



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## Analýza poškození dopravního letounu při teroristickém útoku

ANALYSIS OF TRANSPORT AIRCRAFT DAMAGE DURING TERRORIST ATTACK

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Markéta Čížková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc.

BRNO 2021



# Zadaní diplomové práce

-	Letecký ústav
Studentka:	<b>Bc. Markéta Čížková</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc.</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Analýza poškození dopravního letounu při teroristickém útoku**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Vyhodnocení rozsahu poškození dopravního letounu při teroristickém útoku a odhad možností přežití s ohledem na rozsah poškození hlavních nosných prvků konstrukce.

### **Cíle diplomové práce:**

- důvody, vedoucí k teroristickým útokům a jejich přehled za poslední léta
- prostředky pro poškození letadla zevnitř a zvenčí
- možné rozsahy poškození a jejich důsledky
- vytypování kritických míst konstrukce
- analýza zvolené části konstrukce při různém rozsahu poškození

### **Seznam doporučené literatury:**

PETRÁSEK, M. Konstrukce letadel I-III, S-3149, S-3149/II, S-3149/III, Vojenská akademie, Brno, 2004.

PETRÁSEK, M. Bojová odolnost letadel, S- 10492, Univerzita obrany, Brno, 2011.

Kolektiv autorů. Pevnost a stavební mechanika leteckých konstrukcí, S-2559, VAAZ, Brno, 1979.

HAVELKA, V. Konstrukce a projektování letadel, ČVUT, Praha, 1986.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se ve své teoretické části zabývá důvody vedoucími k teroristickým útokům a stručným výčtem některých útoků na dopravní letouny. Dále se zaměřuje na letoun jako cíl teroristického útoku, zejména na drak letounu jako základní sledovanou část. Závěrem teoretické části je výčet typů leteckých konstrukcí trupu z hlediska konstrukčního řešení přenosu zatížení.

Praktická část stanovuje odhad poškození vzniklého zásahem raketou s tříštivou hlavicí. Tento odhad je posléze aplikován na ilustrační případ. V následujících kapitolách je proveden výpočet kritické síly u panelu zatíženého tlakem v závislosti na různém charakteru a rozsahu poškození. Poté se práce věnuje vyhodnocení získaných výsledků, které jsou shrnuty také v závěrech práce.

## **Klíčová slova**

teroristický útok; poloskořepinová konstrukce; únosnost, ztráta stability

## **ABSTRACT**

In its theoretical part, the diploma thesis deals with the reasons leading to terrorist attacks and a brief list of some attacks on aircraft. It also focuses on the aircraft as the target of a terrorist attack, especially the aircraft kite as the major researched part. The conclusion of the theoretical part summarizes a list of types of aircraft fuselage structures in respect of design solutions for load transfer.

The practical part determines the extent of damage caused by a missile with a fragmentation warhead. This scope is then applied to the illustrative case. In the following chapters, the calculation of the critical force of a panel loaded with pressure depends on the different nature and extent of damage. Then the work highlights the evaluation of the obtained results, which are also summarized in the conclusions of the work.

## **Key words**

terrorist attack; semi-monocoque; load capacity, buckling

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČÍŽKOVÁ, Markéta. *Analýza poškození dopravního letounu při teroristickém útoku*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132640>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza poškození dopravního letounu při teroristickém útoku** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Markéta Čížková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu práce doc. Ing. Miloslavu Petráskovi, CSc. za odborné vedení a za čas, který mi věnoval. Díky patří i mým nejbližším, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

Markéta Čížková



## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>HISTORICKÝ VÝVOJ TERORISTICKÝCH ÚTOKŮ NA LETADLA .....</b>	<b>2</b>
2.1	DEFINICE TERORISTICKÉHO ÚTOKU.....	2
2.2	HISTORIE TERORISTICKÝCH ÚTOKŮ.....	2
2.3	PŘÍČINY TERORISTICKÝCH ÚTOKŮ .....	2
2.3.1	<i>Politické</i> .....	2
2.3.2	<i>Monotematické</i> .....	3
2.3.3	<i>Kriminální</i> .....	3
2.3.4	<i>Náboženské</i> .....	3
2.4	PŘEHLED ÚTOKŮ NA LETADLA .....	3
2.4.1	<i>11. září 2001</i> .....	3
2.4.2	<i>Sestřelení iránského dopravního letounu americkým křižníkem Vincennes</i> .....	4
2.4.3	<i>Aféra Lockerbie</i> .....	5
2.4.4	<i>Sestřelení letu MH 17</i> .....	6
2.4.5	<i>Sestřelení Siberia Airlines 1812</i> .....	6
2.4.6	<i>Sestřelení letu PS752</i> .....	7
<b>3</b>	<b>TERORISTICKÝ ÚTOK Z HLEDISKA POUŽITÝCH PROSTŘEDKŮ .....</b>	<b>9</b>
3.1	ÚTOK NA PALUBĚ.....	9
3.2	ÚTOK VÝBUŠNINOU .....	9
3.3	ÚTOK ZVNĚJŠKU .....	10
3.4	POŠKOZUJÍCÍ PROSTŘEDKY .....	10
3.4.1	<i>Prostředky pro poškození zevnitř</i> .....	10
3.4.2	<i>Prostředky pro poškození z vnějšku</i> .....	11
<b>4</b>	<b>LETOUN JAKO CÍL TERORISTICKÉHO ÚTOKU.....</b>	<b>14</b>
4.1	HLAVNÍ ČÁSTI LETOUNU Z HLEDISKA FUNKCE.....	14
4.1.1	<i>Pohonná soustava</i> .....	14
4.1.2	<i>Vybavení a výstroj</i> .....	14
4.2	DRAK LETOUNU JAKO ZÁKLADNÍ SLEDOVANÁ ČÁST .....	17
4.3	ZATÍŽENÍ PŮSOBÍCÍ NA LETOUN.....	17
<b>5</b>	<b>TYPY LETECKÝCH KONSTRUKCÍ TRUPU Z HLEDISKA KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ PŘENOSU ZATÍŽENÍ ....</b>	<b>19</b>
5.1	PŘÍHRADOVÉ KONSTRUKCE.....	19
5.1.1	<i>Možné poškození a jeho důsledky</i> .....	19
5.2	NOSNÍKOVÉ KONSTRUKCE .....	20
5.2.1	<i>Možné poškození a jeho důsledky</i> .....	20
5.3	KONSTRUKCE TYPU NOSNÍKOVÁ POLOSKOŘEPINA .....	22
5.3.1	<i>Možné poškození a jeho důsledky</i> .....	22
5.4	POLOSKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE.....	23
5.4.1	<i>Možné poškození a jeho důsledky</i> .....	23
5.5	SKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE .....	24
5.5.1	<i>Možné poškození a jeho důsledky</i> .....	24
<b>6</b>	<b>STANOVENÍ ROZSAHU POŠKOZENÍ V DŮSLEDKU ZÁSAHU ŘÍZENOU STŘELOU S TŘÍŠŤIVOU HLAVICÍ .</b>	<b>26</b>
6.1	VSTUPNÍ HODNOTY .....	27
6.2	MODEL ŠÍŘENÍ STŘEPIN .....	27
6.3	VÝPOČET VZDÁLENOSTI MEZI STŘEPINAMI PO OBVODU VE VERTIKÁLNÍ ROVINĚ M .....	27
6.4	VZDÁLENOST MEZI STŘEPINAMI V HORIZONTÁLNÍM SMĚRU N .....	28
6.5	STANOVENÍ ÚHLU OBLASTI ŠÍŘENÍ STŘEPIN, KDY DOCHÁZÍ K ZÁSAHU TRUPU $\beta$ .....	29
6.6	POČET STŘEPIN $N_\beta$ V ÚHLU $\beta$ .....	29
6.7	URČENÍ VELIKOSTI STŘEPINY $S_s$ .....	30
6.8	VELIKOST POŠKOZENÍ $S_p$ .....	30
6.9	STANOVENÍ NEJVĚTŠÍHO MOŽNÉHO POŠKOZENÍ S .....	30
<b>7</b>	<b>VÝPOČET ROZSAHU POŠKOZENÍ KONSTRUKCE .....</b>	<b>32</b>
7.1	VSTUPNÍ HODNOTY .....	32

7.2	MODEL ŠÍŘENÍ STŘEPIN .....	32
7.3	VZDÁLENOST MEZI STŘEPINAMI PO OBVODU VE VERTIKÁLNÍ ROVINĚ M .....	32
7.4	VZDÁLENOST MEZI STŘEPINAMI V HORIZONTÁLNÍM SMĚRU N .....	32
7.5	ÚHEL OBLASTI ŠÍŘENÍ STŘEPIN, KDY DOCHÁZÍ K ZÁSAHU TRUPU .....	32
7.6	POČET STŘEPIN V ÚHLU $\beta$ .....	32
7.7	VELIKOST STŘEPINY $S_s$ .....	32
7.8	VELIKOST POŠKOZENÍ $S_p$ .....	33
7.9	STANOVENÍ NEJVĚTŠÍHO MOŽNÉHO POŠKOZENÍ S .....	33
<b>8</b>	<b>KRITICKÉ ZATÍŽENÍ A ÚNOSNOST .....</b>	<b>34</b>
8.1	ÚNOSNOST PANELU V TLAKU .....	34
8.2	ÚNOSNOST POLOSKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE V KRUTU .....	34
8.3	STANOVENÍ ÚNOSNOSTI POLOSKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE V OHYBU .....	34
8.4	SLOŽENÁ NAMÁHÁNÍ .....	35
<b>9</b>	<b>VÝPOČET KRITICKÉ SÍLY U PANELU ZATÍŽENÉHO TLAKEM .....</b>	<b>36</b>
9.1	VSTUPNÍ HODNOTY .....	36
9.2	MÍSTNÍ ZTRÁTA STABILITY .....	36
<b>10</b>	<b>TVORBA MKP MODELU .....</b>	<b>38</b>
10.1	GEOMETRIE .....	38
10.2	Síť .....	39
10.3	VLIV OKRAJOVÝCH PODMÍNEK .....	40
10.4	ZVOLENÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	41
10.5	TVARY MÓDŮ NEPORUŠENÉHO PANELU .....	41
<b>11</b>	<b>POKLES ÚNOSNOSTI V ZÁVISLOSTI NA RŮZNÝCH TYPECH POŠKOZENÍ .....</b>	<b>43</b>
11.1	V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI POŠKOZENÍ .....	43
11.2	V ZÁVISLOSTI NA POLOZE POŠKOZENÍ PO DÉLCE PODÉLNÍKU .....	44
11.3	V ZÁVISLOSTI NA POČTU PORUŠENÝCH PODÉLNÍKŮ .....	45
11.4	POŠKOZENÍ PODÉLNÍKU .....	46
<b>12</b>	<b>VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>48</b>
<b>13</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>49</b>
	<b>POUŽITÉ ZDROJE .....</b>	<b>50</b>
	<b>ZDROJE OBRÁZKŮ .....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>54</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>55</b>
	NEPORUŠENÁ KONSTRUKCE .....	55
	VELIKOST PORUŠENÍ .....	56
	ZTRÁTA STABILITY V ZÁVISLOSTI NA POLOZE PO DÉLCE .....	57
	ZTRÁTA STABILITY PRO ZVYŠUJÍCÍ SE VELIKOST POŠKOZENÍ .....	57
	POČET PORUŠENÝCH PODÉLNÍKŮ .....	60
	POŠKOZENÍ PODÉLNÍKU .....	61

# 1 Úvod

Mohlo by se zdát, že teroristické útoky na letadla jsou záležitostí posledních let, že terorismus obecně je termín, který se začal skloňovat až po 11. září. Doložené počátky terorismu však sahají do prvního století našeho letopočtu.

Historicky je technický pokrok s násilím úzce spjat. Tato paralela se letectví nevyhýbá, a tak se první kriminální čin na palubě letounu zapsal do historie nedlouho po prvním úspěšném letu.

Bezpečnostní opatření na letištích jsou velmi přísná a neustále se aktualizují. To prakticky znemožňuje propašování výbušnin nebo zbraní na palubu. Počet únosů letadel nebo útoků přímo na palubě v důsledku těchto opatření v posledních letech citelně poklesl. AviationSafetyNetwork eviduje 1084 hlášení v souvislosti s únosem letounu a 91 v souvislosti se sabotáží, což zahrnuje i přítomnost bomby na palubě. Do poslední dekády z těchto čísel spadá 16 případů únosu letounu a pouze dvě bomby na palubě.

