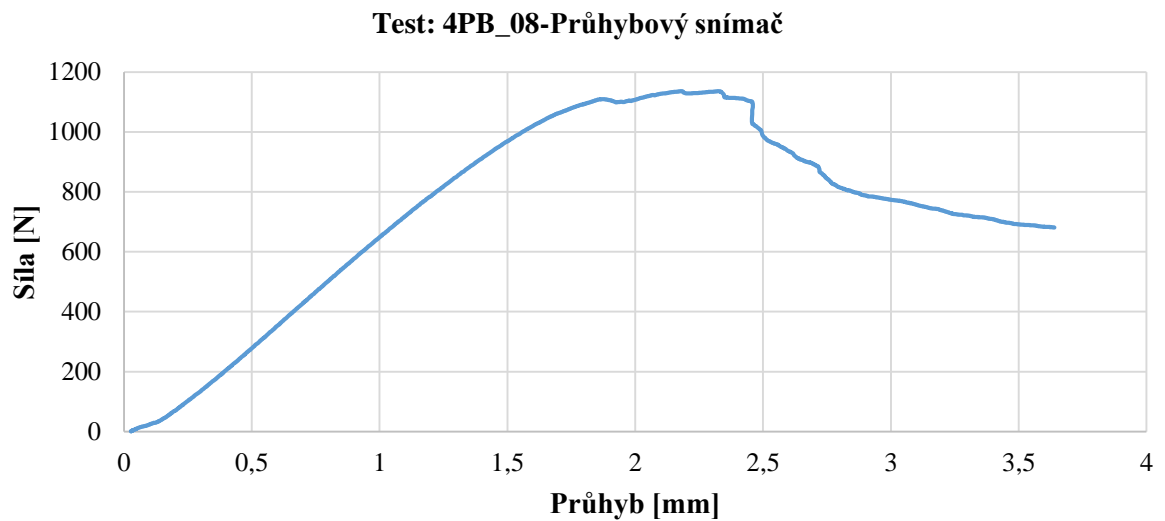
### Test: 4PB\_08



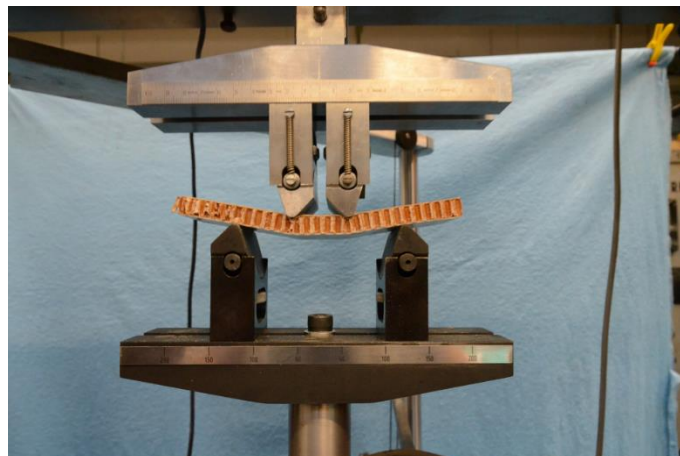
**Graf 9.30:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.31:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.32:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



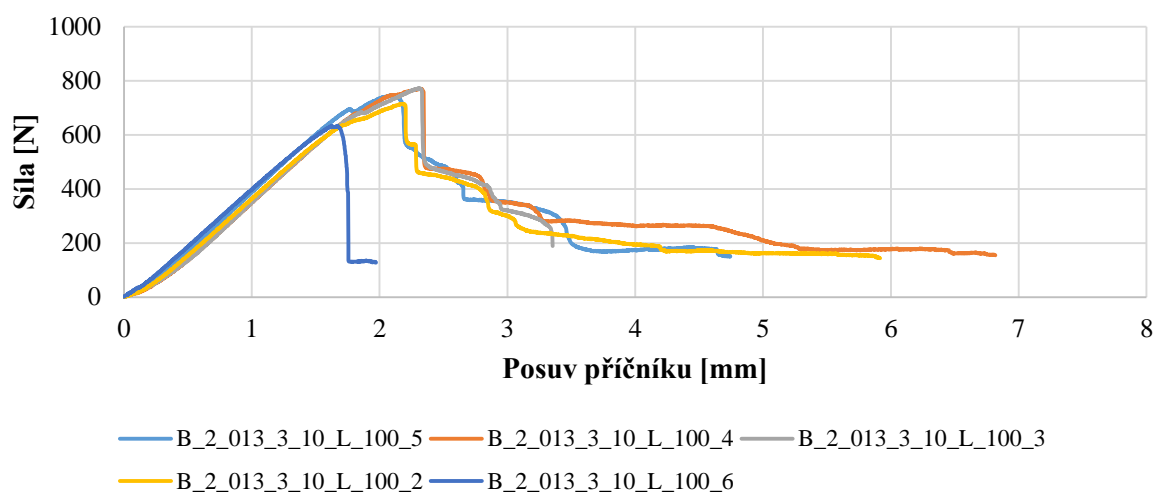
**Obr. 9.8:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

## 9.9 Výsledky testu s označením: 4PB\_09

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]						Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]
	$T1$	$TS$	$T3$	$\check{S}1$	$\check{S}S$	$\check{S}3$				
B_2_013_3_10_L_100_5	10,52	10,51	10,35	50,13	50,00	49,19	1	12	746,0	CAC
B_2_013_3_10_L_100_4	10,54	10,55	10,56	50,87	50,93	50,50	1	12	771,8	CAC
B_7_013_3_10_L_100_3	10,47	10,48	10,35	50,26	50,54	50,51	1	12	772,6	CAC
B_7_013_3_10_L_100_2	10,44	10,40	10,47	50,30	50,15	50,00	1	12	714,5	CAC
B_2_013_3_10_L_100_6	10,55	10,60	10,64	50,32	50,36	50,08	1	12	633,2	FAB

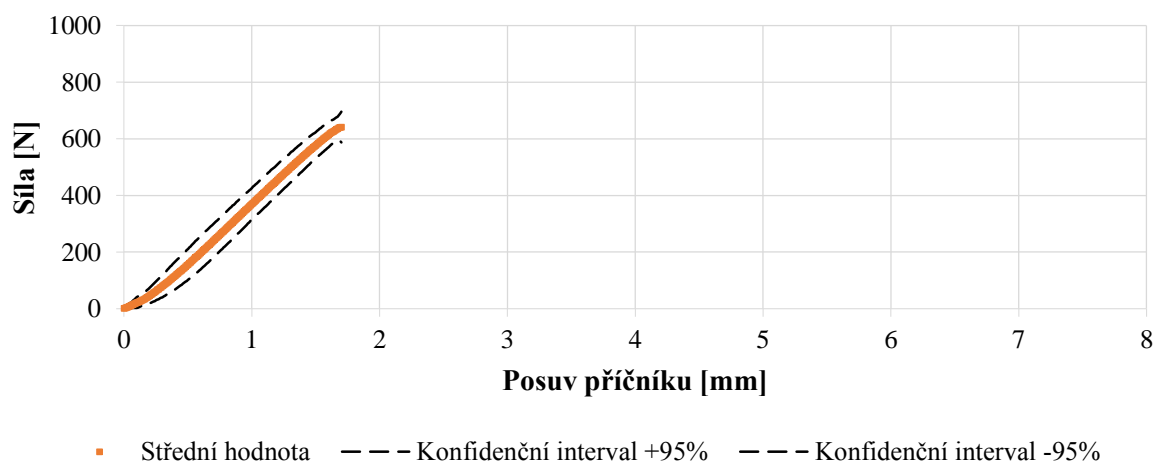
**Tab. 9.9:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: 4PB\_09

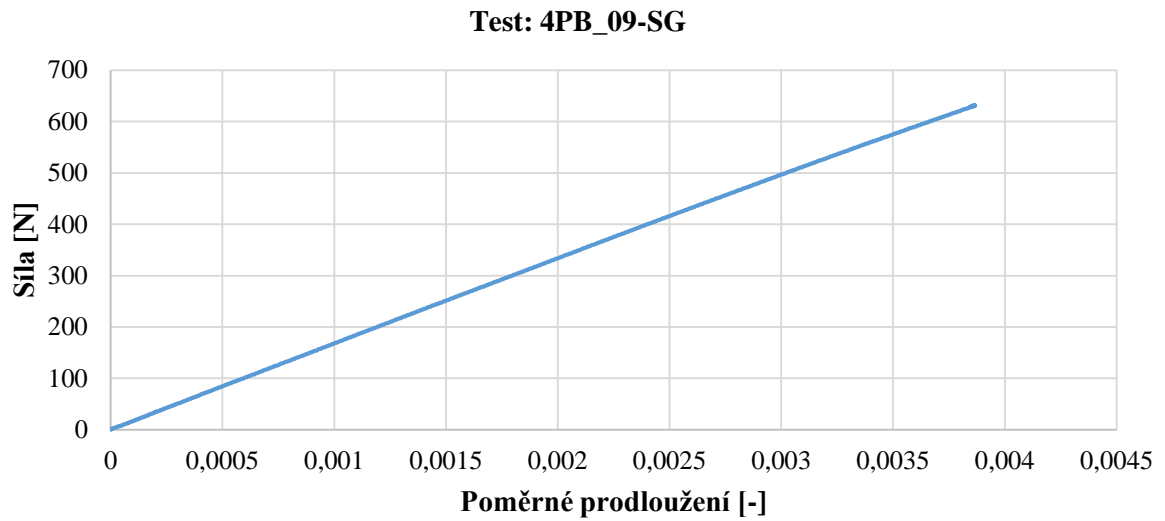


**Graf 9.33:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

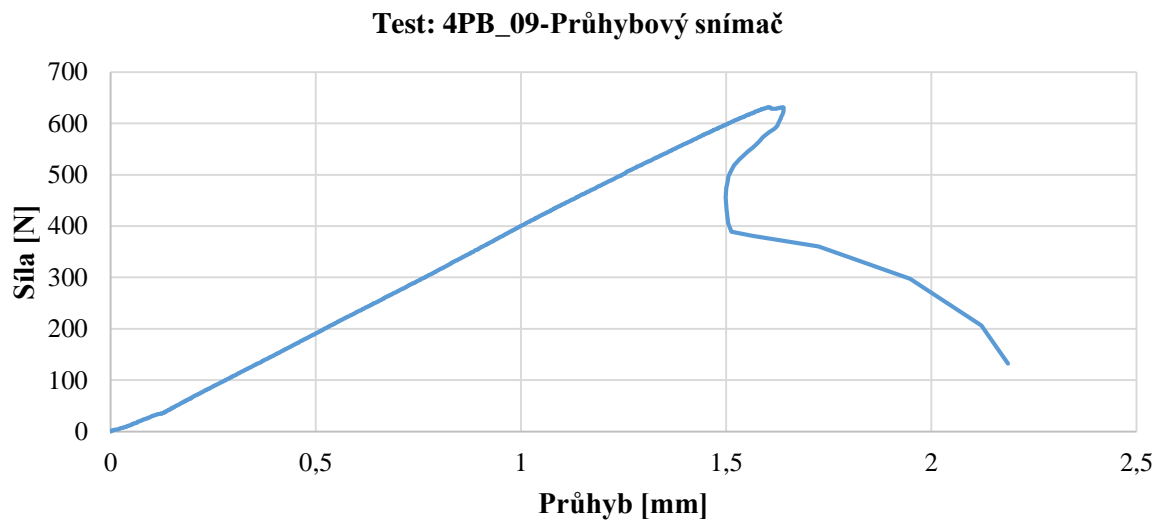
### Test: 4PB\_09



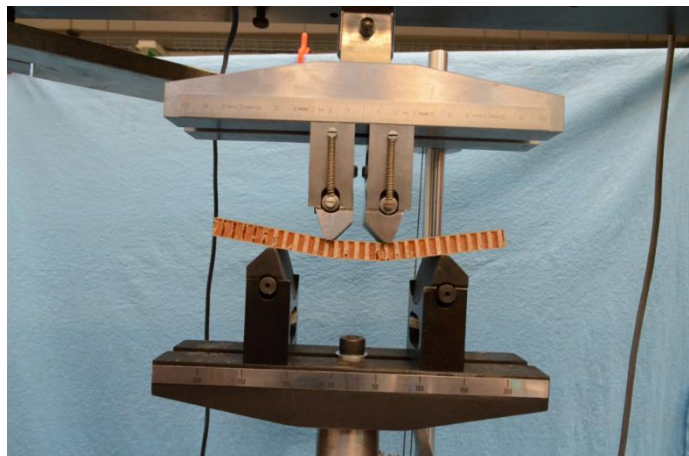
**Graf 9.34:** Střední hodnota průběhů závislostí měřené síly na posuvu příčnicku



**Graf 9.35:** Průběh závislosti měřené síly na poměrném prodloužení



**Graf 9.36:** Průběh závislosti měřené síly na průhybu



**Obr. 9.9:** Zobrazení typického porušení dané konfigurace

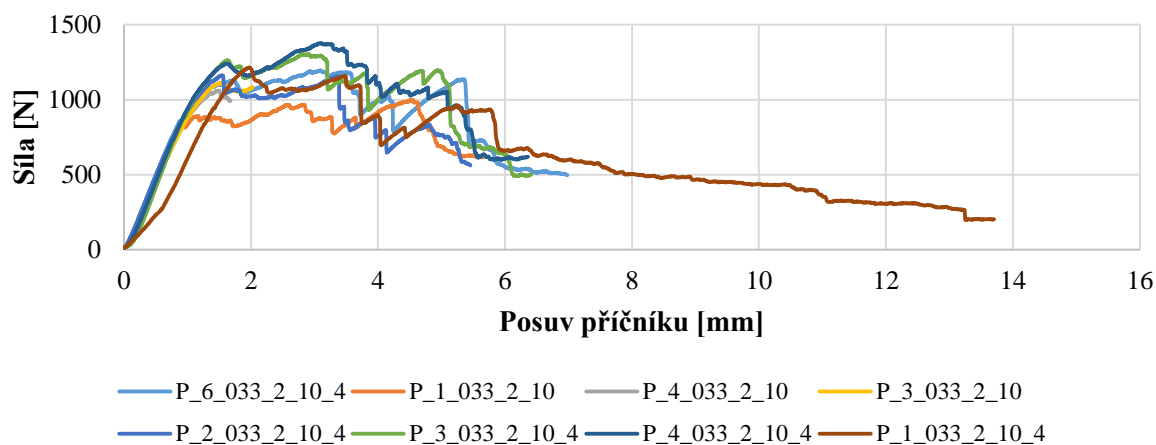


## 9.10 Výsledky testu s označením: PO\_01

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]			Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$\dot{S}1$	$\dot{S}2$						
P_6_033_2_10_4	10,42	120,86	119,25	27,5	2	12	1195,0	DAA	NE
P_1_033_2_10	10,47	120,49	120,49	26,0	2	12	1000,0	DAA	NE
P_4_033_2_10	10,51	120,97	121,29	26,2	2	12	1062,0	O UU	ANO
P_3_033_2_10	10,49	120,72	120,53	26,1	2	12	1112,0	O UU	ANO
P_2_033_2_10_4	10,41	119,55	121,09	26,4	2	12	1162,2	DAA	NE
P_3_033_2_10_4	10,43	120,10	118,92	27,5	2	12	1306,0	DAA	NE
P_4_033_2_10_4	10,44	120,60	120,70	27,4	2	12	1379,0	DAA	NE
P_1_033_2_10_4	10,41	119,60	120,84	26,7	2	6	1214,1	DAA	NE

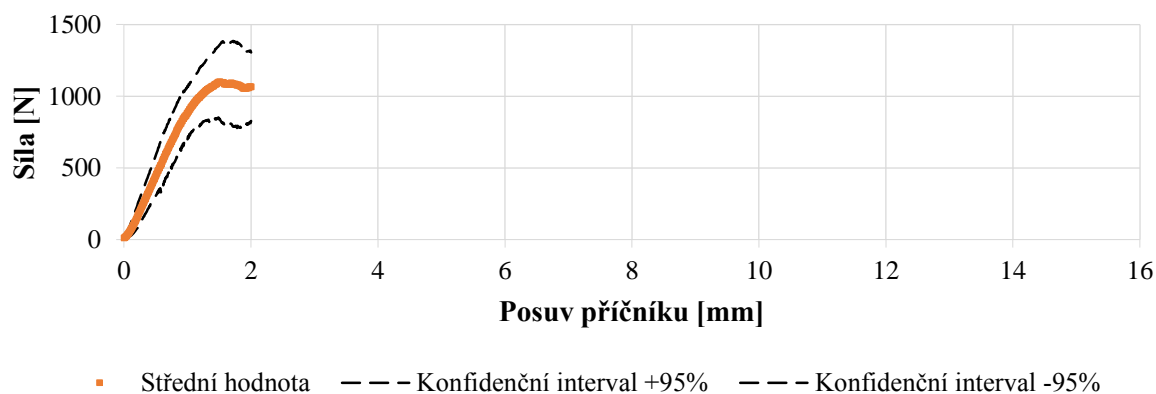
Tab. 9.10: Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: PO\_01



Graf 9.37: Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### Test: PO\_01



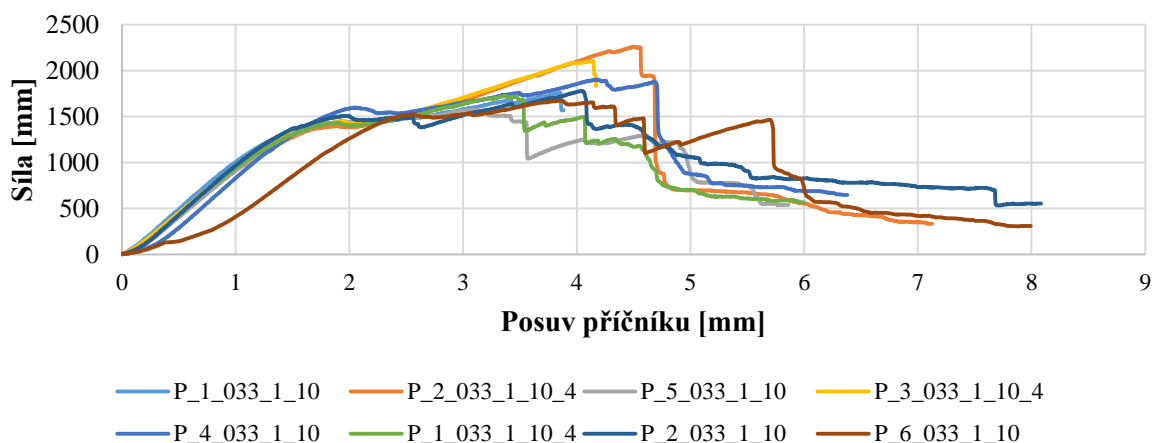
Graf 9.38: Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

## 9.11 Výsledky testu s označením: PO\_02

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]			Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčniku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním pokusu síly zastavena
	$T$	$\bar{S}l$	$\bar{S}2$						
P_1_033_1_10	11,16	120,00	121,05	39,7	2	12	1758,9	O UU	ANO
P_2_033_1_10_4	11,14	120,94	120,39	38,9	2	12	2262,1	DAA	NE
P_5_033_1_10	11,16	120,45	120,86	39,6	2	12	1575,4	DAA	NE
P_3_033_1_10_4	11,14	121,26	120,97	39,5	2	12	2106,5	O UU	ANO
P_4_033_1_10	11,15	120,24	120,37	40,5	2	12	1903,8	DAA	NE
P_1_033_1_10_4	11,16	121,32	120,01	39,0	2	12	1723,4	DAA	NE
P_2_033_1_10	11,19	120,84	120,88	40,3	2	12	1780,7	DAA	NE
P_6_033_1_10	11,20	120,40	120,79	39,9	2	12	1674,0	DAA	NE

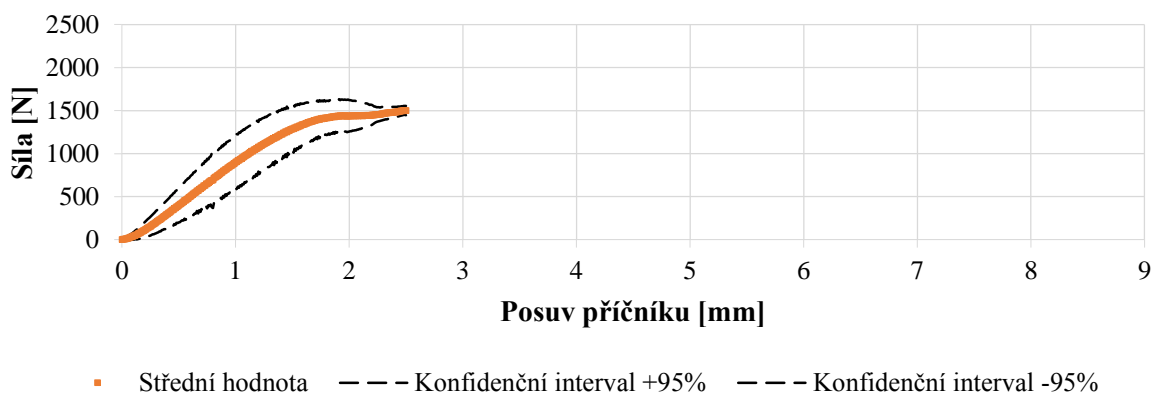
**Tab. 9.11:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: PO\_02



**Graf 9.39:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčniku

### Test: PO\_02



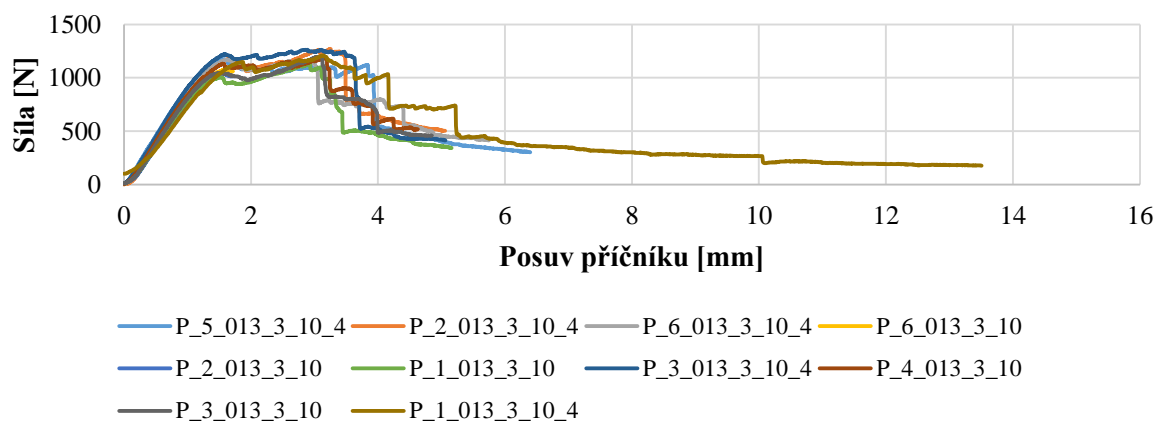
**Graf 9.40:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčniku

## 9.12 Výsledky testu s označením: PO\_03

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]			Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$\dot{S}1$	$\dot{S}2$						
P_5_013_3_10_4	10,48	121,20	120,84	25,0	2	12	1178,0	DAA	NE
P_2_013_3_10_4	10,49	120,91	120,86	24,9	2	12	1271,0	DAA	NE
P_6_013_3_10_4	10,48	122,00	121,08	25,4	2	12	1171,0	DAA	NE
P_6_013_3_10	10,47	120,33	121,31	24,6	2	12	1079,3	OOU	ANO
P_2_013_3_10	10,41	120,76	117,10	23,9	2	12	1044,5	OOU	ANO
P_1_013_3_10	10,42	121,08	121,00	24,3	2	12	1138,0	DAA	NE
P_3_013_3_10_4	10,47	120,04	120,91	25,2	2	12	1264,0	DAA	NE
P_4_013_3_10	10,43	120,68	120,32	24,5	2	12	1188,0	DAA	NE
P_3_013_3_10	10,46	119,10	121,16	24,3	2	12	1199,3	DAA	NE
P_1_013_3_10_4	10,47	121,05	121,00	25,1	2	12	1209,5	DAA	NE

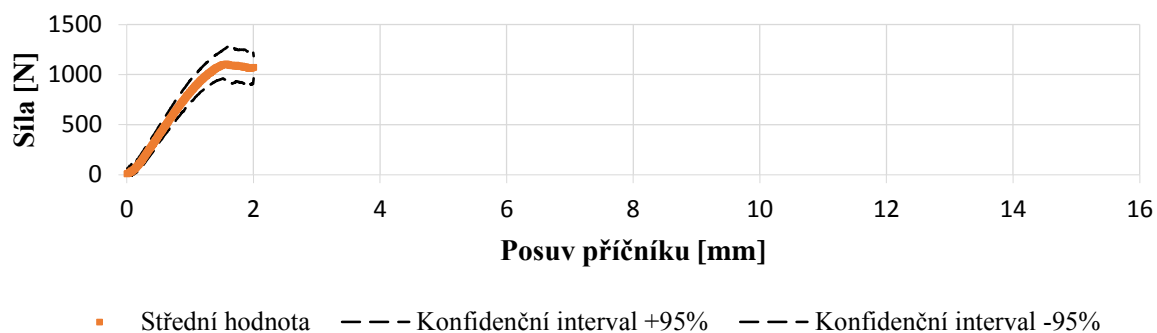
Tab. 9.12: Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: PO\_03



Graf 9.41: Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### Test: PO\_03



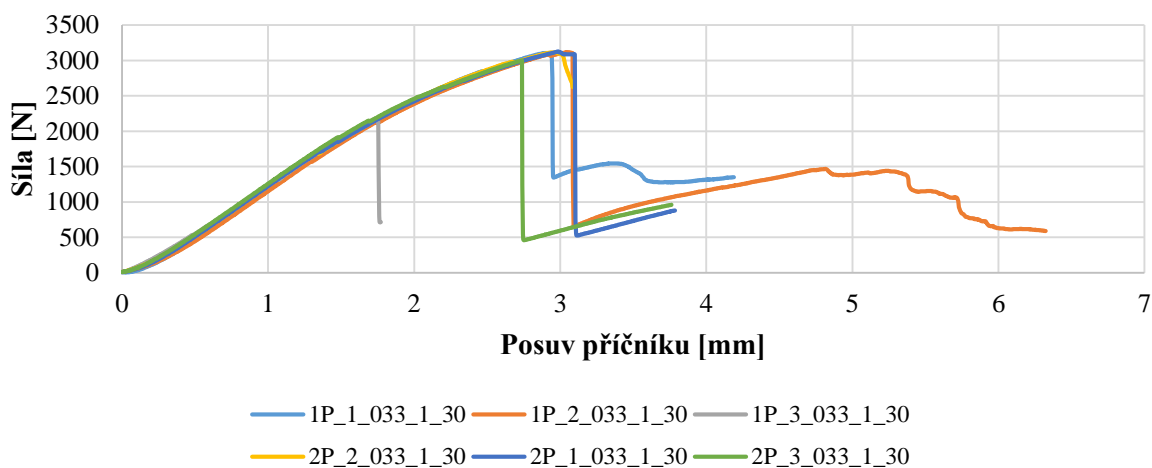
Graf 9.42: Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### 9.13 Výsledky testu s označením: PO\_04

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]			Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$\check{S}1$	$\check{S}2$						
1P_1_033_1_30	31,0	118,9	120,5	56,7	2	12	3105	MAV	NE
1P_2_033_1_30	30,9	118,0	122,6	56,5	2	12	3113	MAV	NE
1P_3_033_1_30	30,9	118,9	118,5	56,3	2	12	2155	O UU	ANO
2P_2_033_1_30	30,9	120,8	121,1	57,6	2	12	3113	O UU	ANO
2P_1_033_1_30	30,9	120,5	120,2	56,9	2	12	3127	MAV	NE
2P_3_033_1_30	30,9	120,4	121,1	57,6	2	12	3000	MAV	NE

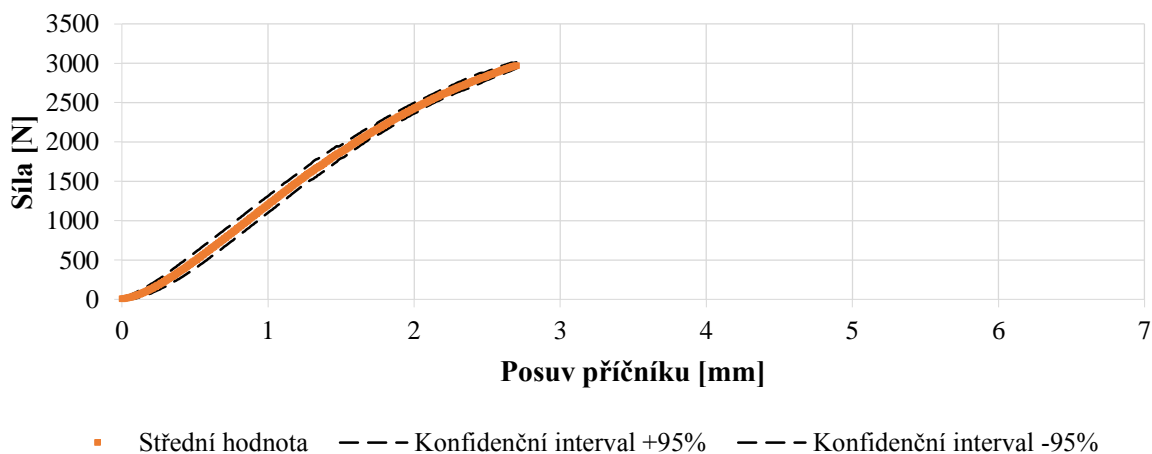
**Tab. 9.13:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