Je tedy možné vyvodit závěr, že letecká doprava přestala být natolik zranitelná zevnitř, jak tomu bylo na počátku jejího rozvoje. Stejný pokrok jako samotná letecká doprava ovšem učinily i prostředky určené k boji proti ní. Protiletadlové střely jsou podstatně menší a jejich dostřel se zvyšuje. Velikost odpalovacích zařízení se zmenšuje, manipulace s nimi je tedy mnohem snazší a je možné je dopravit na palebné pozice a nevzbudit žádné podezření. Zajištění bezpečnosti proti tomuto druhu zbraní po celou dobu letu je prakticky nemožné.

V letectví je většinou zpřísnění bezpečnostních podmínek až následek katastrofy. Moderní výpočetní metody by mohly přispět k vytypování míst konstrukce, které jsou na poškození náchylnější. Bylo by tak možné optimalizovat zvýšení robustnosti těchto míst ještě dříve, než dojde k jejímu selhání v provozu.

## 2 Historický vývoj teroristických útoků na letadla

### 2.1 Definice teroristického útoku

Pro terorismus neexistuje univerzálně uznávaná definice. Je páchán z řady různých důvodů a existuje mnoho způsobů, jak na něj nahlížet.

Pro potřeby této práce je za teroristický útok považováno násilí nebo dokonce hrozba násilím, která má vést k dosažení politických, ideologických nebo náboženských cílů. Teroristických činů se dopouštějí i jiné skupiny než političtí nebo náboženští extrémisté. Jakýkoli názor nebo přesvědčení může ve své krajní podobě vést k terorismu. Mimo jiné se ho dopouštějí ekologická hnutí, hnutí za práva zvířat nebo hnutí proti potratům.

### 2.2 Historie teroristických útoků

Za první teroristickou skupinu jsou považováni zélóti, židovští náboženští fanatikové, kteří v prvním století našeho letopočtu veřejně podřezávali stoupence Říma. Chtěli tak dosáhnout vzpoury židovského obyvatelstva proti římské nadvládě.

Od 7. do 19. století thugové, tedy indická hinduistická sekta, předkládali bohyni Káli lidské oběti.

Patrně nejznámější skupinou jsou asasíni, kteří v období od 11. do 13. století veřejně vraždili politiky a duchovní. Důvodem byl odlišný pohled na islám. [3]

Označení *terrorismus* vzniklo za Velké francouzské revoluce. Tehdy to znamenalo zastrasování obyvatelstva vládou. Na to přímo navazuje období světových válek s válečným a fašistickým terorismem.

Po skončení druhé světové války se terorismus orientuje na národní boj, jsou to vraždy politiků a soudců.

V 80. letech 20. století přišla z arabských zemí vlna sebevražedných útoků. Tyto útoky nemají v historii obdobu a jsou téměř vždy nábožensky motivované.

S technologickým pokrokem se vyvíjely i zbraně používané teroristy. Následoval nárůst útoků na letadla. To vedlo k útoků 11. září, což bývá označováno jako milník terorismu tak, jak ho známe dnes.

### 2.3 Příčiny teroristických útoků

Může se zdát nepředstavitelné, že za teroristickými útoky nestojí psychicky nemocní lidé. Pravdou ale zůstává, že dosavadní výzkumy profilů teroristů nenaznačují, že by jejich chování bylo řízeno psychickou poruchou. Teroristické útoky, a obzvláště ty na letadla, bývají naopak plánované a dobře organizované.

Psychotický terorismus, který je naopak páchán psychicky narušenými jedinci, je sice nepředvídatelný, ale většinou postrádá organizovanost a prostředky. K psychotickému terorismu řadíme například takzvaný darking, tedy odpojování zdrojů elektrické energie.

Kromě psychotického terorismu, který je z hlediska útoků na letadla statisticky nevýznamný, jsou motivy stojící za teroristickými činy děleny na politické, monotematické, kriminální a náboženské.

#### 2.3.1 Politické

Politický terorismus se dělí na separatistický a revoluční. Separatistický má za cíl vytvoření vlastního státu nebo alespoň určité formy autonomie. Na dotčeném území vzniká nestabilní politická situace, kolabuje hospodářství, a to má za následek útek obyvatel. Tito uprchlíci často

nesou své problémy s sebou, ekonomicky zatěžují hostinské země a zpravidla vyvolávají nevoli jejich občanů. Nepřijetí zase negativně působí na psychiku uprchlíků, což může vézt k dalšímu násilí.

### **2.3.2 Monotematické**

Monotematický terorismus je snaha strhnout pozornost požadovaným směrem a vyvolat diskuzi, většinou za účelem změny zákonů nebo politiky. Těchto cílů může být dosaženo běžnými demokratickými prostředky, jako jsou demonstrace nebo petice. Pokud touto cestou není možné dosáhnout požadované publicity, nastupuje monotematický terorismus. V minulosti se k němu uchýlovala například ekologická hnutí nebo hnutí proti potratům.

### **2.3.3 Kriminální**

Kriminální terorismus nebývá do dělení terorismu řazen vždy. Primárně jde o získávání finančních prostředků k posílení moci. Tyto prostředky ale zároveň mohou být použity pro financování náboženského, politického nebo monotematického terorismu.

### **2.3.4 Náboženské**

Náboženský terorismus v poslední době představuje největší nebezpečí. Je dělen na náboženský extremismus a eschatologický terorismus.

Náboženský extremismus má, podobně jako politický separatistický terorismus, za cíl založení vlastního státu, kde by byly hodnoty určovány jejich náboženstvím.

Eschatologický terorismus zastává názor, že svět musí být zničen, aby se mohl očistit a znovuzrodit. Tento svět bude patřit jen vyvoleným a tito vyvolení neváhají použít jakékoli prostředky hromadného ničení, aby současný zkažený svět spasili. [4]

## **2.4 Přehled útoků na letadla**

Prvním zaznamenaným únoscem letadla byl baron Franz von Nopcsa Felso-Szilvas, ten roku 1919 unesl letadlo v Budapešti. [12]

Jeho jednání se však za teroristický útok patrně považovat nedá. Baron von Nopcsa, geniální paleontolog, přišel v důsledku politického vývoje v poválečné Evropě o většinu svého majetku. Trpěl tak hlubokými depresemi, že spáchal sebevraždu poté, co zavraždil svého partnera ve spánku.

### **2.4.1 11. září 2001**

V tomto případě se nejednalo ani tak o útoky na letadla, jako o útoky letadlem. Teroristé unesli čtyři civilní letadla, které využili jako zbraně a dosáhli mnohem větší zkázy, než by se jim podařilo pomocí výbušniny na palubě. Let American Airlines 11 a United Airlines 175 zaútočily po vzoru japonských kamikadze na budovy Světového obchodního centra v New Yorku, známé jako „dvojčata“. Obě budovy se následkem požáru, který při nárazu letadel vznikl, do dvou hodin zřítily.

Let American Airlines měl za cíl Pentagon, sídlo amerického ministerstva obrany.

Čtvrté unesené letadlo, United Airlines 93, mělo podle spekulací zasáhnout Kapitol, ale po potyčce mezi pasažéry a teroristy se zřítilo u města Shansville v Pensylvánii.

V důsledku těchto útoků zemřelo 2996 lidí, včetně devatenácti teroristů.



Obrázek 2.1 Útoky 11. září

#### 2.4.1.1 Motiv

Oficiální teorie podpořená Usáma bin Ládínovým „Dopisem Americe“ mluví o odplatě za americký útlak muslimů. Obviňuje Ameriku z podpory Britů, kteří předali Palestinu židům, což podle něj vedlo k více než padesáti letům tyranie zločinů, zabíjení a destrukce. [11]

Ani 19 let po útocích 11. září neustávají spekulace, proč k nim opravdu došlo.

Konspirační teorie se opírají o nejasnosti především o fakt, že letadlo mířící na Pentagon nebylo sestřeleno. Hnutí, která se neztotožňují s oficiální verzí jsou zakládána politiky, architektky, inženýry a piloty.

#### 2.4.2 Sestřelení iránského dopravního letounu americkým křižníkem Vincennes

Airbus A300, let Iran Air 655, byl 3. července 1988 sestřelen nad Perským zálivem americkým křižníkem Vincennes. USA to prohlásily za omyl a vyplatily rodinám odškodnění, oficiálně se však Iránu nikdy neomluvily. Poté co posádka výzkumného vrtulníku ohlásila, že na ni útočily iránské čluny si měl křižník splést civilní letoun s iránskou stíhačkou F-14 Tomcat, která se chystala k útoku. Na palubě Airbusu zahynulo 274 cestujících a 16 členů posádky.

##### 2.4.2.1 Motiv

Válka v Perském zálivu byl ozbrojený konflikt mezi Irákem a Íránem. Toto označení se později začalo používat i pro Íránskou invazi do Kuvajtu.

Válečný stav možná vysvětluje panující napětí v oblasti, kde ke katastrofě došlo, určitě ale neospravedlňuje útok na civilní letoun. Za sestřelení letu Iran Air 655 nebyl nikdo potrestán, posádka amerického křižníku byla vyznamenána stuhou za bojové nasazení, kapitán dokonce řádem *Legion of Merit*.



Obrázek 2.2 Místo sestřelení letu Iran Air 655

### 2.4.3 Aféra Lockerbie

Aféra Lockerbie je teroristický bombový útok, pojmenovaný po místě dopadu letadla Boeing 747-121. Let Pan Am 103 ukončilo 21. prosince 1988 odpálení přibližně 400 g Semtexu, který údajně pocházel z Československé republiky. Trhavina byla ukryta v kazetovém přehrávači v zavazadlovém prostoru.

Nálož byla odpálena ve výšce 9400 metrů nad zemí, což znamenalo okamžitou smrt pro pasažéry a posádku. Celkový počet obětí je 270, 259 na palubě a 11 na zemi.

V zavazadle s trhavinou bylo nalezeno oblečení, které vyšetřovatele dovedlo až k Al Midžráhímovi, zaměstnanci bezpečnostní služby libijských aerolinií. Midžráhí, jediný odsouzený, měl poslat neoznačené zavazadlo s trhavinou z Malty do Frankfurtu, kde bylo přeloženo na Pan Am 103.



Obrázek 2.3 Trosky letu Pan Am 103

#### 2.4.3.1 Motiv

Teorii proč k útoku došlo je několik. Oficiálně je aféra Lockerbie zařazena do série vzájemných střetů mezi Lybií a USA. Po potopení dvou libijských lodí americkou armádou následoval libijský atentát na bar, ve kterém byli zabiti tři američtí vojáci. Jako odvetu bombardovala americká armáda libijská města Tripolis a Benghází. Podle libijského ministra spravedlnosti nařídil útok na let Pan Am 103 Muammar Kaddáfí osobně, právě v odpověď na toto bombardování.



Lybie se k útoku v roce 2003 přiznala, to však neumlčelo řadu dalších teorií, které se do té doby vyskytly. Jedna z nich například tvrdí, že výbuch měl být naplánován v důsledku sestřelení iránského civilního letadla roku 1988 americkou lodí Vincennes.

#### 2.4.4 Sestřelení letu MH 17

Let Malaysia Airlines 17 byl pravidelný let ze Schipholu na Kuala Lumpur. 17. července 2014 tento let obsluhoval Boeing 777.

Ke zřícení letounu došlo nad oblastí východní Ukrajiny, poblíž vesnice Hrabove.

Na palubě zemřelo všech 283 pasažérů a 15 členů posádky.

##### 2.4.4.1 Motiv

Podle mezinárodních vyšetřovatelů došlo k zásahu střelou země-vzduch 9K37BUK.

Letoun se rozpadl ještě ve vzduchu, trosky dopadly na území o ploše 20 km<sup>2</sup>. Oblast dopadu byla pod kontrolou rebelů, kteří sice povolili vstup záchranným složkám, ale bránili vyšetřování.

Proč k sestřelu došlo není jasné. Vyšetřování potvrdilo, že střela byla vypálena z území ovládaném proruskými separatisty. Rusko ovšem vinu samozřejmě popírá a viní ze sestřelu ukrajinskou armádu.

Obvinění nebyli žádní ruští představitelé, jen tři Rusové a jeden Ukrajinec, kteří byli v době sestřelení letounu vysokými funkcionáři proruských separatistů.

Na obrázku níže jsou červeně zakroužkována poškození způsobená zásahem střelou země-vzduch.