#### Test: PO\_04



**Graf 9.43:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

#### Test: PO\_04

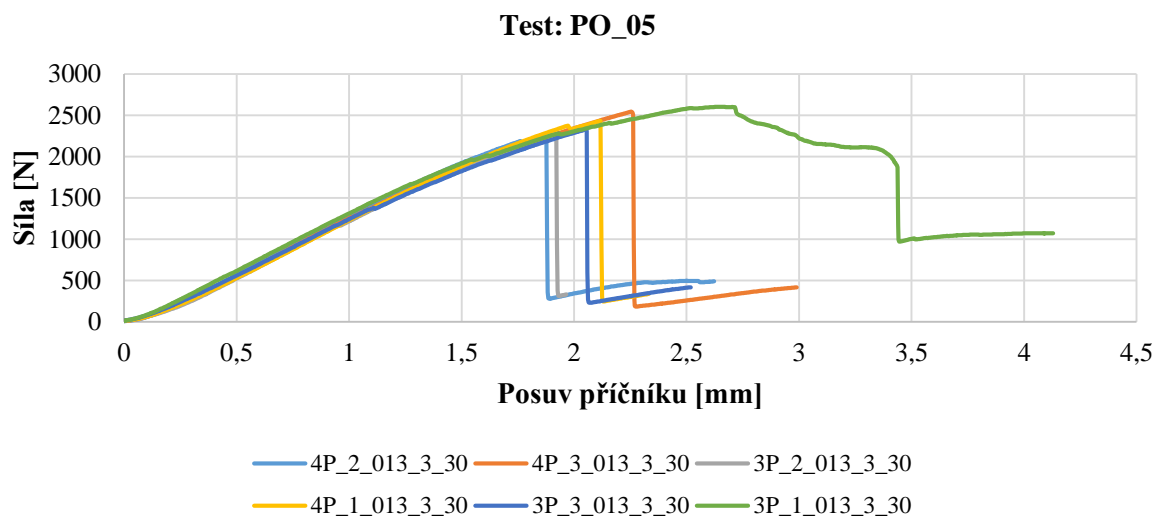


**Graf 9.44:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

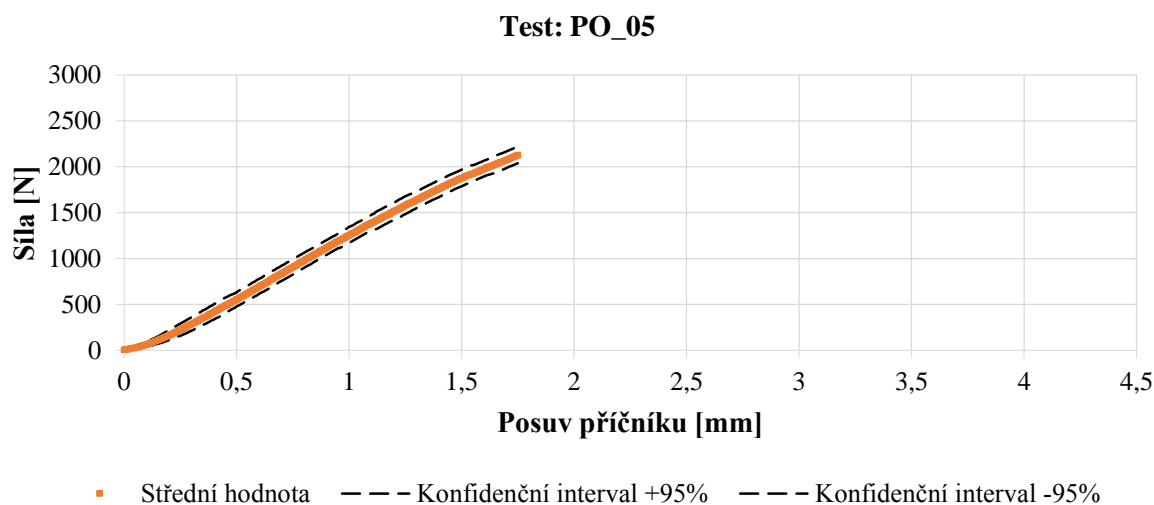
## 9.14 Výsledky testu s označením: PO\_05

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]			Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$\check{S}1$	$\check{S}2$						
4P_2_013_3_30	30,41	120,41	119,75	42,3	2	12	2198	MAV	NE
4P_3_013_3_30	30,44	120,99	121,26	43,0	2	12	2544	MAV	NE
3P_2_013_3_30	30,39	122,18	121,69	44,1	2	12	2270	O UU	ANO
4P_1_013_3_30	30,45	120,81	121,74	43,4	2	12	2433	MAV	NE
3P_3_013_3_30	30,41	119,31	118,96	42,3	2	12	2327	MAV	NE
3P_1_013_3_30	30,45	119,92	120,97	42,9	2	12	2604	MAV	NE

**Tab. 9.14:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků



**Graf 9.45:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku



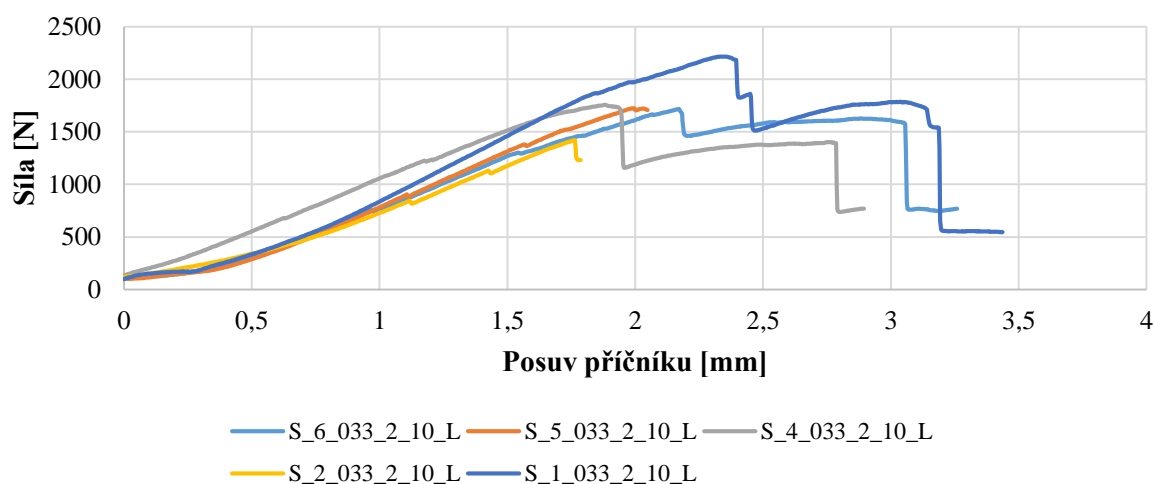
**Graf 9.46:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

## 9.15 Výsledky testu s označením: SH\_01

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]				Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$L$	$\check{S}$	$Lax$						
S_6_033_2_10_L	10,5	120,9	57,3	51,3	23,3	2	12	1719	MAV	NE
S_5_033_2_10_L	10,5	120,5	61,3	52,3	24,5	2	12	1724	O UU	ANO
S_4_033_2_10_L	10,6	120,4	6,9	52,7	24,9	2	12	1757	MAV	NE
S_2_033_2_10_L	10,5	120,3	59,4	52,6	24,1	2	12	1420	O UU	ANO
S_1_033_2_10_L	10,4	120,7	60,8	49,9	25,3	2	12	2216	MAV	NE

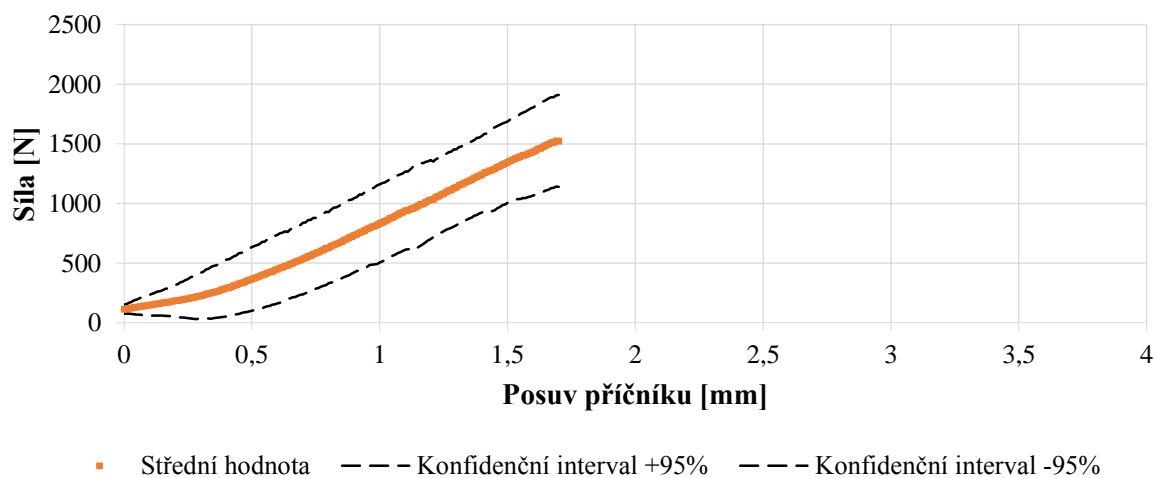
**Tab. 9.15:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

**Test: SH\_01**



**Graf 9.47:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

**Test: SH\_01**



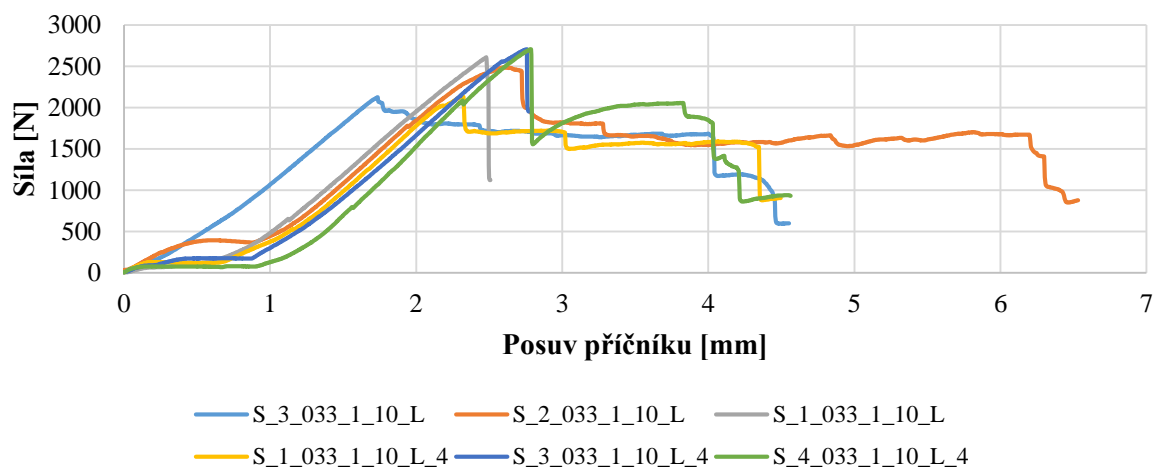
**Graf 9.48:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

## 9.16 Výsledky testu s označením: SH\_02

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]				Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčniku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$L$	$\check{S}$	$Lax$						
S_3_033_1_10_L	11,2	119,7	60,0	49,9	29,4	2	12	2126	MAV	NE
S_2_033_1_10_L	11,1	120,5	61,3	53,1	29,4	2	12	2488	MAV	NE
S_1_033_1_10_L	11,1	120,1	61,4	57,6	30,5	2	12	2609	O UU	ANO
S_1_033_1_10_L_4	11,1	120,0	61,3	49,2	28,5	2	12	2137	MAV	NE
S_3_033_1_10_L_4	11,1	120,7	59,3	49,8	28,5	2	12	2708	O UU	ANO
S_4_033_1_10_L_4	10,9	120,9	61,3	47,8	28,6	2	12	2707	MAV	NE

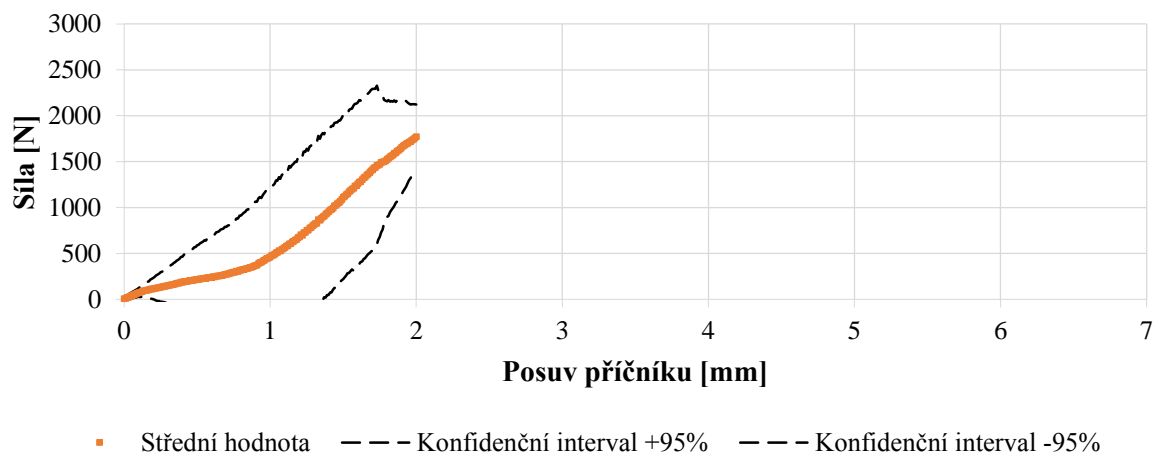
**Tab. 9.16:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: SH\_02



**Graf 9.49:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčniku

### Test: SH\_02



**Graf 9.50:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčniku

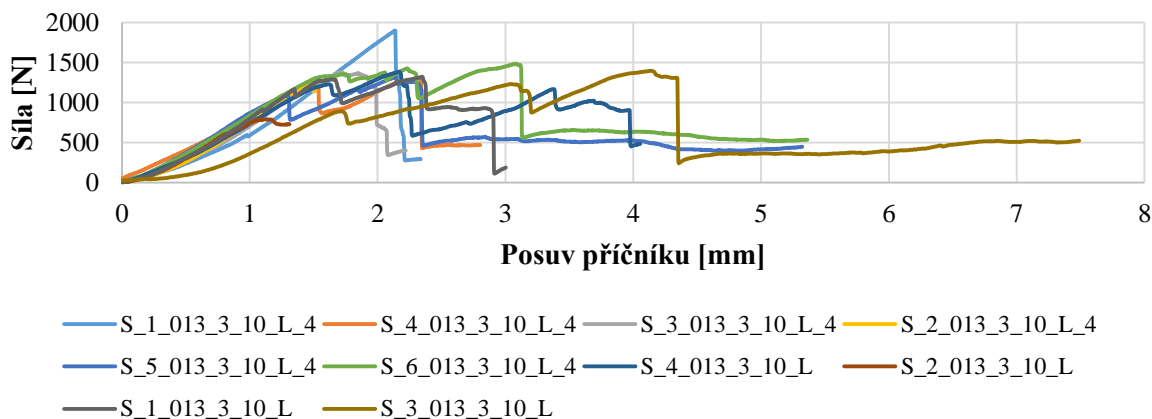


## 9.17 Výsledky testu s označením: SH\_03

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]				Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$L$	$\check{S}$	$Lax$						
S_1_013_3_10_L_4	10,5	121,4	61,4	50,9	21,5	2	12	1900,2	FAT	NE
S_4_013_3_10_L_4	10,6	120,3	61,4	49,6	21,9	2	12	1301,7	MAV	NE
S_3_013_3_10_L_4	10,5	120,1	61,5	49,9	22,1	2	12	1380,7	FAT	NE
S_2_013_3_10_L_4	10,6	119,8	57,0	50,3	21,2	2	12	1257,6	O UU	ANO
S_5_013_3_10_L_4	10,5	120,3	61,5	49,8	22,0	2	12	1316,4	MAV	NE
S_6_013_3_10_L_4	10,5	120,9	61,5	50,0	22,2	2	12	1484,4	MAV	NE
S_4_013_3_10_L	10,6	120,5	61,5	49,7	21,5	2	12	1383,0	FAT	NE
S_2_013_3_10_L	10,6	120,2	57,3	49,0	21,3	2	12	792,3	O UU	ANO
S_1_013_3_10_L	10,4	121,1	61,2	49,4	21,3	2	12	1321,1	MAV	NE
S_3_013_3_10_L	10,5	119,9	60,7	49,2	20,7	2	6	1394,4	MAV	NE

Tab. 9.17: Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: SH\_03



Graf 9.51: Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### Test: SH\_03



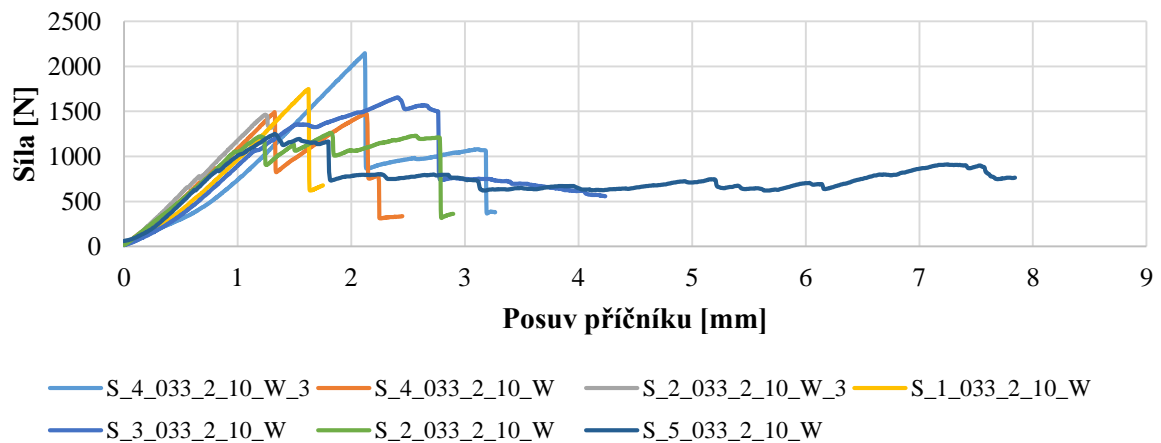
Graf 9.52: Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

## 9.18 Výsledky testu s označením: SH\_04

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]				Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>Š</i>	<i>Lax</i>						
S_4_033_2_10_W_3	10,4	120,3	61,5	53,1	22,7	2	12	2146	MAV	NE
S_4_033_2_10_W	10,5	120,6	61,4	50,0	22,4	2	12	1492	MAV	NE
S_2_033_2_10_W_3	10,4	120,5	59,1	51,5	21,8	2	12	1463	O UU	ANO
S_1_033_2_10_W	10,5	121,0	61,2	47,5	22,3	2	12	1749	O UU	ANO
S_3_033_2_10_W	10,5	120,8	61,4	49,4	22,0	2	12	1655	MAV	NE
S_2_033_2_10_W	10,4	120,4	61,4	49,9	22,1	2	12	1263	MAV	NE
S_5_033_2_10_W	10,5	121,1	59,8	49,5	22,0	2	6	1250	MAV	NE

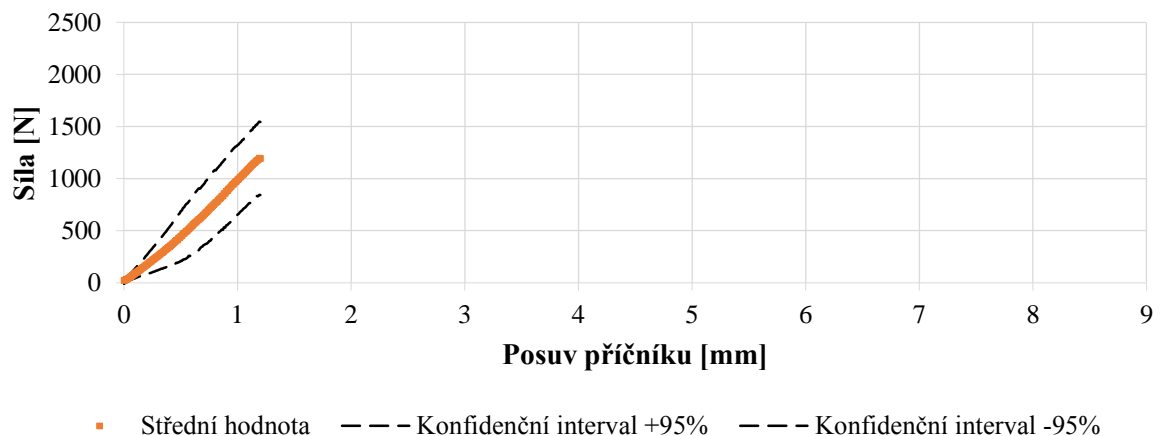
**Tab. 9.18:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: SH\_04



**Graf 9.53:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### Test: SH\_04



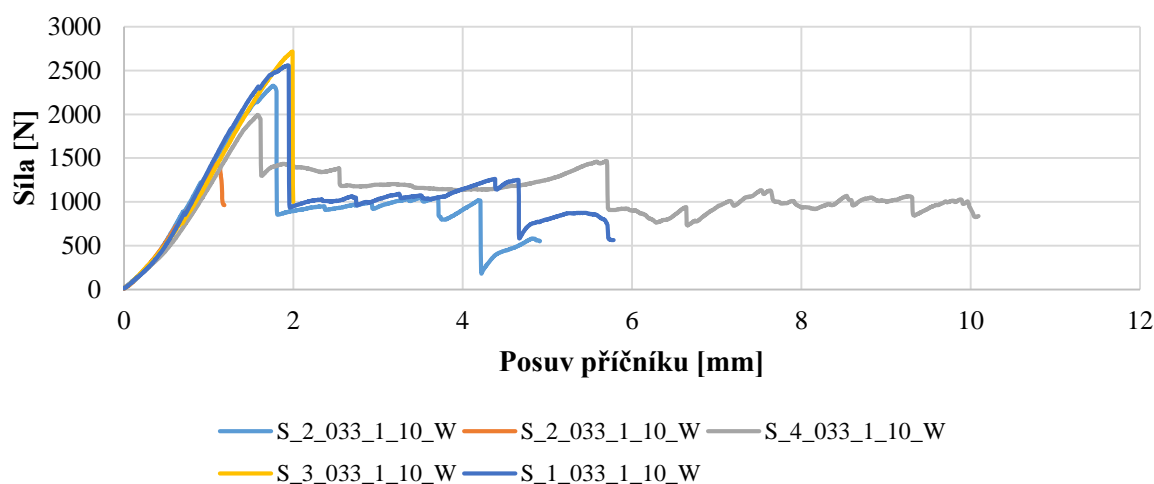
**Graf 9.54:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

## 9.19 Výsledky testu s označením: SH\_05

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]				Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$L$	$\check{S}$	$Lax$						
S_2_033_1_10_W	11,0	119,7	60,4	48,5	28,2	2	12	2327	MAV	NE
S_6_033_1_10_W	10,8	121,3	60,9	51,3	29,3	2	12	1443	O UU	ANO
S_4_033_1_10_W	10,9	120,4	59,6	53,7	28,6	2	12	1992	MAV	NE
S_3_033_1_10_W	11,0	121,1	61,1	51,2	28,7	2	12	2716	O UU	ANO
S_1_033_1_10_W	11,0	122,0	62,4	49,5	29,6	2	12	2560	MAV	NE

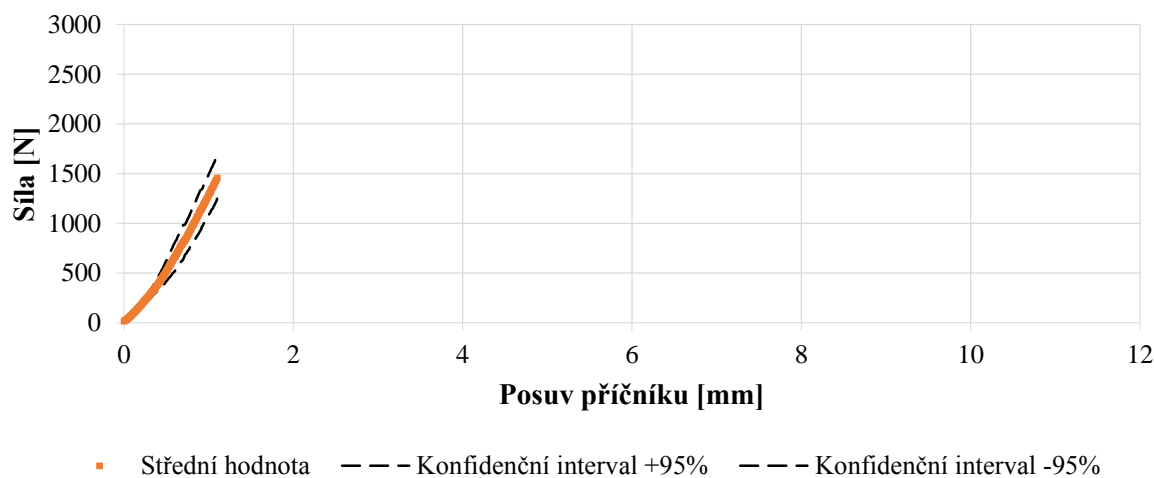
Tab. 9.19: Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: SH\_05



Graf 9.55: Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### Test: SH\_05



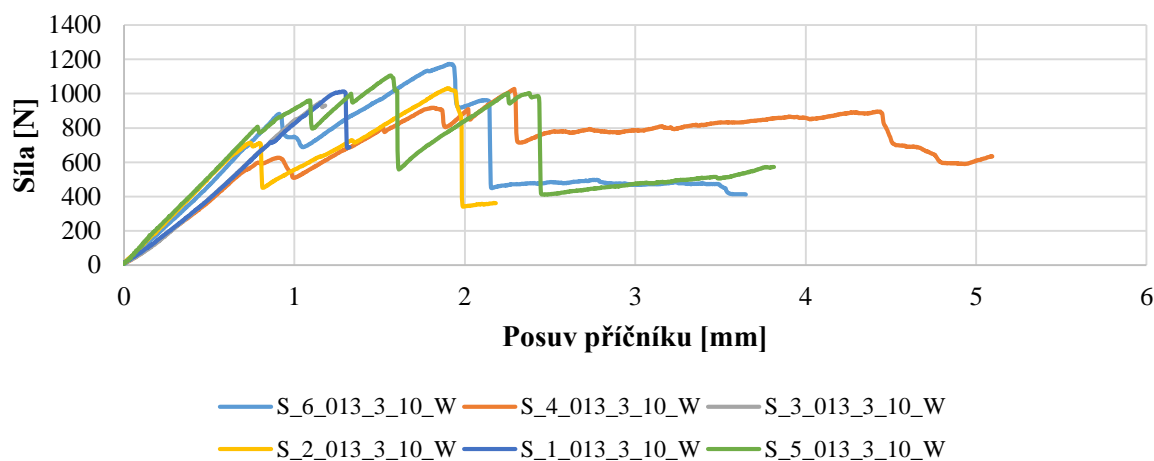
Graf 9.56: Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

## 9.20 Výsledky testu s označením: SH\_06

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]				Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$L$	$\dot{S}$	$Lax$						
S_6_013_3_10_W	10,5	121,0	61,0	49,1	21,2	2	12	1174	MAV	NE
S_4_013_3_10_W	10,6	121,1	60,8	50,9	21,1	2	12	1028	MAV	NE
S_3_013_3_10_W	10,6	121,2	61,0	49,7	21,6	2	12	952	O UU	ANO
S_2_013_3_10_W	10,6	121,1	60,8	50,1	21,4	2	12	1031	O UU	NE
S_1_013_3_10_W	10,5	121,4	61,4	50,9	21,5	2	12	1014	O UU	ANO
S_5_013_3_10_W	10,4	121,0	61,2	48,6	21,4	2	12	1107	MAV	NE

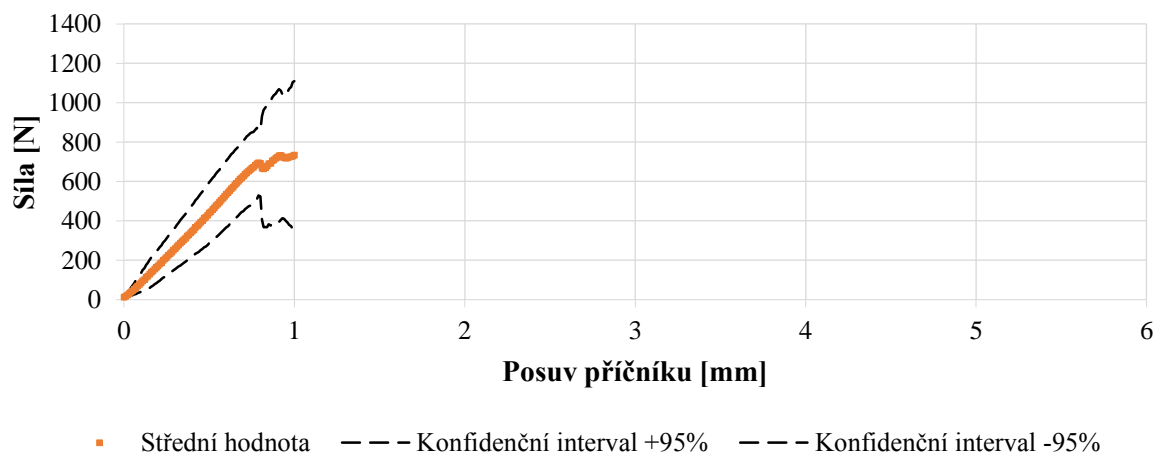
**Tab. 9.20:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: SH\_06