Obrázek 2.4 Trosky letu MH 17

#### 2.4.5 Sestřelení Siberia Airlines 1812

Dne 4. října odstartoval letoun Tupolev Tu-154M ruské společnosti Sibir Airlines z Tel Avivu. Byl sestřelen ve výšce 11 000 metrů nad Černým mořem. Vyšetřovatelé mezi troskami objevili kusy rakety země-vzduch S-200.





Obrázek 2.5 Raketa země-vzduch S-200

#### 2.4.5.1 Motiv

Rusko původně vinu na sestřelení letounu připisovalo terorismu, později obvinilo ukrajinskou armádu.

Americká armáda spekovala, že se jednalo o střelu, která měla při vojenském cvičení zasáhnout dron, který byl ovšem dříve zničen jinou střelou. Tato S-200 tedy měla pokračovat v letu, dokud nezasáhla Tupolev.

Ukrajinská armáda nakonec přiznala, že to byla pravděpodobně její střela, která letoun zasáhla. Černé skříňky jsou spolu s trupem ponořeny v hloubce 1000 m, tedy příliš hluboko na vyzvednutí.

#### 2.4.6 Sestřelení letu PS752

8. ledna 2020 se krátce po vzletu z mezinárodního letiště u Teheránu zřítil 3,5 roku starý Boeing 737.

Letoun byl zcela zničen a na palubě zemřelo všech 167 cestujících i 9 členů posádky.

##### 2.4.6.1 Motiv

Letadlo bylo zasaženo dvěma střelami odpálenými s přibližně půlminutovým časovým odstupem.

Írán nejprve vinu odmítal a tvrdil, že došlo k požáru motoru, který způsobil pád letounu. Plnou vinu přijaly vzdušné síly až po tom, co se médií začaly šířit videozáznamy zásahu letounu.

Úmysl nebyl nikdy prokázán, k zásahu letounu ale došlo ve velmi napjaté politické situaci, způsobené tím, že íránská armáda zaútočila na americké letecké základny patnácti raketami.



*Obrázek 2.6 Trosky letu PS752*

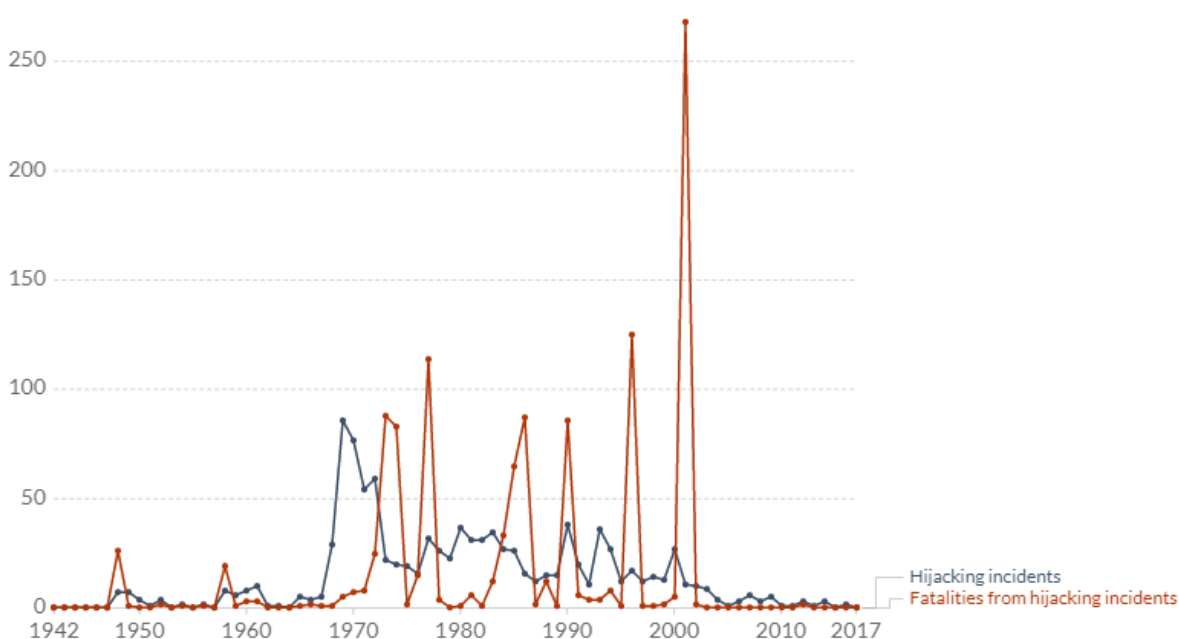
### 3 Teroristický útok z hlediska použitých prostředků

V této kapitole je rozebrán způsob teroristického útoku a použité poškozující prostředky. Teroristický útok lze obecně rozdělit podle použitých prostředků na vnitřní útok, tedy útok přímo na palubě a na útok vnější, tedy na letoun za letu nebo stojící na letišti.

#### 3.1 Útok na palubě

Tyto útoky byly běžné v minulosti. Dnes se je zvýšením bezpečnostních opatření při odbavení pasažérů podařilo téměř vymýtit, jak dokazuje časová závislost počtu únosů letadel, která je na obrázku 3.1 zobrazena modře. Tato čísla obsahují i bomby a sabotáže na palubě.

Global number of airliner hijackings and fatalities



Source: Aviation Safety Network (ASN)

OurWorldInData.org/terrorism/ • CC BY

Obrázek 3.1 Počet útoků na palubě a ztrát na životech v průběhu let [<https://ourworldindata.org/terrorism>]

Teroristé na palubu letounu pronesli střelné nebo bodné zbraně. Ty pak použili jako donucovací prostředky k ovládnutí letounu. Cílem tedy bylo převzít kontrolu, nikoli letoun poškodit.

Pokud by na palubě letounu došlo ke střelbě, není pravděpodobné, že by ruční střelné zbraně mohly konstrukci trupu vážně narušit. Určité nebezpečí může znamenat proražení trupu. Při vzniku explozivní dekomprese by mohlo dojít k poškození takového rozsahu, aby to ohrozilo bezpečnost konstrukce.

K útokům na palubě byly použity menší zbraně, které mohly při letištní kontrole ujít pozornosti, většinou kalibry do 9 mm.

Vzhledem k nízké pravděpodobnosti přímého poškození konstrukce, nejsou tyto zbraně zahrnuty mezi poškozující prostředky v následující kapitole.

Za účelem převzetí kontroly může být jako hrozba použita i výbušnina, není to ale příliš časté.

#### 3.2 Útok výbušninou

Jak bylo zmíněno dříve, je možné použít výbušninu jako donucovací prostředek k ovládnutí letounu. Mnohem častěji bývá ovšem výbušnina použita za účelem poškození letounu.

Míra poškození, mimo množství a sílu použité výbušniny, úzce souvisí s místem výbuchu. Pokud výbuch nenaruší primární konstrukci, nemusí být následky fatální. Nebezpečné je i poškození přetlakové části letounu. Při explozivní dekompresi vzniká celá řada zdravotních rizik, které mohou ovlivnit schopnost posádky s letounem bezpečně přistát.

Počet tohoto typu útoků byl také značně eliminován bezpečnostními opatřeními. Na letištích jsou psi speciálně vycvičeni pro odhalování výbušnin a omamných látek. Na palubu není dovoleno brát více než 1 litr tekutin, z toho každých 100 ml musí být individuálně baleno.

### 3.3 Útok zvnějšku

Útoky zvnějšku je možné dělit na útoky na zemi a za letu.

Pro útoky na zemi využívají teroristé střelné zbraně. Cílem je zabránit letounu ve vzletu. Vzhledem k nízké pravděpodobnosti poškození konstrukce střelnou zbraní, je cílem takového útoku hlavně posádka letounu.

Útok zvnějšku za letu má letoun zcela zničit nebo poškodit tak závažně, aby se stal neřiditelným. Představuje značné riziko, teroristé se nemusí dostat na palubu letounu.

Z toho důvodu je dnes útok z vnějšku považován za nejpravděpodobnější a zároveň za nejnebezpečnější. Bezpečnostní opatření na letištích jsou velmi přísná, naproti tomu není možné zaručit bezpečí letounu ve vzduchu. Trasa letu nemusí nutně vést přes území, které je považováno za nebezpečné. Protiletadlové systémy mohou být velmi malé a nebudit tak pozornost.

### 3.4 Poškozující prostředky

Prostředky použité k poškození letounu lze na základě předcházejícího dělení samotných teroristických útoků členit do dvou skupin, na prostředky, které mají letoun poškodit zevnitř a zvenčí.

#### 3.4.1 Prostředky pro poškození zevnitř

Tato kapitola je věnována výbušninám jako nejpravděpodobnějšímu prostředku k poškození letounu zevnitř.

Výbušninou rozumíme látku schopnou výbušné přeměny. Ke spuštění výbuchu, iniciaci, je nutné dodat potřebnou energii. Množství takové energie souvisí s citlivostí výbušniny. Energie může být dodána různými způsoby, například nárazem nebo plamenem.

Samotný výbuch je uvolnění velkého množství energie ve velmi krátkém čase. Pro hodnocení výkonu výbuchu používáme pojem detonační rychlost. Závisí na typu, jakosti a zpracování výbušniny a udává se v m/s.

Ničivý účinek je popisován brizancí, ta přímo úměrně souvisí s detonační rychlostí.

Kritické množství výbušniny popisuje kritický průměr. Pokud je průměr menší, ztráty převáží, reakce se šíří pomalu a účinek výbušniny je malý.

V anglosaských zemích se výbušniny dělí podle typu výbušné přeměny, u nás je běžnější dělení podle použití na střeliviny, traskaviny, trhaviny a pyrotechnické slože.

Traskaviny se pro útoky nehodí, jsou totiž velmi citlivé, teroristé tedy používají trhaviny. [5]

##### 3.4.1.1 Charakteristika C-4

Neznámější americká vojenská výbušnina, celým názvem Composition 4, byla vyvinuta roku 1954. Její hlavní složkou je hexogen ( $C_3H_6N_6O_6$ ), který tvoří 91 % objemu. Hexogen, nebo také RDX (z angl. Research Department Explosive), je krystalická látka, která se jako trhavina

používá velmi často, zejména pro svou chemickou stabilitu a nízkou citlivost na mechanické podněty, při zachování vysoké brizance. [10]

### 3.4.1.2 Charakteristika Semtex

Jedná se o víceúčelovou plastickou trhavinu. Účinnou složkou je pentrit.

Tato trhavinu byla vyvinuta v Československu v 50. letech 20. století.

Používá se nejčastěji při demolicích a pro vojenské účely.

Ve světě je název Semtex často používán jako synonymum pro plastickou trhavinu. Z toho důvodu bývá s terorismem spojován občas neoprávněně.



Obrázek 3.2 Semtex [explosia.cz]

### 3.4.2 Prostředky pro poškození z vnějšku

K boji proti letadlům se používají řízené rakety. Řízení je zajištěno aerodynamicky, tedy kormidly, nebo vektorováním tahu. Rakety jsou poháněny tuhým nebo kapalným palivem. Samotná raketa slouží pouze jako nosič k dopravení bojové hlavičky rakety k cíli.

Bojová hlavička se nachází v horní části rakety a obsahuje samotnou bojovou náplň. Hlavičky jsou děleny na tříštivé, trhavé, kumulativní a kombinované.

Pro poškození zvnějšku se dnes nejčastěji používají tříštivé bojové hlavičky raket země-vzduch. To zejména pro svůj ničivý účinek v důsledku rozpadu hlavičky na střepiny, které svou kinetickou energií působí na konstrukci letounu. Cíl navíc není nutné zasáhnout přímo, stačí když se bude nacházet v okruhu rozptylu střepin.

Velikost střepin je ovlivňována tvorbou koncentrátorů napětí.

Vzhledem k velkému množství typů raket země-vzduch, byly pro podrobnější charakteristiku vybrány rakety zmíněné v předcházející kapitole v souvislosti s konkrétními teroristickými útoky.

#### 3.4.2.1 Raytheon FIM-92 Stinger

Americký protiletadlový přenosný raketový systém země-vzduch je nebezpečný hlavně pro své malé rozměry a nenápadnost. Hmotnost systému je 14 kg a jeho dostřel 8 km.





Obrázek 3.3 FIM-92 Stinger [missiledefenseadvocacy.org]

#### 3.4.2.2 9K37 Buk

Samohybný protiletadlový systém středního doletu Buk byl vyvíjen v SSSR a následně v Rusku. Cílem jsou letouny a vrtulníky ale i řízené střely s plochou dráhou letu, řízené bomby, bezpilotní letouny a taktické střely.