**Graf 9.57:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### Test: SH\_06



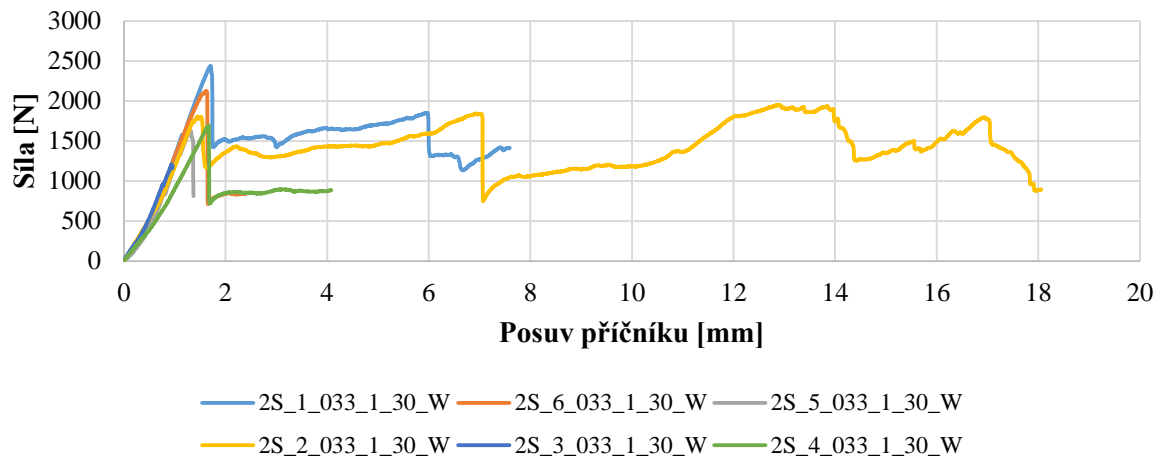
**Graf 9.58:** Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

## 9.21 Výsledky testu s označením: SH\_07

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]				Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$L$	$\check{S}$	$Lax$						
2S_1_033_1_30_W	30,9	121,2	60,8	50,1	41,9	2	12	2443	MAV	NE
2S_6_033_1_30_W	30,9	121,1	60,9	48,9	41,5	2	12	2129	MAV	NE
2S_5_033_1_30_W	31,0	120,4	61,0	49,8	43,2	2	12	1635	O UU	ANO
2S_2_033_1_30_W	31,0	121,1	59,5	49,4	41,2	2	12	1954	MAV	NE
2S_3_033_1_30_W	53,7	120,4	61,0	49,6	42,3	2	12	1210	O UU	ANO
2S_4_033_1_30_W	53,4	120,0	60,6	49,2	42,7	2	12	1692	MAV	NE

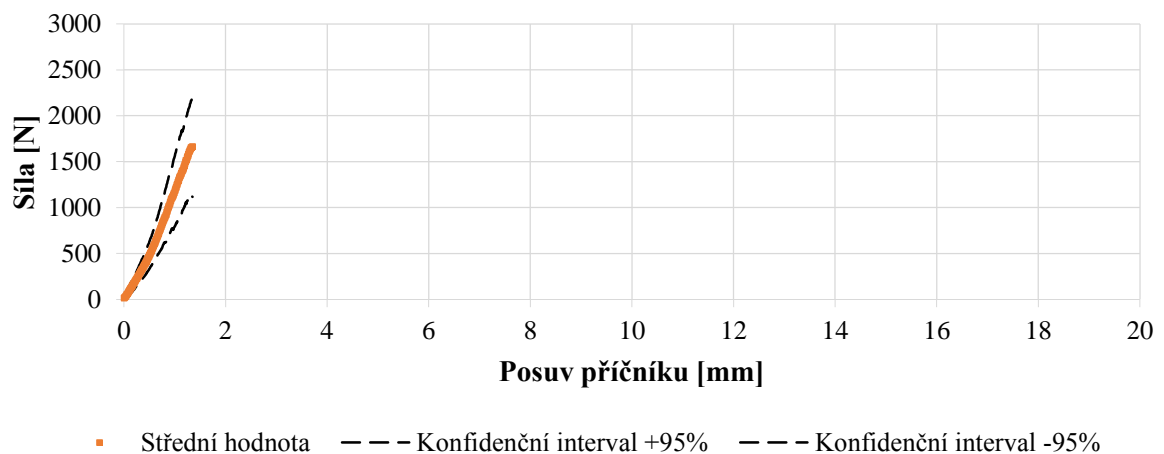
Tab. 9.21: Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: SH\_07



Graf 9.59: Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### Test: SH\_07



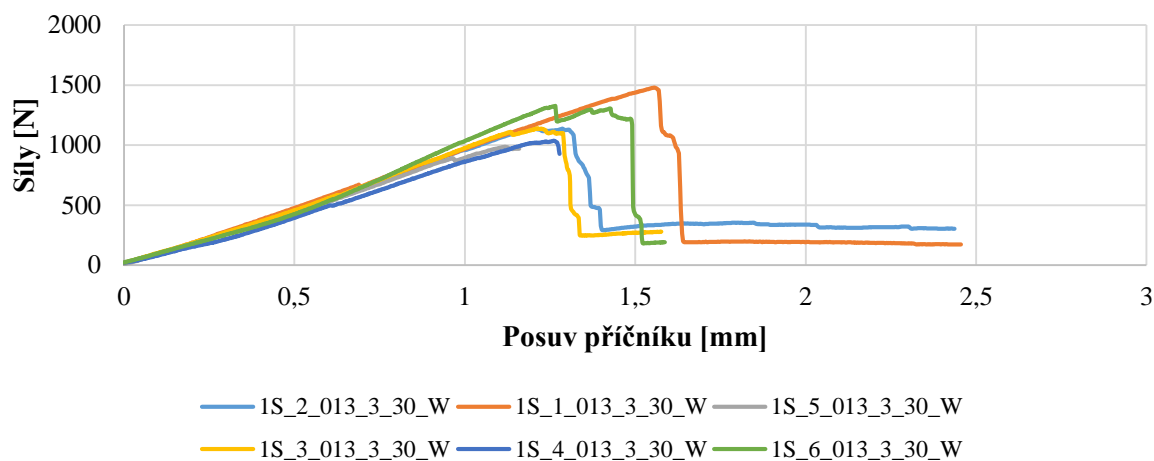
Graf 9.60: Střední hodnota průběhů závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

## 9.22 Výsledky testu s označením: SH\_08

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]				Hmotnost [g]	Rychlost posuvu příčnicku [mm/s]	Vzorkovací frekvence [Hz]	Maximální naměřená síla [N]	Porušení dle [70]	Zkouška po prvním poklesu síly zastavena
	$T$	$L$	$\check{S}$	$Lax$						
1S_2_013_3_30_W	30,4	120,2	60,7	50,9	32,8	2	12	1137	FAT	NE
1S_1_013_3_30_W	30,3	120,3	59,7	50,1	34,1	2	12	1480	FAT	NE
1S_5_013_3_30_W	30,4	121,1	57,7	50,0	31,8	2	12	986	O UU	ANO
1S_3_013_3_30_W	30,4	120,8	61,1	51,4	33,4	2	12	1139	FAT	NE
1S_4_013_3_30_W	30,4	121,2	61,4	50,7	33,3	2	12	1036	FAT	ANO
1S_6_013_3_30_W	30,4	121,5	61,4	50,3	32,6	2	12	1327	FAT	NE

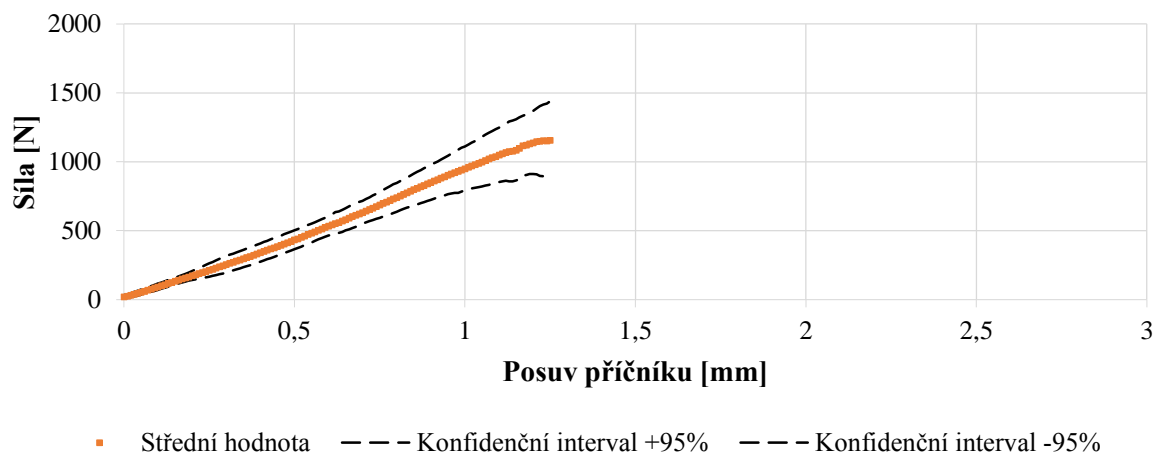
**Tab. 9.22:** Popis vzorků, podmínek zkoušky a dosažených výsledků

### Test: SH\_08



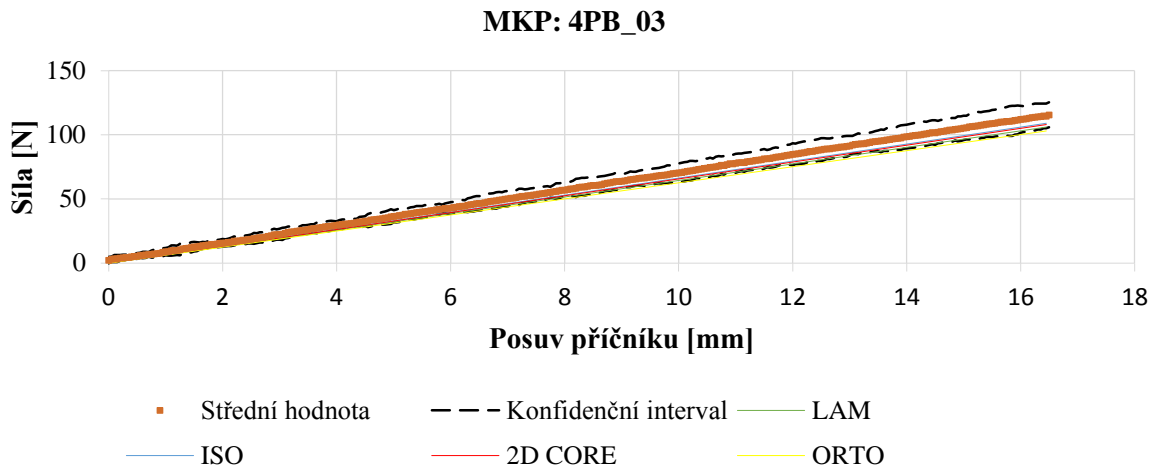
**Graf 9.61:** Průběhy závislosti měřené síly na posuvu příčnicku

### Test: SH\_08

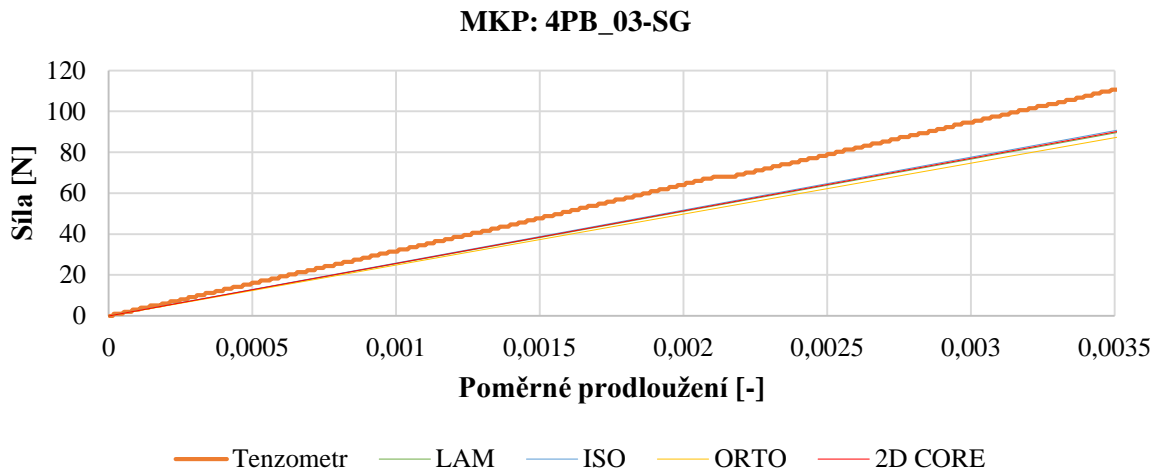


**Graf 9.62:** Střední hodnota průběhů závislostí měřené síly na posuvu příčnicku

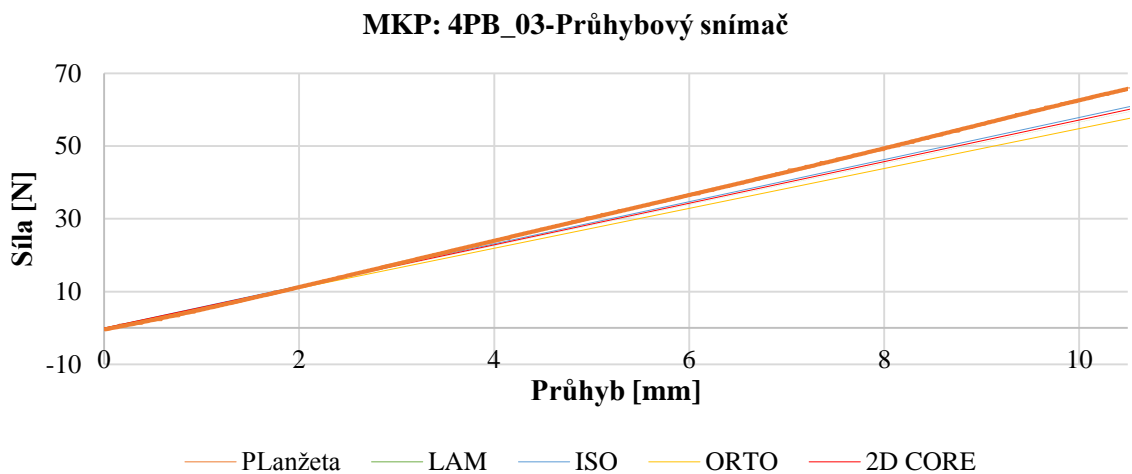
## 9.23 Výsledky výpočtu s označením: 4PB\_03