Obrázek 3.4 9K37 BUK [Wikipedie]

#### 3.4.2.3 S-200

Systém S-200 je sověty vyvinutý protiletadlový raketový systém, určený k likvidaci prostředků vzdušného napadení. Tím se rozumí například balistické střely ale i taktické a strategické bombardéry nebo vrtulníky. Tento systém je možné použít i k napadení pozemních nebo námořních cílů.

#### 3.4.2.4 SPYDER

SPYDER je izraelský protivzdušný systém krátkého a středního doletu. Kombinuje infračervené a radarem naváděné řízené střely. Je určen pro záchyt nízko letících dronů, letounů, bezpilotních prostředků nebo i vrtulníků.

Najednou dokáže sledovat až 60 cílů. Ty se mohou pohybovat až v 15ti km vzdálenosti a ve výšce 9000 m.



*Obrázek 3.5 SPYDER [czdefence.cz]*

## 4 Letoun jako cíl teroristického útoku

Základním cílem teroristického útoku je, jak již bylo dříve uvedeno, letoun buď ovládnout nebo zničit. Letounu je velmi složité zařízení, obsahující nespočet citlivých prvků, jejichž poškození nebo přímo zničení vede s vysokou pravděpodobností k jeho zničení. Aby byla zdůrazněna významnost jednotlivých částí letounu, jejichž poškození vede ke zničení letounu jako celku, je v následující části provedena stručná analýza základních částí letounu s ohledem na možná poškození a jejich katastrofické důsledky na celý letoun.

### 4.1 Hlavní části letounu z hlediska funkce

Letadlo je velmi obecný pojem, pod kterým rozumíme jakýkoli alespoň částečně říditelný stroj, který je schopen letu. Letadla obecně dělíme nejčastěji do dvou kategorií, na letadla těžší nebo lehčí než vzduch.

Letouny patří do kategorie těžší než vzduch, k pohybu v atmosféře tedy využívají aerodynamické síly. Jedná se o taková letadla, která jsou alespoň částečně říditelná, schopná letu bez vlivu země a která mají v daném režimu letu pevné nosné plochy.

Letouny jsou tvořeny třemi základními částmi:

- drakem letounu
- pohonnou soustavou
- vybavením a výstrojí

Všechny tyto části tvoří základní konstrukci letounu. Kromě systému řízení a elektrické soustavy jsou všechny ostatní soustavy nezálohované. Znamená to, že jejich, byť malé poškození, může mít a většinou také má pro celý letoun tragické důsledky.

#### 4.1.1 Pohonná soustava

Pohonná soustava zajišťuje tažnou sílu, která je nezbytná pro vznik aerodynamických sil umožňujících let. Skládá se z velkého množství částí, kromě samotného motoru jsou to nádrže, soustavy chlazení a mazání, motorová lože, instalace, soustava řízení motoru atd.

Poškození motoru, případně i jiných částí pohonné soustavy vede většinou ke ztrátě tahu motoru, mohou vzniknout i vibrace nepříjemného rozsahu a značným nebezpečím je také požár. Správná funkce motorů je důležitá především při vzletu, kdy pilot nemá dostatečnou zásobu výšky pro případné nouzové manévry. Na druhou stranu poškození motoru ve větší výšce nemusí mít fatální následky. Za předpokladu, že nejsou poškozené žádné jiné části letounu, může doklouzat k jakékoli ploše vhodné k nouzovému přistání.

#### 4.1.2 Vybavení a výstroj

Do této části jsou mimo avioniku a mnohé další potřebné vybavení zahrnuty palubní soustavy, které zajišťují schopnost letadla bezpečně pokračovat v letu.

##### 4.1.2.1 Hydraulické soustavy

Hydraulická soustava mění mechanickou energii na hydraulickou, kterou dále přenáší a distribuuje. Mimo přenosu energie se podílí na regulaci teploty a mazání.

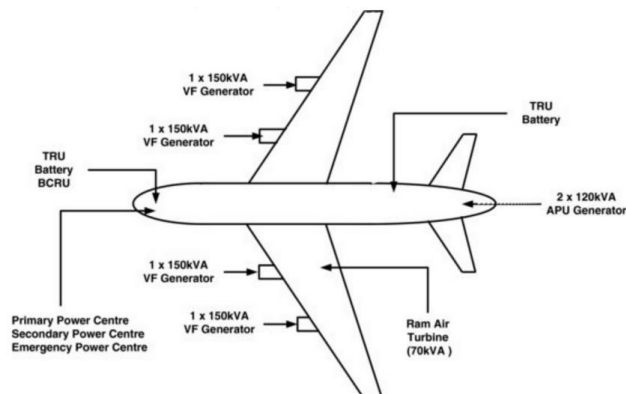
Její poškození znamená ve většině případů ztrátu tlaku a v souvislosti s tím omezení schopnosti ovládat a řídit letoun. Mohou být vyřazeny všechny části řízení, které ve svých kanálech obsahují hydraulické prvky jako jsou řídicí plochy, mechanizace křídla, vysouvání a zasouvání podvozku a mnohé další. Zvyšuje se samozřejmě také nebezpečí rozšíření požáru.



#### 4.1.2.2 Elektrické soustavy

Elektrické soustavy zásobují letoun energií. Záměrně vyřadit elektrickou soustavu je příliš složité a neefektivní. Takový útok by spíše odpovídal útoku na palubě letounu.

Pro elektrickou soustavu jsou kritické prvky generátory a akumulátory, pokud vysadí motory nebo dojde k poruše na hlavním zdroji, mají letouny k dispozici většinou záložní zdroj nebo nouzový zdroj v podobě palubních baterií. Takové uspořádání je znázorněno na obrázku 4.1.



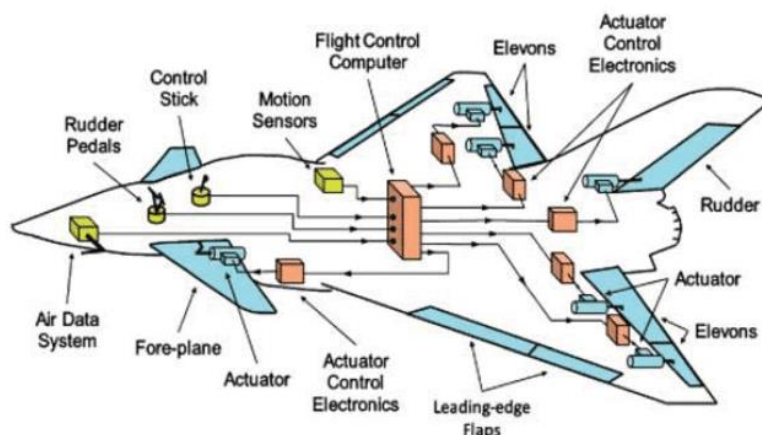
Obrázek 4.1 Komponenty elektrické soustavy A 380 [Civil Avionics Systém]

#### 4.1.2.3 Soustavy řízení

Soustavy řízení ovládají aerodynamická kormidla, pohonné jednotky, vrtule, brzdy a podvozek. Tyto soustavy jsou nezbytně důležité, proto jsou zálohované.

Zaútočit primárně na soustavy řízení by bylo stejně jako na jiné soustavy by nebylo efektivní, pokud by se nejednalo o sabotáž. Ovšem při útoku raketou nebo bombou může dojít k přerušení soustavy řízení a tím ke zničení letounu, i když jeho konstrukce nebyla poškozena fatálně.

Různé způsoby přenosu informace jsou na přerušení stejně náchylné. I při využití moderních systémů řízení musí stále existovat přímé spojení mezi pilotem a kormidly. Přerušení kabelů má stejné následky jako přerušení táhel. Na obrázku 4.2 je základní schéma systému řízení fly-by-wire.



Obrázek 4.2 Fly-by-wire [Researchgate.net]

#### 4.1.2.4 Palivové soustavy

Palivová soustava musí poskytovat nepřerušovanou dávku paliva všem pohonným a pomocným jednotkám. Musí být navržena tak, aby byla zajištěna nezávislost mezi nádržemi a systémy dodávky paliva. Samostatná porucha tedy nesmí přerušit dodávku paliva.

Při poruše konstrukce střepinami může ale dojít k porušení nádrže a ztrátě paliva.

Největším nebezpečím je ale možnost vzniku požáru nebo výbuchu.

#### 4.1.2.5 Pneumatické soustavy

Pneumatické systémy jsou na palubě dvojího druhu. Prvním druhem jsou systémy vybavení, jako je například klimatizace.

Poruchy těchto soustav bývají většinou méně významné. Význam se samozřejmě odvíjí od toho, k čemu daná soustava slouží.

Druhá skupina jsou silové soustavy, jako je například otevírání dveří nebo ovládání podvozku.

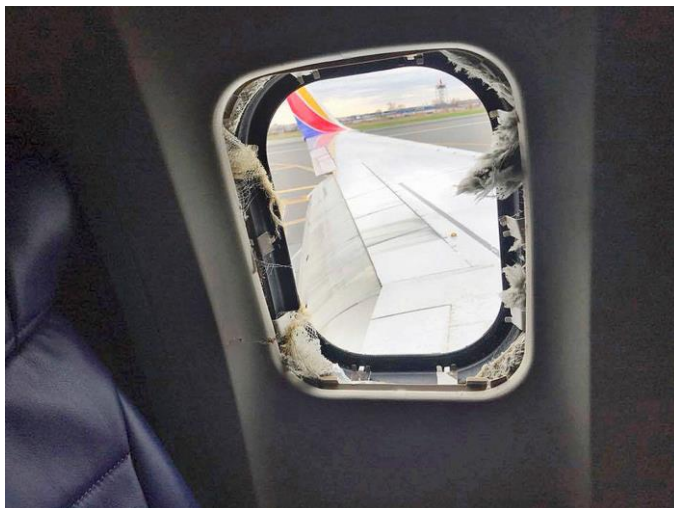
Klíčovější může z tohoto pohledu být například pohon některých agregátů.

#### 4.1.2.6 Přetlakování

Přetlakování snižuje negativní vliv poklesu parciálního tlaku kyslíku s rostoucí výškou. Zároveň ovšem vnáší do konstrukce velké zatížení. Je nebezpečné především z hlediska únavy, při narušení konstrukce ale může způsobit explozivní dekompresi.

Na poruchu soustavy přetlakování jsou posádky velmi dobře trénované. Po poklesu tlaku v kabině pilot nouzově sestoupá do bezpečnější výšky. Takové stavy jsou celkem časté, pokud se podaří poruchu opravit, letoun může dokonce pokračovat v letu.

Nehody jsou většinou naopak způsobené funkcí přetlakové soustavy. Na obrázku níže je explozivní dekomprese v 32 000 ft. Ta stála život cestující, která seděla u okýnka.



Obrázek 4.3 Explozivní dekomprese [foto Alan Levin]

#### 4.1.2.7 Ochrana před námrazou

Námraza má negativní dopad na letové vlastnosti, řízení, namáhání konstrukce a činnost pohonné jednotky. Systémy mají většinou preventivní charakter, některé jsou ovšem navrženy i k odstraňování námrazy. K ochraně před námrazou jsou používány čtyři základní principy: horkovzdušný, pneumatický, elektrický a chemický.

Poškození protinámrazových prvků v tomto případě většinou nehraje významnou roli i kdyby bylo většího rozsahu.

#### 4.1.2.8 Protipožární soustavy

Požár na palubě je obrovským bezpečnostním rizikem, už jen samotná přítomnost kouře může let vážně ohrozit. Největší riziko představuje požár pro letouny s přetlakovým trupem. Ochrana před požárem je dělena na pasivní a aktivní. Pasivní ochrana zahrnuje detekci požáru či kouře a informování posádky. Aktivní ochranou rozumíme hasící systémy letounu, pevné jsou pouze v určitých částech letounu, například v motorech nebo APU, v kabině jsou pak přenosná ruční hasící zařízení.

Poškození protipožární soustavy je obvykle spojeno s mnohem závažnějším poškozením, což je poškození motoru. Protipožární soustava má většinou za úkol požár uhasit a dát pilotovi časový prostor k dolétnutí na nejbližší letiště a přistání. Poškození protipožární soustavy tuto možnost záchranu poškozeného letounu významně ovlivňuje.

## 4.2 Drak letounu jako základní sledovaná část

Pro let je kritická celá řada součástí a systémů, které při selhání mohou způsobit katastrofu, pro účely této práce byl jako sledovaná část zvolen drak letounu.