**Graf 9.63:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na deformaci

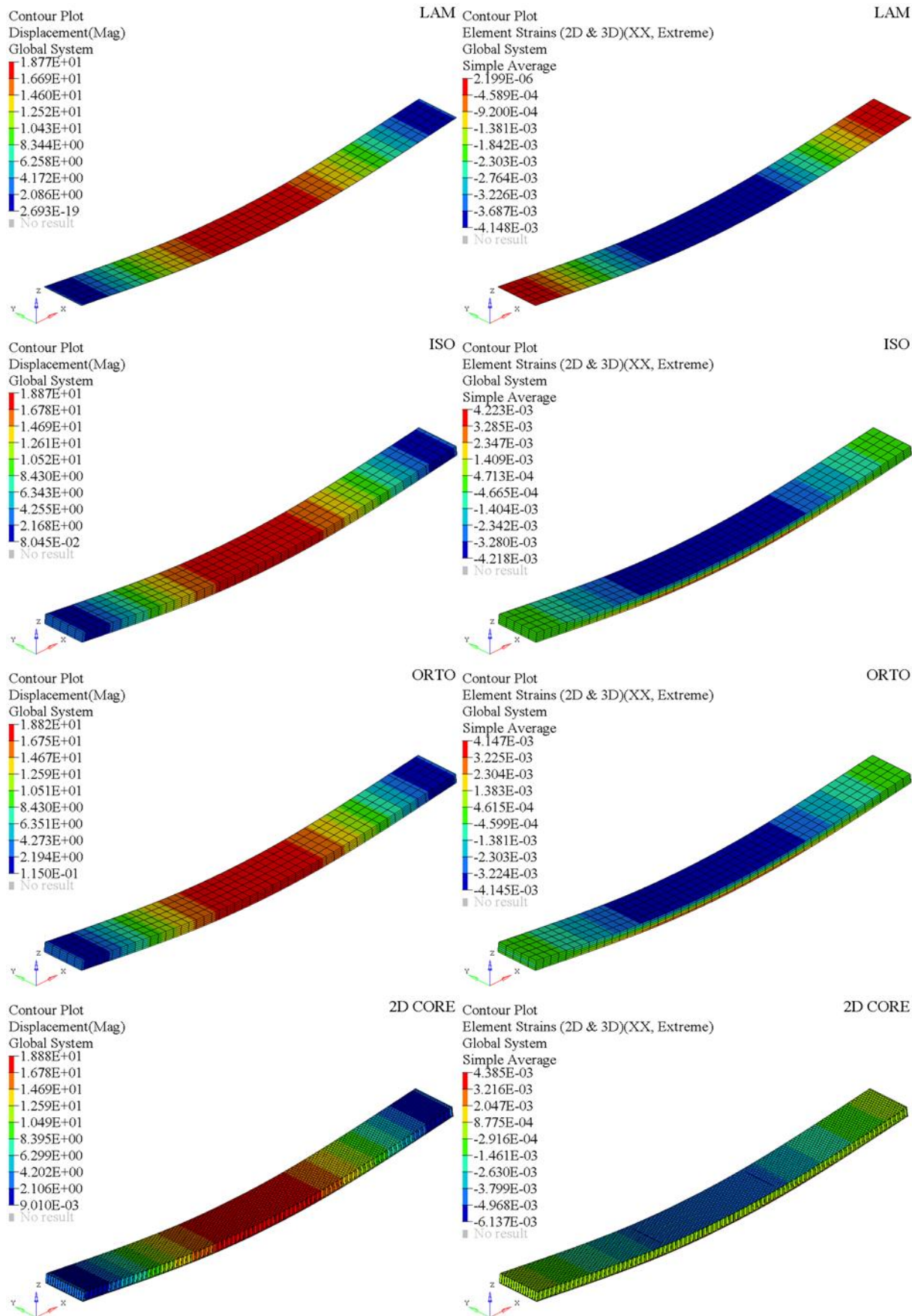


**Graf 9.64:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na poměrném prodloužení



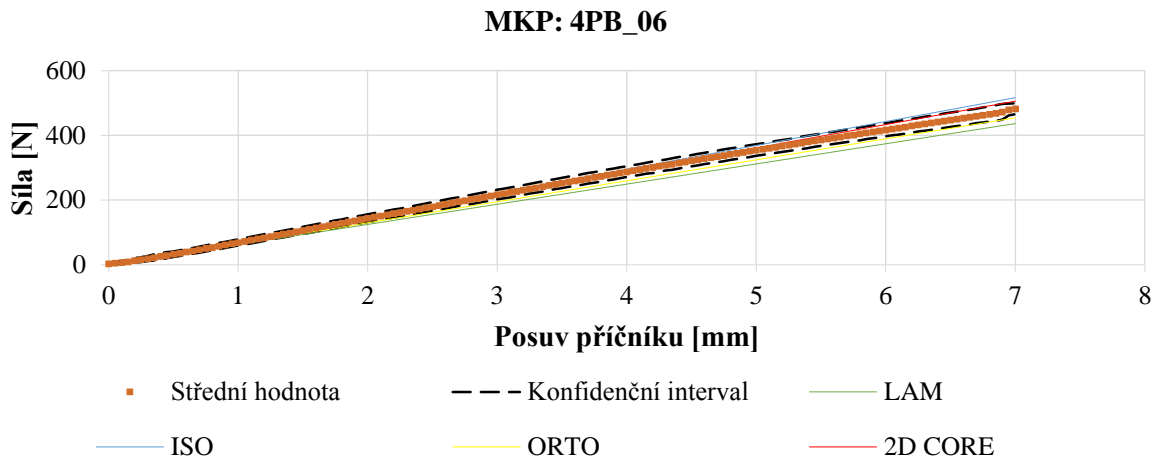
**Graf 9.65:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na průhybu



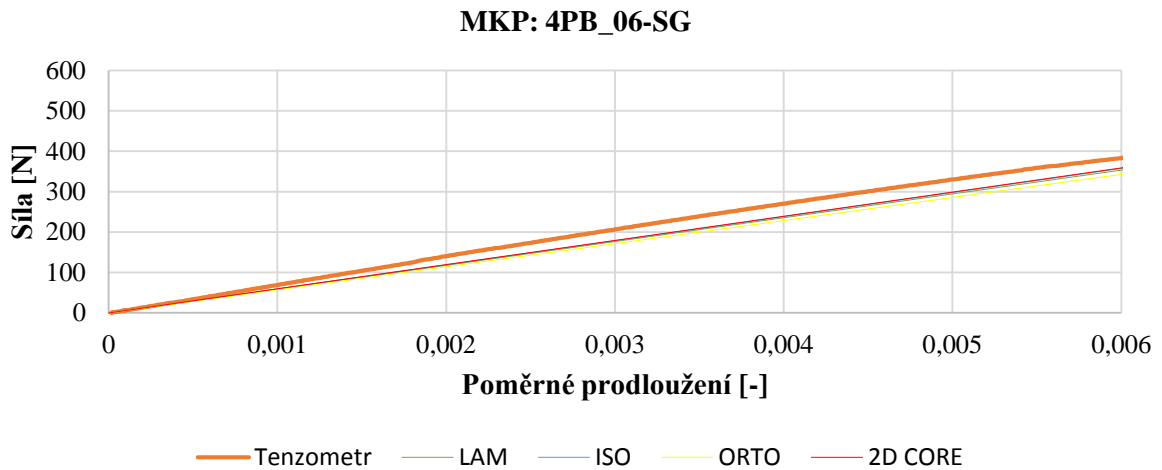


**Obř. 9.10:** Výřsledky celkové deformace pro jednotlivé konfigurace

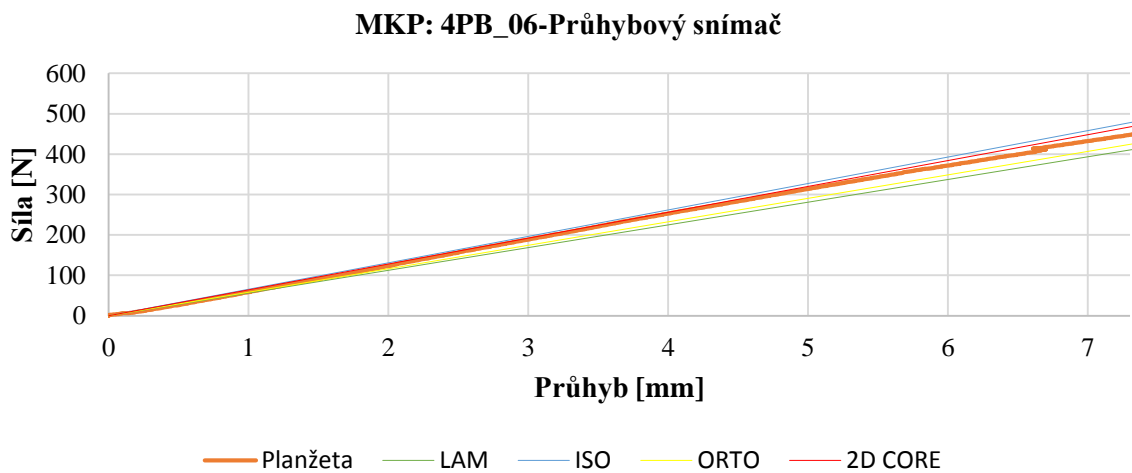
## 9.24 Výsledky výpočtu s označením: 4PB\_06



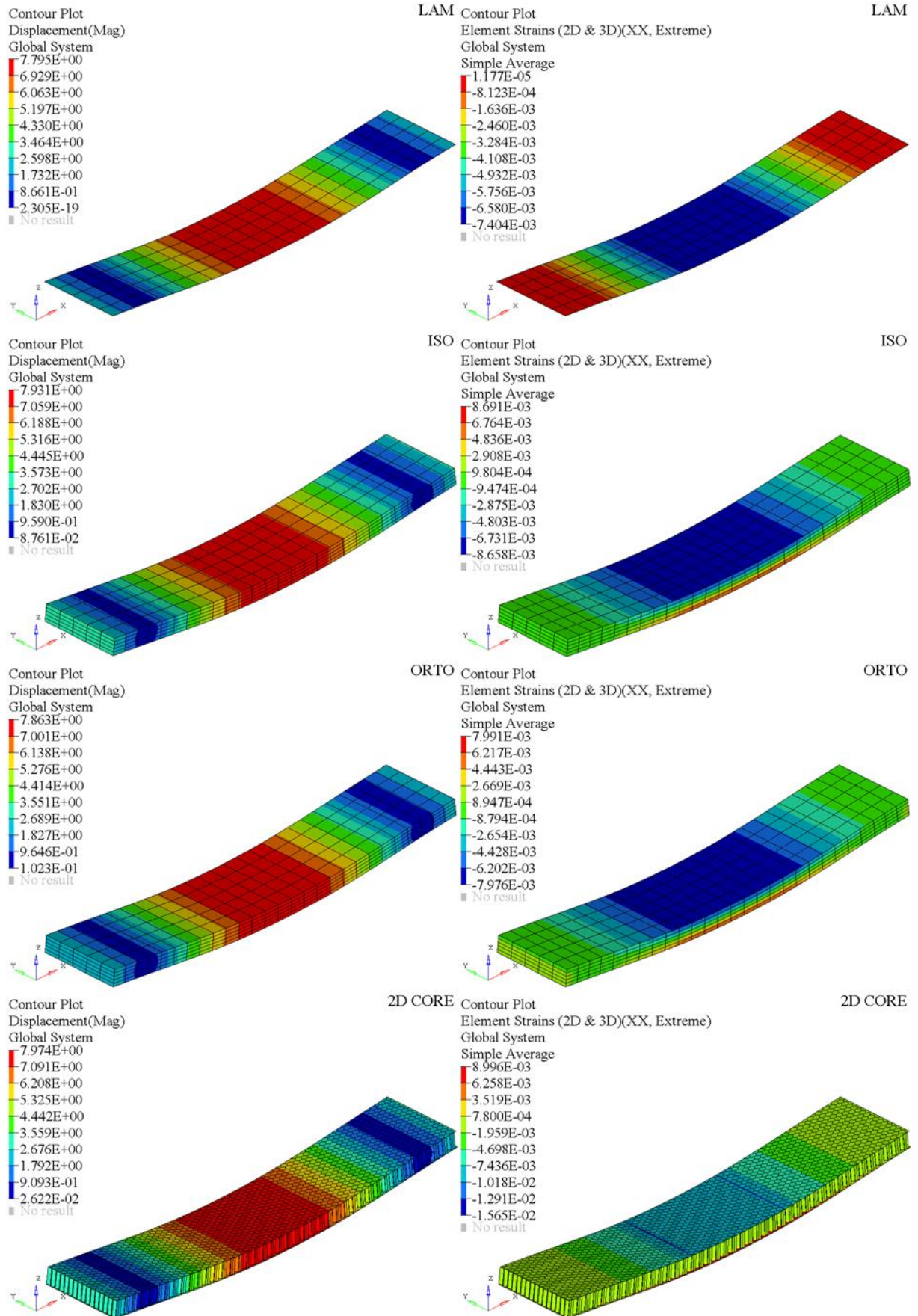
**Graf 9.66:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na deformaci



**Graf 9.67:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na poměrném prodloužení

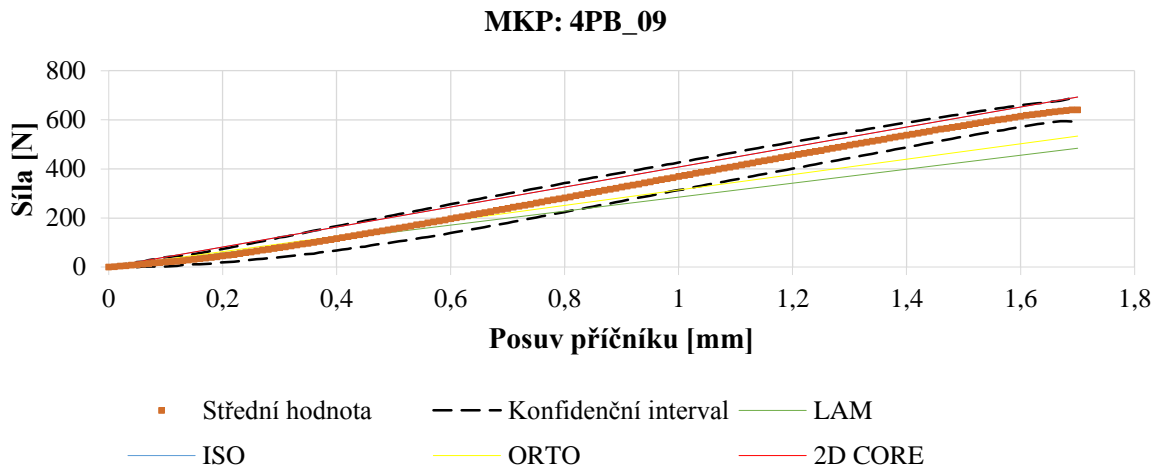


**Graf 9.68:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na průhybu

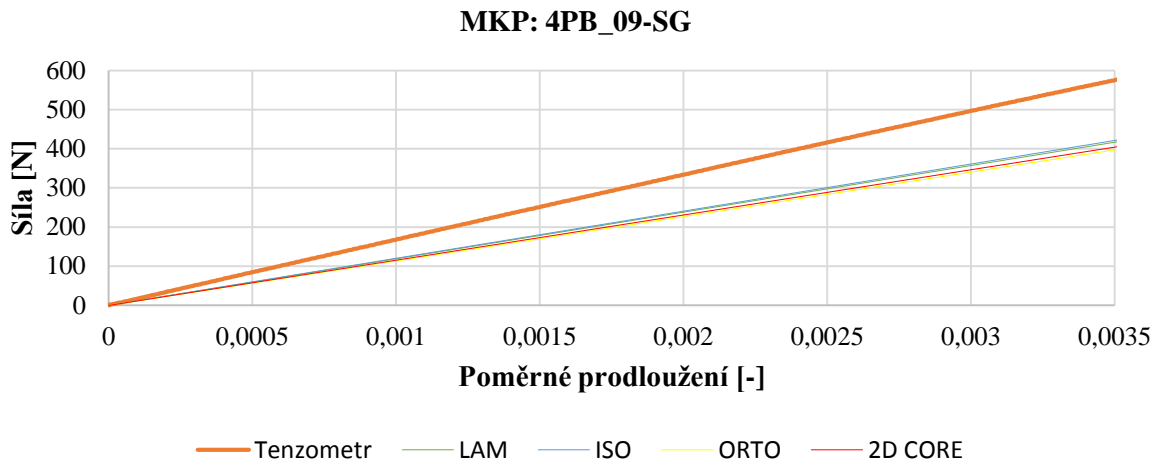


Obr. 9.11: Výsledky celkové deformace pro jednotlivé konfigurace

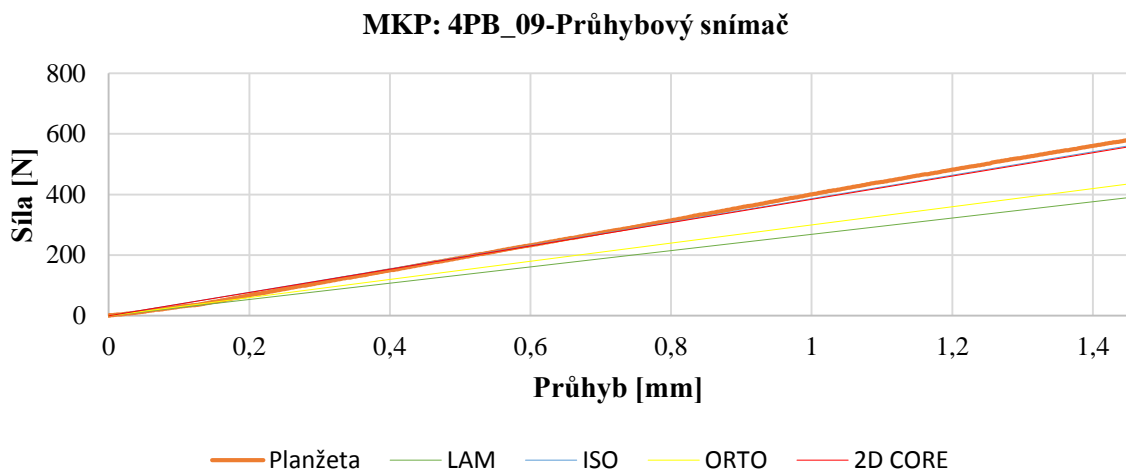
## 9.25 Výsledky výpočtu s označením: 4PB\_09