Drak letounu se skládá z:

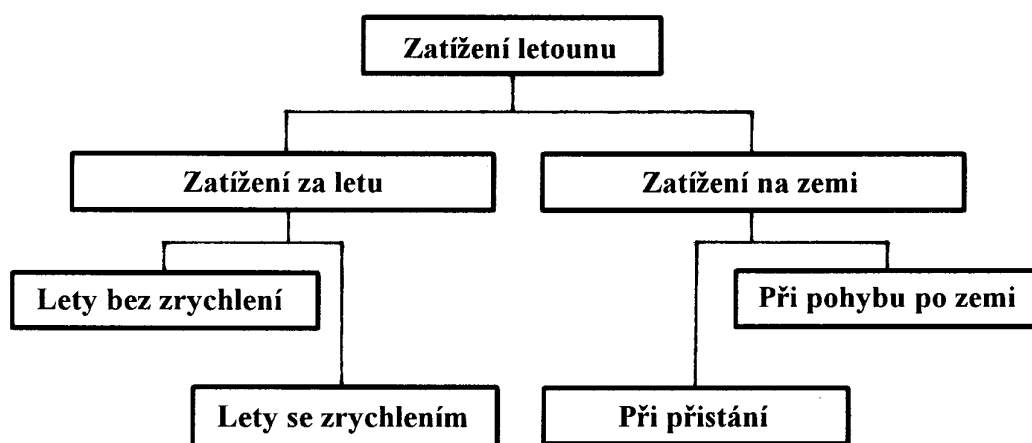
- Nosná soustava
- Ocasní plochy
- Trup
- Přistávací zařízení
- Systémy řízení [7]

Hodnocení kritičnosti těchto částí se v každé situaci liší. Obecně se dá říct, že čím menší prvky tím náchylnější jsou na poškození. Pokud střepina zasáhne trup, nehrozí takové nebezpečí jako při zásahu některé z řídicích ploch. Zásah může ovlivnit jak celkovou integritu prvku, tak i jeho případnou pohyblivost, což může mít ve výsledku fatální následky pro celý letoun.

## 4.3 Zatížení působící na letoun

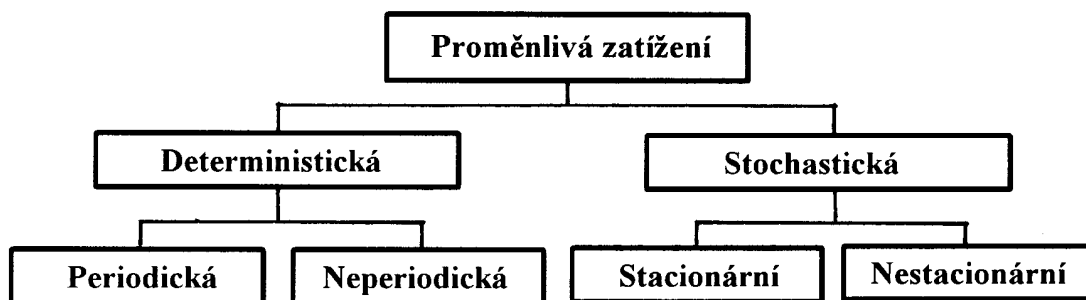
Po zásahu při teroristickém útoku, není-li letoun zničen, ale pokračuje třeba i s významným rozsahem poškození dál v letu, na konstrukci působí neustále řada zatížení, která mohou vést k velmi rychlému dosažení mezního stavu, a tedy k destrukci letadla. Tato zatížení je třeba brát v úvahu při všech analýzách, týkajících se rozsahu poškození letounu. Z toho důvodu se jeví jako důležitá součást alespoň základní orientace v zatíženích, která se mohou, především za letu, vyskytnout.

Zatížení působící na letoun je možné dělit z celé řady hledisek. Z hlediska časového průběhu jsou rozeznávána zatížení statická, kvazistatická, proměnlivá, ojedinělá a zatížení od vibrací. Dělení znázorněné na obrázku 4. představuje výchozí dělení pro statické výpočty leteckých konstrukcí. [9]



Obrázek 4.4 Základní klasifikace zatížení [9]

Pro dynamické a únavové výpočty leteckých konstrukcí se využívají zatížení proměnlivá, jejich dělení je na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5 Proměnlivá zatížení [9]

Z hlediska požadavků předpisů je uvažováno provozní a početní zatížení.

Provozní zatížení  $P_{pr}$  je maximální zatížení, kterému může být konstrukce v provozu vystavena. V předpisech je zakotveno obecnou definicí nebo číselnou hodnotou.

Početní zatížení  $P_{poc}$  je provozní zatížení upravené součinitelem bezpečnosti tak, aby zahrnovalo mimořádné situace jako pokles únosnosti konstrukce z výroby nebo způsobený provozem, či neočekávaně vysoké provozní zatížení.

$$P_{poc} = P_{pr} \cdot f$$

Velikost součinitele bezpečnosti závisí jak na daných předpisech, tak i na součásti, na kterou má být aplikován. Obecně platí, že na významnější a více namáhané součásti bývá použita vyšší hodnota. [9]

## 5 Typy leteckých konstrukcí trupu z hlediska konstrukčního řešení přenosu zatížení

V současnosti se ke konstrukci letadel zaujímá několik postojů. Každý z nich je většinou vhodný pouze pro určitou kategorii letadel. Jedná se o dvě základní skupiny, konstrukce příhradové a konstrukce obecně nazývané jako tenkostěnné. V následující části je pozornost zaměřena na výčet těchto konstrukcí a zejména na způsob přenosu jednotlivých složek zatížení.

K základním leteckým konstrukcím se řadí především:

- Příhradové konstrukce
- Nosníkové konstrukce
- Konstrukce typu nosníková poloskořepina
- Poloskořepinové konstrukce
- Skořepinové konstrukce

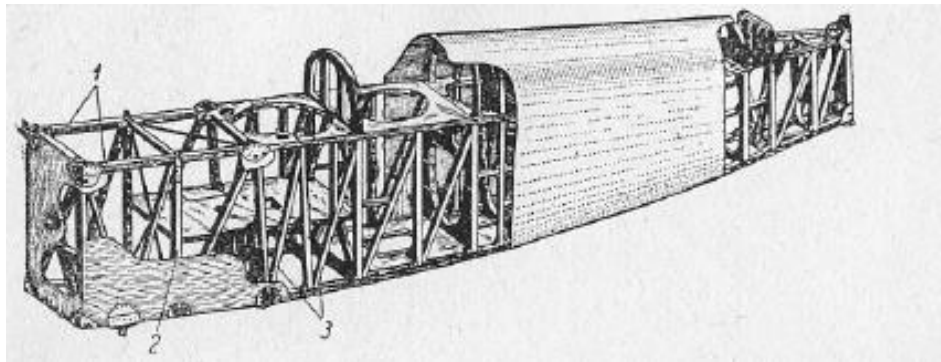
Volbou nosných prvků a jejich vzájemným uspořádáním je totiž možné ovlivnit způsob, jakým jsou v konstrukci zatížení přenášena. [9]

### 5.1 Příhradové konstrukce

Jedná se o prutovou soustavu spojenou ve styčnicích nýtováním nebo svařováním. Tato konstrukce je náročná na pevnostní výpočty a na technologii výroby. Nedodržení technologií výroby může vést například u svařovaných konstrukcí k nerovnoměrnému chladnutí a následnému vzniku vnitřních pnutí.

Příhradové konstrukce musí dodržovat pravidla prutových soustav. Zatížení tedy musí být přiváděno styčnicí a jednotlivé pruty musí být namáhané pouze tahem nebo tlakem, nikdy ne ohybem.

Příhradové konstrukce nejsou v porovnání s jinými výhodné ani hmotnostně. Z těchto důvodů dnes tyto konstrukce spíše ustupují, využívají se téměř výhradně u malých sportovních a zemědělských letounů. [9]



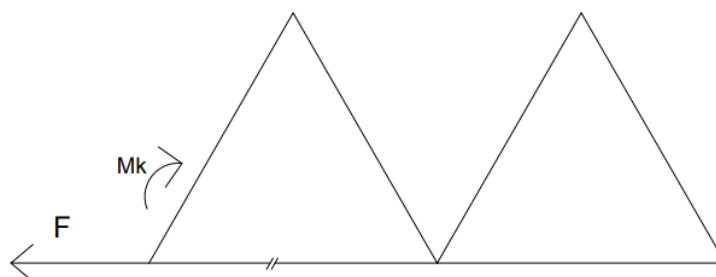
Obrázek 5.1 Příhradová konstrukce [Kan]

#### 5.1.1 Možné poškození a jeho důsledky

Potah v případě příhradové konstrukce trupu nepřenáší žádná zatížení, jeho poškození tudíž nemá na únosnost konstrukce vliv.

Naproti tomu samotná příhradová konstrukce předpokládá zatížení prutů pouze tahem a tlakem a zavádění zatížení do styčniců. V případě poškození nebo přerušení prutu přebírají ostatní i část zatížení, kterou už poškozený prut není schopen přenést. To může vést k přetížení dalších prutů a jejich deformaci tahem, nebo v případě tlaku k překročení meze vzpěrné stability a vybočení prutu.

V některých případech to může znamenat zatížení prutů ohybovým momentem, na který pruty nejsou navrhovány. Takový zjednodušený případ je načrtnut na obrázku níže.



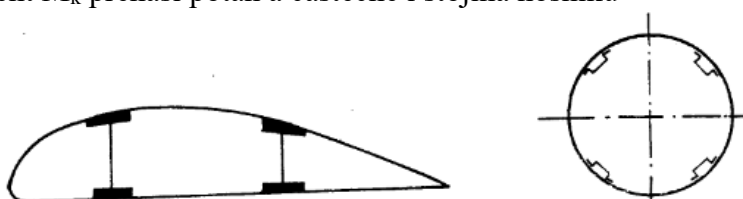
Obrázek 5.2 Poškození prutu v prutové konstrukci [zdroj vlastní]

## 5.2 Nosíkové konstrukce

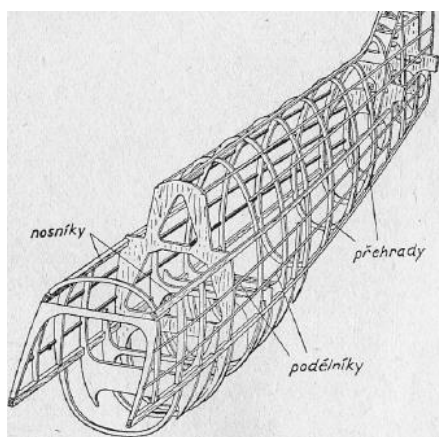
Nosíkové konstrukce se skládají ze tří stavebních prvků. Z podélných nosných prvků, nosníků, příčných prvků, u trupu přepážky a u křídel žebra, a z potahu.

Tři hlavní složky zatížení jsou pak přenášeny následovně:

- Ohybový moment  $M_o$  je přenášen pásnicemi nosníku
- Posouvající sílu  $T_y$  přenáší stojina nosníku
- Krouticí moment  $M_k$  přenáší potah a částečně i stojina nosníku



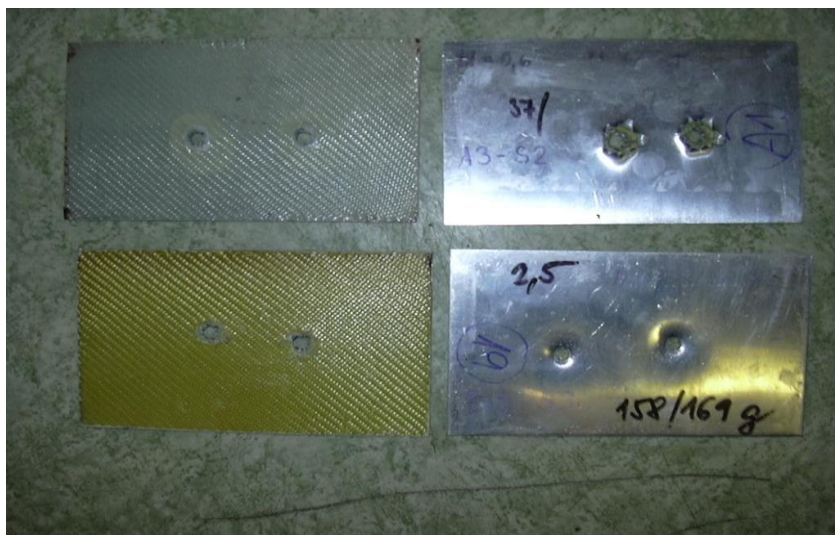
Obrázek 5.3 Nosíková konstrukce [9]



Obrázek 5.4 Konstrukce nosíkového trupu [Kan]

### 5.2.1 Možné poškození a jeho důsledky

V případě nosíkové konstrukce už není možné vyloučit potah vzhledem k tomu, že se podílí na přenosu krouticího momentu. V důsledku zatížení krouticím momentem vzniká v průřezu smykový tok. Ten zpravidla nedosahuje vysokých hodnot v porovnání s dalšími působícími zatíženími. Při průstřelu potahu ovšem dochází ke změně uzavřeného průřezu na otevřený. Na obrázku níže je vidět průstřel tenkého materiálu ráží 7,62 mm.



Obrázek 5.5 Průstřel tenkého materiálu [zdroj vedoucí práce]

Stojina přenáší posouvající sílu a podílí se i na přenosu kroutícího momentu. Stojina ovšem může obsahovat otvory, které mají celou řadu funkcí. Může se například jednat o montážní otvory, o zpřístupnění kritických částí konstrukce pro kontrolu, o odlehčení a v některých případech slouží ke kontrole maximálního napětí v konstrukci. Konstruktor navrhne stojinu tak, aby při růstu zatížení selhala jako první a ochránila tak jiné části konstrukce. Při průstřelu stojiny tedy dochází ke snižování účinného průřezu a tím tedy k poklesu maximálního napětí, které je schopná přenést.

Stojina navíc spolu s potahem vytváří uzavřenou dutinu i její porušení tedy vede ke změně uzavřeného průřezu na otevřený.

Pásnice nosníku mají větší tloušťku než stojiny i když plocha jejich průřezu se může po délce měnit. Zachycují ohybový moment, který za pomoci efektivní výšky, což je výška stojiny, převádějí na zatížení tahem a tlakem. Průstřel pásnice snižuje její účinný průřez. To může vést ke ztrátě vzpěrné stability v případě pásnice zatížené tlakem nebo k přetržení pásnice v případě tahového zatížení.

Na obrázku níže je průstřel tlustšího materiálu opět ráží 7,62 mm.



Obrázek 5.6 Průstřel tlustšího materiálu [zdroj vedoucí práce]



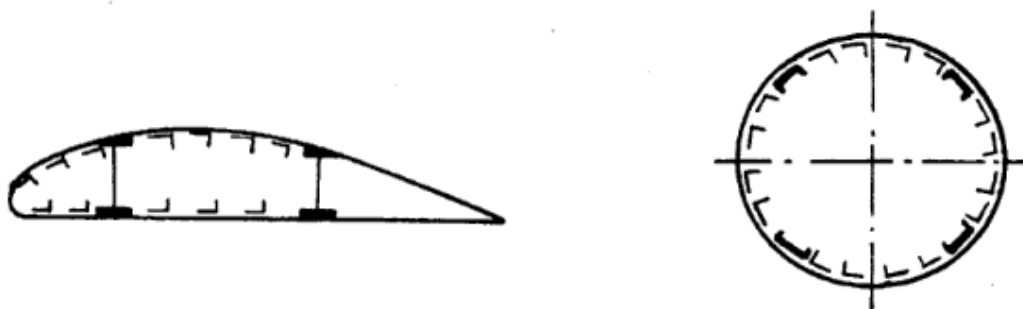
### 5.3 Konstrukce typu nosníková poloskořepina

Nosníková poloskořepina vychází z nosníkové konstrukce. Pro zvýšení pevnosti a tuhosti je konstrukce doplněna štíhlými podélnými výztuhami – podélníky. Podélníky přebírají část ohybového momentu od pásnic nosníku a zvyšují kritické napětí potahu, což pozitivně ovlivňuje jeho únosnost.

Oproti nosníkové konstrukci je díky podélníkům možné snížit průřez pásnic, což znamená pokles hmotnosti konstrukce. [9]

Tři hlavní složky napětí jsou přenášeny následovně:

- Ohybový moment  $M_o$  přenáší pásnice, podélníky a částečně i potah
- Posouvající síla  $T_y$  je zachycena stojinou nosníku
- Kroučící moment  $M_k$  přenáší potah a částečně i stojina nosníku



Obrázek 5.7 Nosníková poloskořepina [9]

#### 5.3.1 Možné poškození a jeho důsledky

Rozložení zatížení do jednotlivých konstrukčních prvků u nosníkové poloskořepiny je velmi podobné jako u nosníkové konstrukce. Jediná změna nastává při přenosu ohybového momentu, který se u poloskořepin dělí mezi pásnice, podélníky a potah.

Podélné výztuhy mají dvě základní funkce. Kromě přímého podílu na přenosu ohybového momentu dělí potah na menší části: Tím zvyšují kritické napětí potahu a ten tedy snáší vyšší zatížení. Pro efektivní činnost podélných výztuh je třeba zajistit, že budou nedělené a pevně spojené s potahem. Pokud z nějakého důvodu není možné vyrobít podélník z jednoho kusu, musí být spojen nerozebíratelně.

Podélníky jsou většinou velmi štíhlé členy. Střely větší ráže nebo střepiny by tedy mohly podélník nejen poškodit, ale dokonce úplně přerušit. Přerušená podélná výztuha není schopná plně přenášet ohybový moment.

Zatížení potahu i ohybovým momentem znamená, že potah už není namáhán rovnoměrně, ale v důsledku ohybového momentu dochází na jedné straně k namáhání tlakem a na protilehlé tahem. Pokud je potah porušen v oblasti namáhané tahem, sníží to jeho únosnost, průstřel slouží jako koncentrátor napětí a může iniciovat vznik trhlin. Porušení na tlakové straně může vést ke zvlnění potahu a ztrátě stability.

Na obrázku vlevo je poškození trupu v důsledku výbuchu tříštivé bojové hlavice. Poškození je menšího rozsahu, lze tedy předpokládat, že hlavice explodovala ve značné vzdálenosti. Vpravo je poškození tříštivou střelou ráže 20 mm.



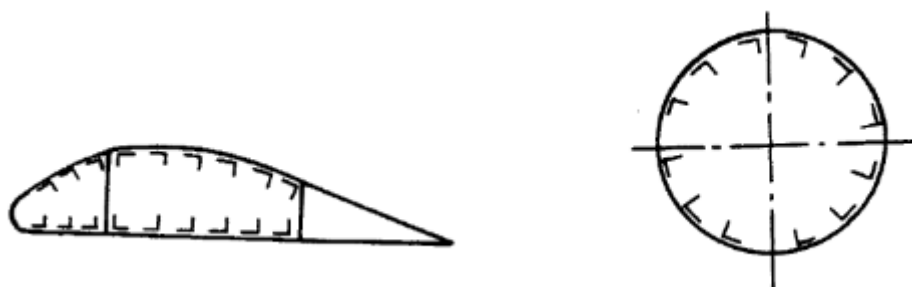


Obrázek 5.8 Poškození trupu [zdroj vedoucí práce]

## 5.4 Poloskořepinové konstrukce

Poloskořepinové konstrukce vychází z nosníkových poloskořepin. Pásnice jsou zcela nahrazeny podélníky, které přebírají přenos ohybového momentu. Výsledkem této úpravy je další snížení hmotnosti konstrukce.

Tři hlavní složky napětí jsou přenášeny velmi podobně jako u nosníkové poloskořepiny, jen na přenosu ohybového momentu se podílí potah a podélné výztuhy. [9]



Obrázek 5.9 Poloskořepinová konstrukce [9]

Poloskořepinové konstrukce jsou nejrozšířenějším typem, zejména u velkých dopravních letadel.

### 5.4.1 Možné poškození a jeho důsledky

Poškození poloskořepinové konstrukce má vzhledem k vzájemným konstrukčním podobnostem obdobný dopad jako u nosníkové poloskořepiny.

Při útoku výbušninou na palubě letounu dojde k poškození potahu a podélných výztuh. Vzhledem k charakteru poškození, které při výbuchu vzniká lze očekávat, že dojde k poškození obou prvků současně, a navíc ve značném rozsahu.

Při zásahu střepinami vzniká bodové poškození, které může vést ke snížení únosnosti v závislosti na rozsahu. Pokud dojde ke ztrátě stability potahu, přenáší se zatížení na výztuhy a hrozí jejich další poškozování ve smyslu ztráty stability větší části vyztuženého potahu.

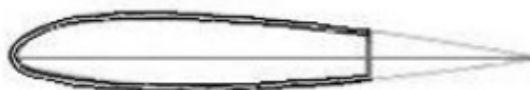
Při poškození jedné nebo více podélných výztuh se zvětšuje pole potahu. To znamená pokles jeho kritického zatížení a tím i únosnosti. To může vést k další eskalaci poškození.



Obrázek 5.10 Poškození letounu B-17 [warhistoryonline.com]

## 5.5 Skořepinové konstrukce

Skořepinové konstrukce přenášejí veškerá zatížení působící na konstrukci celým průřezem. Praktická realizace těchto teoreticky velmi jednoduchých konstrukcí se neosvědčila. Používají se pro menší části letounu jako jsou kormidla nebo palivové nádrže.



Obrázek 5.11 Skořepinová konstrukce [Slavetin.cz]

### 5.5.1 Možné poškození a jeho důsledky

Ve skořepinách mohou vznikat dva stavy napjatosti.

U membránového stavu napjatosti není uvažován vliv ohybových momentů. Uplatňují se zejména normálové a částečně posouvající síly. Ohybové momenty jsou významné pro momentový stav napjatosti. Ten nastává vlivem výrobních nebo materiálových nedokonalostí či zaváděním osamělých sil a momentů.

Membránová tuhost je mnohem větší než ohybová.

Při narušení celistvosti skořepiny průstřelem může dojít k přerozdělení části napjatosti z membránového stavu na momentový. Tím se změní určující mezní stav a dochází ke ztrátě stability konstrukce.

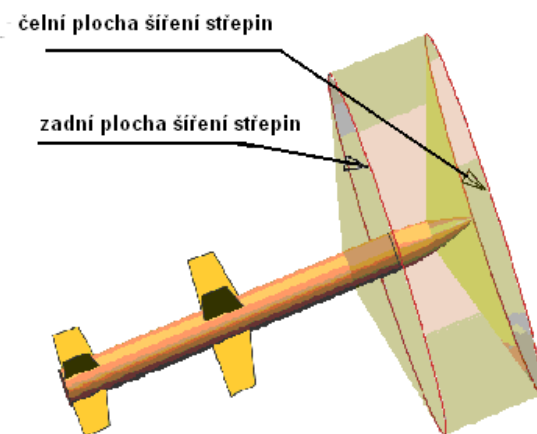
Vzhledem k nízkému využití skořepinových konstrukcí v letectví je ztráta stability na obrázku níže demonstrována na válcovém zásobníku.



*Obrázek 5.12 Ztráta stability skořepinové konstrukce*

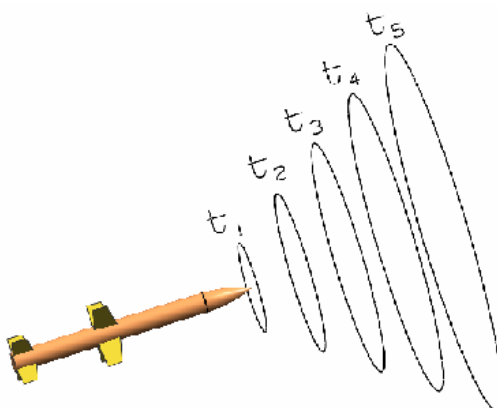
## 6 Stanovení rozsahu poškození v důsledku zásahu řízenou střelou s tříštivou hlavicí

Různé tříštivé bojové hlavice jsou samozřejmě konstruovány různými způsoby. Samotný rozptyl střepin, a tím i ničivý účinek na letoun, má podobný charakter nezávislý na typu nebo výrobci tříštivé hlavice. Na základě toho je možné stanovit obecně platný odhad vzniklého poškození. Na obrázku 6.1 je znázorněna oblast šíření střepin.



Obrázek 6.1 Šíření střepin po explozi [8]

Na obrázku 6.2 je znázorněno šíření střepin v čase. Rozptyl střepin se zvyšuje s rostoucí vzdáleností od místa výbuchu.



Obrázek 6.2 Šíření střepin v čase [8]

Stanovením rozsahu poškození se v tomto případě rozumí určení souvislého otvoru v trupu.