**Graf 9.69:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na deformaci

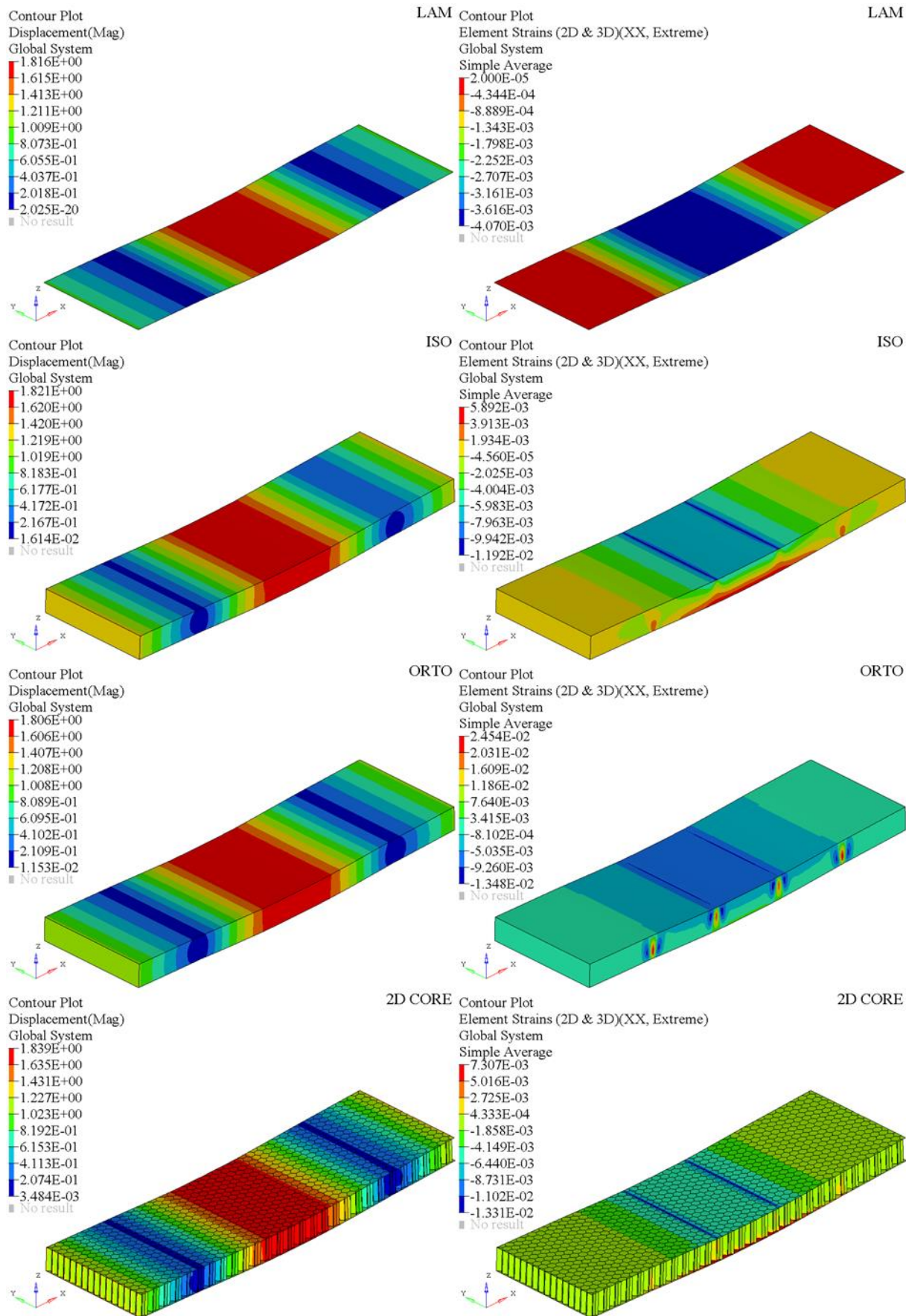


**Graf 9.70:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na poměrném prodloužení



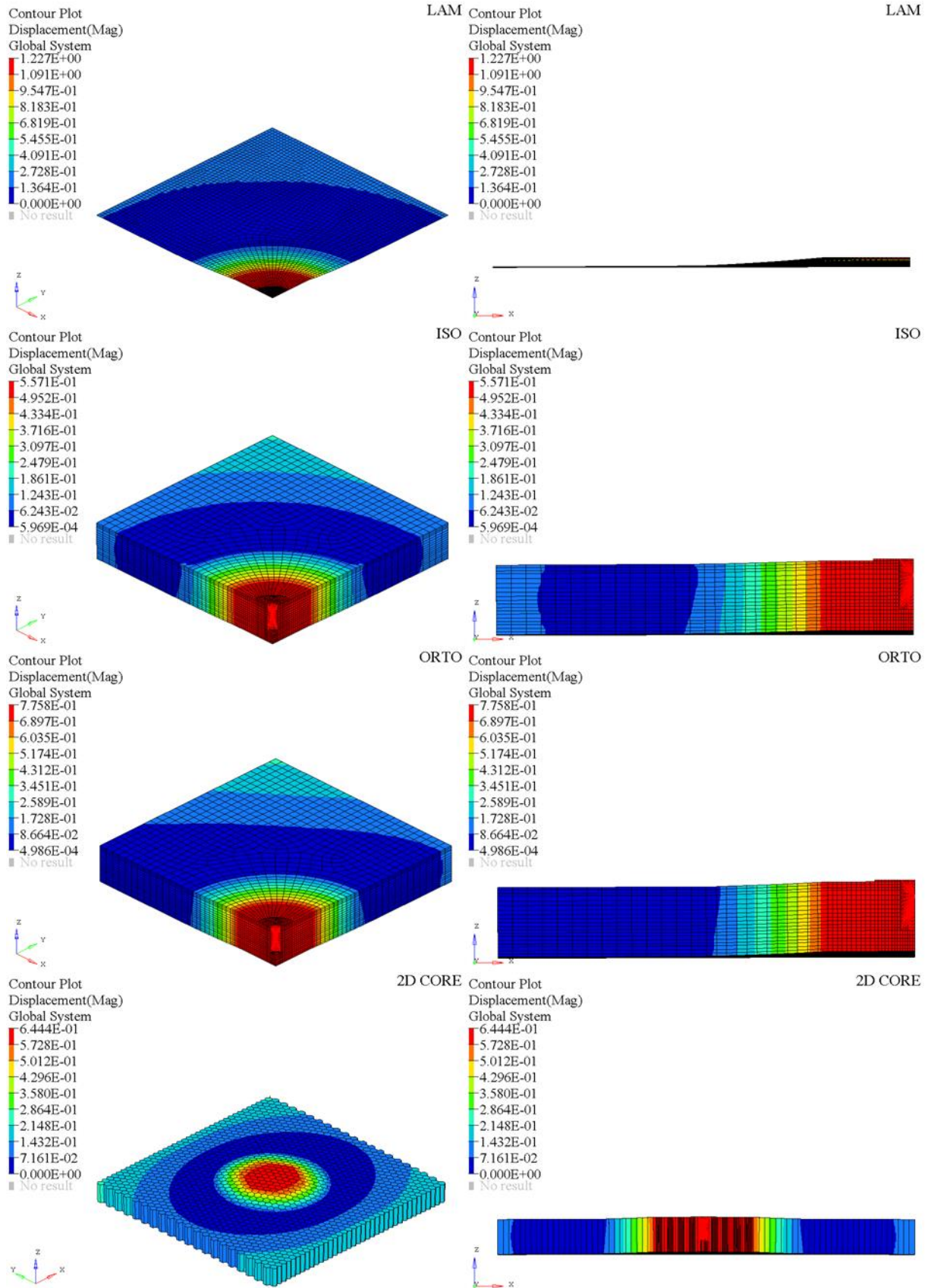
**Graf 9.71:** Porovnání měřené a vypočítané závislosti síly na průhybu





Obř. 9.12: Vřsledky celkovř deformace pro jednotlivř konfigurace

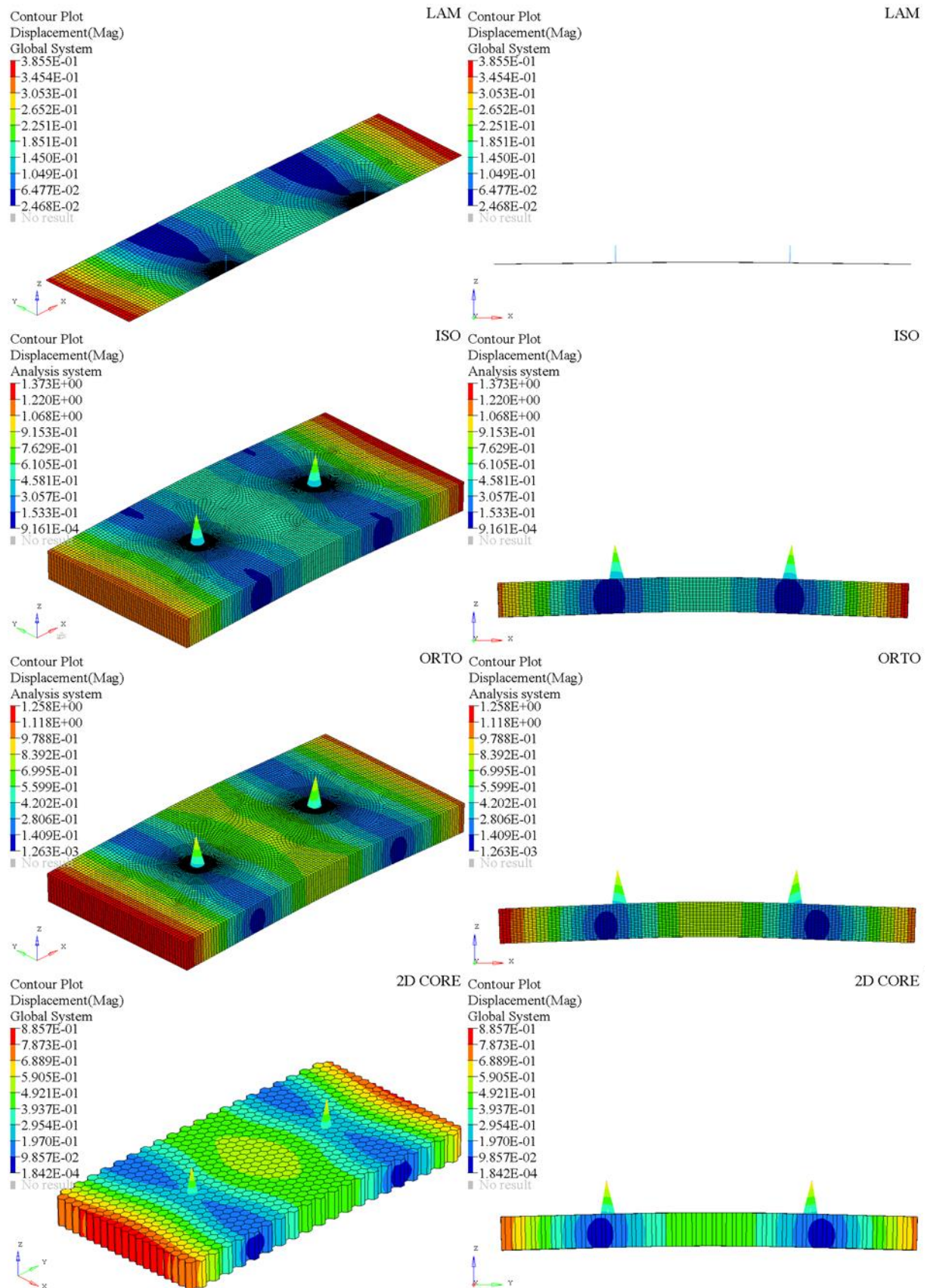
## 9.26 Výsledky výpočtu s označením: PO\_03



Obr. 9.13: Výsledky celkové deformace pro jednotlivé konfigurace



## 9.27 Výsledky výpočtu s označením: SH\_03



Obr. 9.14: Výsledky celkové deformace pro jednotlivé konfigurace

## 9.28 Prepregy

### 9.28.1 PHG600-44-50 (výrobce Gurit) [15]

	Testovací metoda	Hodnota
Pryskyřice		Fenolická
Plošná hustota prepregu	EN 2329	490 ± 20 g/m <sup>2</sup>
Materiál vláken		E-glass
Plošná hustota vláken	EN 2331	296 ± 5 g/m <sup>2</sup>
Vazba tkaniny		8H satin
Obsah pryskyřice	EN 2331	40 ± 3 %

**Tab. 9.23:** Vlastnosti prepregu PHG600-44-50

	Teplota [°C]	Norma	Hodnoty	Jednotky
Ohybová pevnost	Pokožová teplota	ISO 178	470	N/mm <sup>2</sup>
	80		320	
Modul v ohybu	Pokožová teplota	ISO 178	19	kN/mm <sup>2</sup>
	80		16	
Tahová pevnost	Pokožová teplota	ISO 527-4	390	N/mm <sup>2</sup>
	80		230	
Interlaminární smyková pevnost	Pokožová teplota	EN 2850	15	N/mm <sup>2</sup>
	80		12	
Výsledky čtyř bodového ohybu*	Pokožová teplota	AITM 1.0018	750	N
	80		550	