Vzhledem k účinkům tříštivé hlavice je nutné, aby k výbuchu došlo v dostatečné blízkosti letounu. Právě blízký výbuch má to tiž potenciál vytvořit v trupu dostatečně velký spojitý otvor na to, aby došlo k fatálnímu poškození konstrukce.

Naopak pokud dojde k výbuchu ve větší vzdálenosti, vznikne v trupu s největší pravděpodobností jen velké množství malých otvorů. Ty mohou být nebezpečné pro cestující a posádku letadla, mohou dokonce narušit některé primární systémy letounu, ale není pravděpodobné, že by mohly přímo vézt ke ztrátě únosnosti konstrukce.

Stanovení rozsahu poškození konstrukce tříštivou hlavicí v této práci je vzhledem k velkému počtu zjednodušení přibližný odhad. Není možné předem předpovědět, jak velké poškození výbuch hlavice způsobí. Poškození je závislé na množství faktorů, které plynou až z konkrétní

situace jako je nejen vzájemná poloha hlavice a letounu, ale i vzájemné natočení, nebo dokonce atmosférické podmínky.

V této kapitole jsou použity vzorce z literatury [8].

## 6.1 Vstupní hodnoty

Pro stanovení rozsahu poškození byly uvažovány dva základní předpoklady. Trajektorie pohybu řízené střely a letounu jsou v okamžiku výbuchu hlavice rovnoběžné a šíření střepin je rovnoměrné.

Volené vstupní hodnoty pro stanovení rozsahu poškození tedy jsou:

- celkový počet střepin **P**
- počet střepin šířících se ve vertikální rovině **O**
- počet střepin šířících se v horizontální rovině **t**
- výchozí šířka pole **h<sub>0</sub>**, ta odpovídá délce bojové hlavice
- úhel šíření střepin **α**

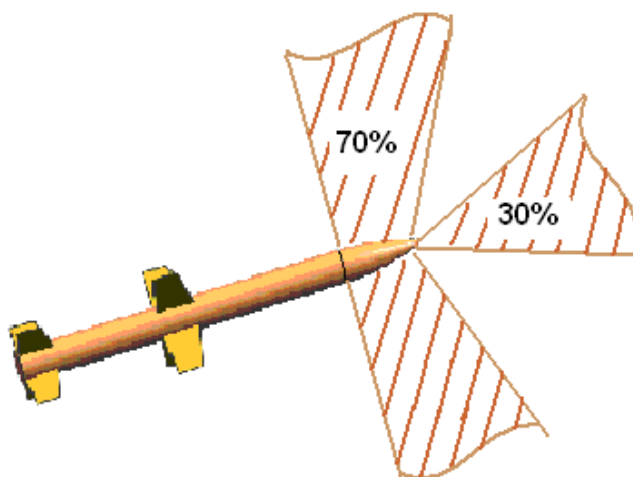
a to tak, že mezi celkovým počtu střepin a počtu střepin ve vertikální a horizontální rovině je následující vztah:

$$P = O \cdot t + 30 \%$$

Přičemž počty střepin musí přirozeně být celá čísla.

## 6.2 Model šíření střepin

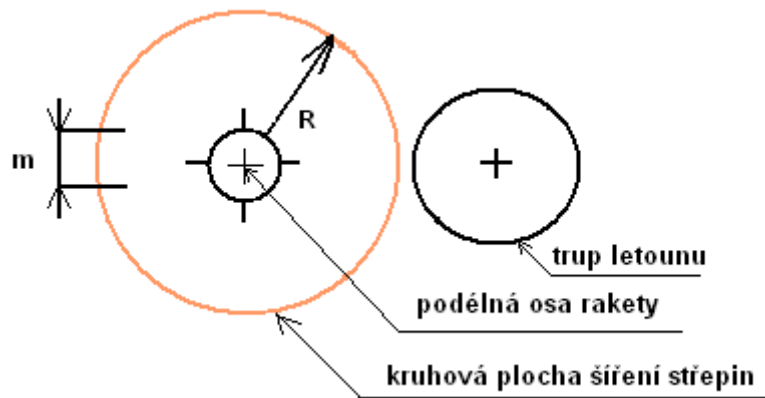
Vzhledem k tvaru hlavice bylo předpokládáno, že 30 % střepin je vrženo ve směru letu rakety, zbylých 70 % do stran. Zároveň platí výše zmíněný předpoklad, že rozptyl roste spolu se vzdáleností od místa výbuchu, jak je znázorněno na následujícím obrázku.



Obrázek 6.3 Model šíření střepin [8]

## 6.3 Výpočet vzdálenosti mezi střepinami po obvodu ve vertikální rovině m

Pro tento bod platí předpoklad šíření střepin po válcové ploše. Podle obrázku níže lze snadno odvodit vzorec pro vzdálenost mezi střepinami.



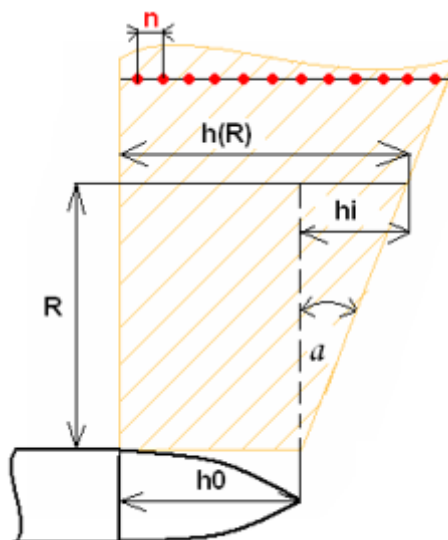
Obrázek 6.4 Vzdálenost mezi střepinami po obvodu [8]

Platí tedy:

$$m = \frac{2\pi R}{O}$$

#### 6.4 Vzdálenost mezi střepinami v horizontálním směru n

Určení vzdálenosti mezi střepinami v horizontálním směru vychází z modelu šíření na obrázku 6.3. Vzhledem k předpokladu rovnoběžných trajektorií jsou uvažovány jen střepiny šířící se do stran směrem k letounu.



Obrázek 6.5 Stanovení horizontální vzdálenosti mezi střepinami [8]

Z geometrie platí:

$$h(R) = h_0 + h_i$$

$$h_i = R \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

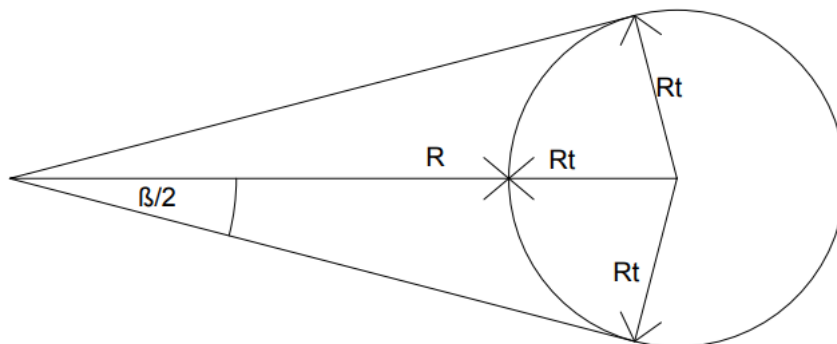
$$n = \frac{h(R)}{t-1} = \frac{h_0 + R \cdot \operatorname{tg} \alpha}{t-1}$$

kde  $h_i$  je přírůstek výchozí šířky pole způsobený rozptylem a  $h(R)$  je celková šířka pole.

## 6.5 Stanovení úhlu oblasti šíření střepin, kdy dochází k zásahu trupu $\beta$

Velikost úhlu  $\beta$  závisí na poloměru trupu  $R_t$  a vzdálenosti místa výbuchu hlavice od letounu.

Zásah je uvažován až do takového úhlu rozptylu, kdy se trajektorie střepiny stává pro trup tečnou, čímž vzniká pravoúhlý trojúhelník.



Obrázek 6.6 Maximální úhel rozptylu střepin, kdy dochází k zásahu trupu [zdroj vlastní]

Z obrázku výše je pak odvozeno:

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{R_t}{R + R_t}$$

## 6.6 Počet střepin $n_\beta$ v úhlu $\beta$

Tímto výpočtem je eliminován počet střepin ve vertikální rovině, které letoun nezasáhnou. Pro výpočet je zaváděn poměr úhlů  $r$ , kdy znalost úhlu  $\beta$  za předpokladu rovnoměrného rozložení střepin po obvodu, přímo určuje počet střepin v daném výseku celkové oblasti šíření.



Obrázek 6.7 Výseč úhlu  $\beta$  v celkové oblasti šíření střepin [8]

Poměr úhlů:

$$r = \frac{\beta}{360}$$

Pro počet střepin pak platí:

$$n_\beta = O \cdot r$$

## 6.7 Určení velikosti střepiny $S_s$

Velikost střepin je do jisté míry možné ovlivnit například rýhováním nebo vnitřním pnutím, ale není možné ji přesně určit. Rýhováním jsou vytvářeny koncentrátory napětí, které v okamžiku výbuchu nasměrují vzniklé zatížení.

Velikost střepiny je možné určit výpočtem například z průměrné hmotnosti a tloušťky střepiny. Nebo vyhledáním průměrné hodnoty.

## 6.8 Velikost poškození $S_p$

Velikost poškození je souvislý otvor, který v konstrukci způsobí jedna střepina. Nebere v potaz případné vzniklé plastické deformace či jinak ovlivněné oblasti.

V literatuře [8] bylo numericky vypočteno a následně ověřeno experimentem, že výsledné poškození při uvažování přímého zásahu přibližně odpovídá velikosti střepiny.

Velikost poškození samozřejmě opět závisí na množství faktorů. Například měkké materiály budou pohlcovat část kinetické energie od střepiny a tím bude i vzniklé poškození větší než u stejné situace s tvrdším materiálem. Dural, který je dále v této práci uvažovaný jako materiál zkoumané části konstrukce se řadí spíše k měkčím materiálům.

Dalším faktorem je úhel zásahu. V případě zasažení trupu dopadne jen velmi málo střepin přímo. Zásah pod úhlem způsobí větší poškození.

Do výpočtu vzniklého poškození tedy vstupuje plocha střepiny  $S_s$  a pak zpřesňující koeficient  $k$ , který obsahuje odhadnutý nárůst poškození vlivem tvrdosti materiálu, úhlem zásahu a další faktory.

$$S_p = kS_s$$

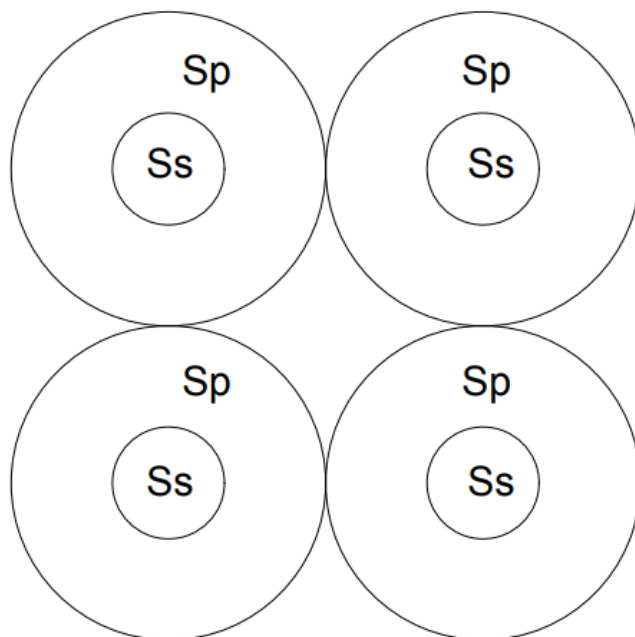
## 6.9 Stanovení největšího možného poškození $S$

Největší možné poškození je spojitý otvor, který by po zásahu vznikl v trupu letounu, kdyby se všechna poškození propojila. Je na něm nejlépe vidět, jak jednotlivé parametry popsané v předcházejících kapitolách ovlivňují výsledné poškození.

Například pokud bude uvažováno velkého množství malých střepin pocházejících z hlavičky, která vybuchla ve větší vzdálenosti, vznikne v trupu množství malých otvorů. Ty mohou poškodit životně důležité systémy letounu nebo v kombinaci s explozivní dekompresí vézt k přímému zničení, ale samy o sobě nemusí způsobit zhroucení konstrukce.

Dále má i velmi důležitý dopad koeficient  $k$  z předchozí kapitoly. Ve velmi měkkém materiálu by velikost tohoto koeficientu mohla být tak vysoká, že by vzniklá poškození překonala vzdálenost mezi jednotlivými střepinami, čímž by vznikl spojitý otvor. Tato situace je znázorněna na obrázku níže.