\*Složení zkušební vzorku: 2 vrstvy skinu na horní i dolní straně jádra, voštinové jádro: 3,2-48 kg/m<sup>3</sup> 9,4 mm, rozměry vzorku: 400 ± 1 mm x 75 ± 0,1 mm

**Tab. 9.24:** Mechanické vlastnosti prepregu PHG600-44-50



### 9.28.2 PHG600-68-37 (výrobce Gurit) [20]

	Testovací metoda	Hodnota
Pryskyřice		Fenolická
Plošná hustota prepregu	EN 2329	230 ± 10 g/m <sup>2</sup>
Materiál vláken		E-glass
Plošná hustota vláken	EN 2331	105 ± 5 g/m <sup>2</sup>
Vazba tkaniny		crowfoot 1/3
Obsah pryskyřice	EN 2331	53 ± 3 %

**Tab. 9.25:** Vlastnosti prepregu PHG600-68-37

	Teplota [°C]	Norma	Hodnoty	Jednotky
Ohybová pevnost	Pokožová teplota	ISO 178	380	N/mm <sup>2</sup>
	80		280	
Modul v ohybu	Pokožová teplota	ISO 178	16	kN/mm <sup>2</sup>
	80		14	
Tahová pevnost	Pokožová teplota	ISO 527-4	250	N/mm <sup>2</sup>
	80		200	
Interlaminární smyková pevnost	Pokožová teplota	EN 2850	17	N/mm <sup>2</sup>
	80		13	
Výsledky čtyř bodového ohybu*	Pokožová teplota	AITM 1.0018	350	N
	80		300	

\*Složení zkušební vzorku: 2 vrstvy skinu na horní i dolní straně jádra, voštinové jádro: 3,2-48 kg/m<sup>3</sup> 9,4 mm, rozměry vzorku: 400 ± 1 mm x 75 ± 0,1 mm

**Tab. 9.26:** Mechanické vlastnosti prepregu PHG600-68-37

### 9.29 Voštinové jádro: ECA 3,2 – 48 (výrobce EURO-COMPOSITES) [25]

	Popis	Testovací metoda	Hodnoty	Jednotky
Základní materiál	Nomex-polyamidový papír (meta-aramid), fenolicky napuštěno			
Tvar buněk	Hexagonální			
Velikost buňky			3,2	mm
Hustota		ASTM-C271	48	kg/m <sup>3</sup>
Pevnost v tlaku		ASTM-C365	1,24	N/mm <sup>2</sup>
Smyková pevnost	Směr L	ASTM-C273	1	N/mm <sup>2</sup>
	Směr W		0,55	
Smykový modul	Směr L	ASTM-C273	32,5	N/mm <sup>2</sup>
	Směr W		19,5	

**Tab. 9.27:** Vlastnosti voštinového jádra ECA 3,2 – 48

### 9.30 Plnič: EC 631 FST Epoxy Void Filler (výrobce EURO-COMPOSITES)

		Jednotky
Chemické složení	Modifikovaná epoxy pryskyřice	
Barva	Bílá	
Hustota	0,75 ± 0,05	g/m <sup>3</sup>
Bod vzplanutí	200	°C

**Tab. 9.28:** Vlastnosti plniče EC 631 FST Epoxy Void Filler

		Jednotky
Pevnost v tlaku	65	N/mm <sup>2</sup>
Modul v tlaku	3500	N/mm <sup>2</sup>

**Tab. 9.29:** Mechanické vlastnosti plniče EC 631 FST Epoxy Void Filler

### 9.31 Lepidlo: EA 9396 AERO Epoxy Paste Adhesive

	Složka A	Složka B	Smíchaná A a B	Jednotky
Barva	Modrá	Fialová	Tmavě zelená	
Hustota	1,17	0,98	1,14	g/m <sup>3</sup>
Poměr složek	100	30		

**Tab. 9.30:** Vlastnosti lepidla EA 9396 AERO Epoxy Paste Adhesive

Tahová pevnost	35,2	N/mm <sup>2</sup>
Modul v tahu	2750	N/mm <sup>2</sup>
Prodloužení	3,4	%

**Tab. 9.31:** Mechanické vlastnosti lepidla EA 9396 AERO Epoxy Paste Adhesive

## 9.32 Materiály použité pro numerické analýzy

### 9.32.1 Materiály pro model s vrstvenými 2D elementy

Konstanta	Prepreg	Voština	Plnič
Youngův modul ve směru 1	15000	1	3500
Youngův modul ve směru 2	13000	1	3500
Youngův modul ve směru 3	-	-	3500
Poissonův poměr 12	0,1	0	0,3
Poissonův poměr 23	-	-	0,3
Poissonův poměr 31	-	-	0,3
Smykový modul 12	4500	1	-
Smykový modul 23	-	12,4	-
Smykový modul 31	-	15,2	-

\*1 označuje podélný směr

\*2 označuje příčný směr

\*3 označuje směr kolmý na rovinu 12

**Tab. 9.32:** Materiálové vlastnosti použité pro daný model

### 9.32.2 Materiál pro model s objemovými elementy

Konstanta	Prepreg	Voština ISO	Voština ORTO	Plnič
Youngův modul ve směru 1	15000	100	1	3500
Youngův modul ve směru 2	13000	100	1	3500
Youngův modul ve směru 3	-	100	138	3500
Poissonův poměr 12	0,1	0,05	0,3	0,3
Poissonův poměr 23	-	0,05	0,02	0,3
Poissonův poměr 31	-	0,05	0,02	0,3
Smykový modul 12	4500	-	4500	-
Smykový modul 23	-	-	32	-
Smykový modul 31	-	-	24	-

\*1 označuje podélný směr

\*2 označuje příčný směr

\*3 označuje směr kolmý na rovinu 12

**Tab. 9.33:** Materiálové vlastnosti použité pro daný model

### 9.32.3 Materiál pro model s detailním popisem jádra

Konstanta	Prepreg	Voština	Plnič
Youngův modul ve směru 1	15000	4570	3500
Youngův modul ve směru 2	13000	3520	3500
Youngův modul ve směru 3	-	-	3500
Poissonův poměr 12	0,1	0,2	0,3
Poissonův poměr 23	-	-	0,3
Poissonův poměr 31	-	-	0,3
Smykový modul 12	4500	1680	-
Smykový modul 23	-	-	-
Smykový modul 31	-	-	-

\*1 označuje podélný směr

\*2 označuje příčný směr

\*3 označuje směr kolmý na rovinu 12

**Tab. 9.34:** Materiálové vlastnosti použité pro daný model

### 9.32.4 Materiály pro nelineární výpočet

Konstanta	Prepreg	Voština	Plnič
Youngův modul ve směru 1	20000	60	3500
Youngův modul ve směru 2	15000	50	3500
Youngův modul ve směru 3	15000	300	3500
Poissonův poměr 12	0,28	0,03	0,3
Poissonův poměr 23	0,4	0,02	0,3
Poissonův poměr 31	0,28	0,02	0,3
Smykový modul 12	4700	1	-
Smykový modul 23	3500	32	-
Smykový modul 31	4700	24	-

\*1 označuje podélný směr

\*2 označuje příčný směr

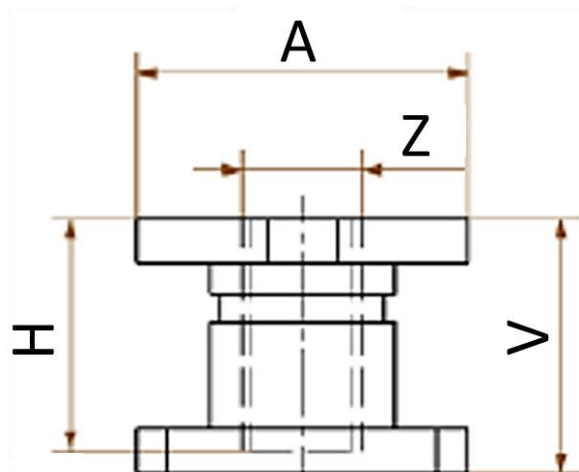
\*3 označuje směr kolmý na rovinu 12

**Tab. 9.35:** Materiálové vlastnosti použité pro daný model

### 9.33 Insert NAS 1836-08-11

	Char. Rozměry	Jednotky
A	11,46	mm
V	8,8	mm
H	7,2	mm
Z (závit)	8-32	mm
materiál	ocel	

Tab. 9.36: Charakteristické rozměry Insertu NAS 1836-08-11



Obr. 9.15: Zobrazení charakteristických rozměrů Insertu NAS 1836-08-11

### 9.34 Zdrojový kód pro řízené vypnutí pevného kontaktu

#### 9.34.1 Vypnutí kontaktu po prvním kroku výpočtu

```
mycont=cid  
mytarg=tid
```

```
esel,s,type,,mycont  
esel,a,type,,mytarg
```

```
ekill,all  
allsel
```

### 9.34.2 Vypnutí kontaktu při dosažení určité hodnoty ekvivalentního napětí

```
/post1                                !Přejde do postprocessoru
set,1                                  !Vybere "set" 1 tj. předchozí
step
cmsel,s,ns_check,node                 !Vybere named selection na ns_check
*GET,ND_CNT,NODE,0,COUNT               !Zjistí počet uzlů a uloží do ND_CNT
N_idx=0
*DO,lp_idx,1,ND_CNT
    N_idx=NDNEXT(N_idx)               !Vybere následující uzel
    *GET,HODNOTA,NODE,N_idx,S,EQV
    *IF,HODNOTA,GE,ARG1,THEN
        ANO=1                          !Logická proměnná potvrzující vypnutí
    *ENDIF
*ENDDO
allsel

/solu

*IF,ANO,EQ,1,THEN
    esel,s,type,,mycont
    esel,a,type,,mytarg
    ekill,all
    allsel

    cmsel,s,ns_load,node
    *GET,ND_CNT,NODE,0,COUNT
    N_idx=0

    *DO,lp_idx,1,ND_CNT
        N_idx=NDNEXT(N_idx)
        D,N_idx,UZ,-1.7
    *ENDDO

allsel
*ENDIF
```

## 10 Seznam použité literatury

- [1] Hasala, Lukáš. Návrh a testování sendvičových kompozitních materiálů pro dopravní aplikace. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně 2012. Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [2] Bačovský, Marek. Použití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu. Brno: VUT 2012. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [3] Křeček, Vojtěch. Výzkum crush-core technologie. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně 2013. Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [4] Petras, Achilles. Design of Sandwich Structures. Cambridge: Robinson College 1998. Disertační práce, Cambridge University, Engineering Department.
- [5] HEXCEL Composites [online]. HexWeb™ Honeycomb Attributes and Properties, 1999. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf)
- [6] Federal Aviation Administration [online]. Advanced Composite Materials, 2015. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ebookpdfdownload.co/book/chapter-7-advanced-composite-material-federal-.html>
- [7] Staněk, Lukáš. Návrh skladby sendvičového kompozitního materiálu pro dopravní a stavební aplikace. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně 2013. Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [8] Standard Specification for Finished Woven Glass Fabrics [online]. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: [http://www.astm.org/FULL\\_TEXT/D4029/HTML/D4029.htm](http://www.astm.org/FULL_TEXT/D4029/HTML/D4029.htm)
- [9] SHUR-LOK CORPORATION [online]. Design Manual: Fasteners for Sandwich Structure, 1996. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: [http://www.shur-lok.com/product\\_dls/Design\\_Manual.pdf](http://www.shur-lok.com/product_dls/Design_Manual.pdf)
- [10] Bianchi, Gabriel. STRUCTURAL PERFORMANCE OF SPACECRAFT HONEYCOMB PANELS. Southampton: University of Southampton 2011. Disertační práce, University of Southampton, Faculty of Engineering, Science and Mathematics.
- [11] Heimbs S., Pein M. Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts. Elsevier [online]. December 2008. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822308003425>

- [12] Inter-Informatics [online]. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: <http://www.inter-informatics.com/en/activities/aerospace>
- [13] Pavelka, Lukáš. Vliv materiálového složení a tvaru na mechanické chování sendvičové konstrukce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně 2015. Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [14] AirTeamImages [online]. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: [http://www.airteamimages.com/airbus-a320\\_JA03AJ\\_airasia-28japan29\\_167822\\_large.html](http://www.airteamimages.com/airbus-a320_JA03AJ_airasia-28japan29_167822_large.html)
- [15] PHG600-44-50. Gurit. Materiálový list.
- [20] PHG600-68-37. Gurit. Materiálový list.
- [25] ECA 3.2 – 48. EURO-COMPOSITES. Materiálový list.
- [26] MIL-STD-401B. SANDWICH CONSTRUCTIONS AND CORE MATERIALS, GENERAL TEST METHODS. 1956. US Department of Defense.
- [27] Patinya Kumsantia, Bruno Castanié, Phacharaporn Bunyawanichakul. An investigation of failure scenario of the metallic insert in sandwich structures. TSME International Conference, October 2010, Ubon Ratchathani.
- [28] Jun Woo Lim, Dai Gil Lee. Development of the hybrid insert for composite sandwich satellite structures. Elsevier [online]. December 2010. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X1100114X>
- [29] N.K. Naik, G. Nageswara Rao, Ullas Agarwal, K.A. Raju, Shrinivas A. Pottigar, V. Suresh. Sandwich Structures with Composite Inserts: Experimental Studies. POLYM. COMPOS., 30:639–648, 2009. 2008 Society of Plastics Engineers.
- [30] HEXCEL Composites [online]. SANDWICH PANEL FABRICATION TECHNOLOGY, 2001. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Sandwich\\_Panel\\_Fabrication\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Sandwich_Panel_Fabrication_Technology.pdf)
- [31] Insert Design Handbook. ECSS-E-HB-32-22A. 2011. European Space Agency.
- [35] Insert Design Handbook. ESA PSS-03-1202. 1987. European Space Agency.
- [40] Keun-Il Song, Ji-Young Choi, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi, Kwang-Soo Kim. An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures. Elsevier [online]. March 2008. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382230800072X>
- [45] P. BUNYAWANICHAKUL, B. CASTANIE, J.-J. BARRAU. Experimental and Numerical Analysis of Inserts in Sandwich Structures. Springer [online]. March 2008. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10443-005-1122-6>



- [50] Ralf Seemann, Dieter Krause. NUMERICAL MODELLING OF NOMEX HONEYCOMB CORES FOR DETAILED ANALYSES OF SANDWICH PANEL JOINTS. POLYM. 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI).
- [55] P. Bunyawanchakul, B. Castanié, J.-J. Barrau. Non-linear finite element analysis of inserts in composite sandwich structures. Elsevier [online]. July 2004. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836808000723>
- [60] R. Roy, K.H. Nguyen, Y.B. Park, J.H. Kweon, J.H. Choi. Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich Panels with bolt insert. Elsevier [online]. June 2012. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813005192>
- [65] EC 631 FST Epoxy Void Filler. EURO-COMPOSITES. Materiálový list.
- [70] ASTM C393: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexur. November 2011.
- [75] Milan Růžička, Josef Jurenka, Zbyněk Hrubý. Dynamická pevnost a životnost: Jur I. [vid. 18.12.2015]. Dostupné z: [http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ\\_Jur\\_2015\\_01\\_web.pdf](http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ_Jur_2015_01_web.pdf)
- [80] ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. January 2015.