Obrázek 6.8 Vznik spojitého otvoru ve velmi měkkém materiálu [zdroj vlastní]

Pro stanovení poškození je nutné určit celkový počet střepin  $Z$  v prostoru, které letoun zasáhnou. Ten je získán vynásobením počtu střepin ve vertikální rovině  $n_{\beta}$  z kapitoly 6.6 a polovinou počtu střepin v horizontální rovině.

$$Z = n_{\beta} \cdot \frac{1}{2} t$$

Pokud je tento počet střepin vynásoben plochou poškození, je získáno maximální možné spojitě poškození.

$$S = Z \cdot S_p$$

## 7 Výpočet rozsahu poškození konstrukce

V této kapitole je postup z předchozí kapitoly aplikován na zvolený ilustrační případ zasažení letounu tříštivou hlavicí.

### 7.1 Vstupní hodnoty

Bylo zvoleno:

Celkový počet střepin	P	1500ks
Počet střepin šířících se do stran	$p = 1500 - \left( \frac{30}{100} \times 1500 \right)$	1050 ks
Počet střepin šířících se horizontálně	t	30 ks
Počet střepin šířících se vertikálně	$p = O \times t \Rightarrow O = \frac{p}{t} = \frac{1050}{30}$	35 ks
Výchozí šířka pole	$h_0$	0,8 m
Úhel šíření střepin	$\alpha$	12°
Vzdálenost výbuchu od trupu letounu	R	0,5 m
Poloměr trupu zasaženého letounu	$R_t$	1,87 m

### 7.2 Model šíření střepin

Byl použit model šíření střepin uveden v kapitole 6.2.

### 7.3 vzdálenost mezi střepinami po obvodu ve vertikální rovině m

$$m = \frac{2\pi R}{O} = \frac{2\pi \cdot 0,5}{35} = 89,8 \text{ mm}$$

### 7.4 vzdálenost mezi střepinami v horizontálním směru n

$$n = \frac{h(R)}{t-1} = \frac{h_0 + R \cdot tg\alpha}{t-1} = \frac{0,8 + 0,5 \cdot tg 12^\circ}{30-1} = 31,3 \text{ mm}$$

### 7.5 Úhel oblasti šíření střepin, kdy dochází k zásahu trupu

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{R_t}{R + R_t} = \frac{1,87}{0,5 + 1,87} = 0,79 \rightarrow \beta = 104^\circ 11'$$

### 7.6 Počet střepin v úhlu $\beta$

$$r = \frac{\beta}{360} = \frac{104^\circ 11'}{360} = 0,29$$

$$n_\beta = O \cdot r = 35 \cdot 0,29 = 10 \text{ ks}$$

### 7.7 Velikost střepiny $S_s$

Velikost střepiny nebyla v tomto případě určena výpočtem.

Literatura [1] uvádí rozsah velikosti střepin 5-50 mm, pro výpočet byla vzhledem k vysokému počtu střepin zvolena nižší než střední hodnota.

$$S_s = 20 \text{ mm}$$

### 7.8 Velikost poškození $S_p$

$$S_p = kS_s = 1,2 \cdot 20 = 24 \text{ mm}$$

### 7.9 Stanovení největšího možného poškození $S$

$$Z = n_\beta \cdot \frac{1}{2} t = 10 \cdot \frac{1}{2} 30 = 150 \text{ ks}$$

$$S = Z \cdot S_p = 150 \cdot 24 = 3600 \text{ mm}^2$$

## 8 Kritické zatížení a únosnost

Základním konstrukčním prvkem poloskořepinové konstrukce je vyztužený panel složený z potahu a podélných a příčných výztuh. Tato konstrukce bývá v letadlech použita většinou v ocasní části trupu.

Po překročení kritického napětí potahového pole roste napětí především v podélných výztuhách a v určité části potahového pole, který je pevně spojen s výztuhou.

V této kapitole jsou popsány výpočty únosnosti poloskořepinové konstrukce v závislosti na charakteru zatížení podle literatury [5]

### 8.1 Únosnost panelu v tlaku

Je uvažován úsek poloskořepinové konstrukce, kdy platí, že kritické napětí ve výztuze je větší než kritické napětí potahu. Při překročení kritického napětí potahu přenáší konstrukce zatížení podélnými výztuhami spolu s účinnou šířkou potahu.

Při prvním kritickém napětí tedy dojde k vybočení potahu.

První kritická síla je dána vzorcem:

$$F_{KR}^I = \sum_{i=1}^{n_v} \sigma_{KRP} \cdot A_{vi} + \sum_{i=1}^{n_v-1} \sigma_{KRP} \cdot b_i t_p$$

kde  $\sigma_{KRP}$  je kritické napětí potahu,

$A_{vi}$  je plocha průřezu podélných výztuh,

$n_v$  počet výztuh,

$b_i$  vzdálenost výztuh a

$t_p$  je tloušťka potahu.

Po ztrátě stability potahu přenáší tlakové zatížení podélné výztuhy spolu s efektivní šířkou potahu až do doby, kdy zatížení překročí kritické napětí výztuh. Tento mezní stav je dán druhou kritickou silou dle vzorce:

$$F_{KR}^{II} = \sum_{i=1}^{n_v} \sigma_{KRV} \cdot A_{vi} + \sum_{i=1}^{n_v-1} \sigma_{KRP} \cdot b_{\bar{e}i} t_p$$

kde  $\sigma_{KRV}$  je kritické napětí výztuh,

$b_{\bar{e}i}$  je efektivní šířka rovného potahu. Pro zakřivený panel je místo této hodnoty dosazena hodnota efektivní šířky zakřiveného panelu.

### 8.2 Únosnost poloskořepinové konstrukce v krutu

Kritické zatížení je dáno kritickým napětím zakřiveného pole potahu.

$$M_{k,KR} = 2 \cdot A_{1s} t \tau_{KR}$$

Únosnost poloskořepinové konstrukce je dána poruchou stojin, potahu podélných nebo příčných výztuh.

### 8.3 Stanovení únosnosti poloskořepinové konstrukce v ohybu

Poloskořepinové konstrukce jsou odvozené od nosníkových poloskořepin, výpočet únosnosti tedy do značné míry vychází právě z výpočtu nosníkových poloskořepin.

Především je nutné rozlišovat dvojí kritická zatížení.

První kritické zatížení nastane v momentě ztráty stability potahu podle rovnice:

$$M_{OKRI} = W_I \sigma_{KRp}$$

kde  $W_I$  je modul průřezu určen pro tlakovou stranu celého příčného průřezu a  $\sigma_{KRp}$  je kritické napětí potahu.

Druhé kritické zatížení nastává při ztrátě stability vybočením tlačené výztuhy s účinnou šířkou potahu podle rovnice:

$$M_{OKRII} = W_{II} \sigma_{KRv}$$

kde  $W_{II}$  je modul průřezu určen pro tlakovou stranu účinného příčného průřezu a  $\sigma_{KRv}$  je kritické napětí podélné výztuhy.

Po zvlnění potahu na tlačené straně se potah na přenosu napětí podílí pouze účinnými šířkami. Z toho důvodu je na tahové straně vhodné tloušťku potahu redukovat na hodnotu 60-80 %. Touto úpravou je bráno v potaz výrobní pnutí a oslabení nýtovými otvory.

#### **8.4 Složená namáhání**

Složené namáhání vzniká při působení více komponent vnějšího zatížení.

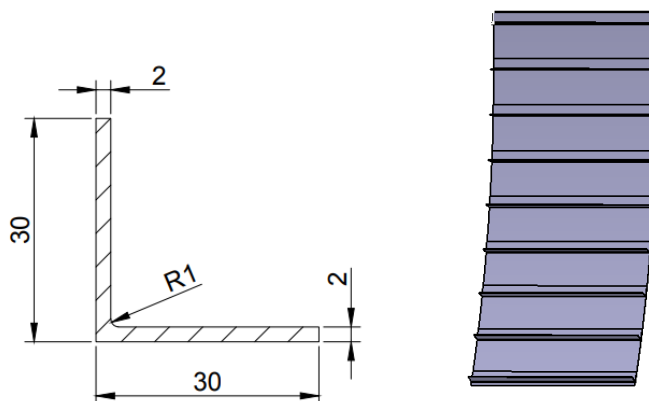
Běžné metody nelze použít v případech, kdy je uvažována plastická deformace, protože v takovém případě se jednotlivé složky mohou projevit různými způsoby.

Pro některé jednodušší součásti jsou sestrojeny diagramy pro různé kombinace vnějšího zatížení u složitějších se používá Metoda konečných prvků.

## 9 Výpočet kritické síly u panelu zatíženého tlakem

### 9.1 Vstupní hodnoty

Poloměr křivosti potahu	$R_p$	1880 mm
Tloušťka potahu	$t_p$	0,04 inch = 1,02 mm
Šířka panelu	$B$	1000 mm
Délka panelu	$A$	450 mm
Počet podélníků	$n_v$	9 ks
Plocha výztuhy	$A_v$	120 mm



Obrázek 9.1 Geometrie podélné výztuhy [zdroj vlastní]

### 9.2 Místní ztráta stability

Kritické napětí výztuhy

$$\sigma_{KRV} = 140 \text{ MPa}$$

Šířka potahového pole

$$b = \frac{B}{n_v - 1} = \frac{1000}{9 - 1} = 125 \text{ mm}$$

Kritické napětí potahového pole mezi podélníky:

$$\sigma_{(KR)} = 3,6E \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 3,6 \cdot 72000 \cdot \left(\frac{1,02}{125}\right)^2 = 17,26 \text{ MPa}$$

Potah ztrácí stabilitu, s podélnými výztuhami pracuje jen účinná část.

Vliv zakřivení potahu:

$$\Delta\sigma_{\hat{k}} = 0,3E \left(\frac{t}{R_p}\right) = 0,3 \cdot 72000 \cdot \left(\frac{1,02}{1880}\right) = 11,72 \text{ MPa}$$

Účinné šířce se věnuje množství autorů. Podle Kármána je pro dural možné brát přibližně

$$b_e = (30 - 40)t \rightarrow b_e = 35 \text{ mm [5]}$$

Redukční součinitel je pak roven:

$$\varphi = \frac{b_e}{b} = 0,28$$

Mezní zatížení na panel:

$$N_m = \sigma_{kr}(A_v \cdot n_v + \varphi Bt) = 140(120 \cdot 9 + 0,28 \cdot 1000 \cdot 1,02)$$

$$N_m = 191,2 \text{ kN}$$

Únosnost potahu

$$N_{pot} = (1 - \varphi)Bt\sigma_{KR} = (1 - 0,28) \cdot 1000 \cdot 1,02 \cdot 28,97$$

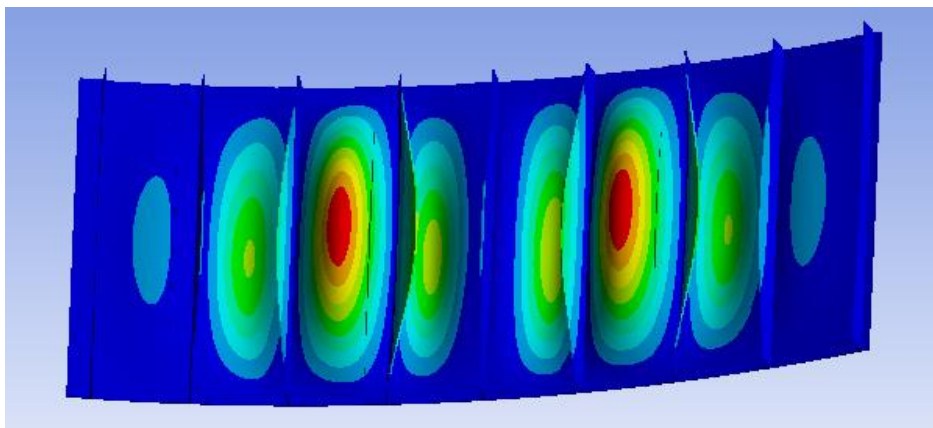
$$N_{pot} = 21,3 \text{ kN}$$

Celková únosnost

$$N_c = N_m + N_{pot} = 212,5 \text{ kN}$$

Tento výsledek udává ztrátu stability potahu, což není celková ztráta stability konstrukce. Je ale důležitý pro další kapitoly, ve kterých je sledována právě první kritická síla.

Na obrázku níže je první tvar zborcení potahu této konstrukce.



Obrázek 9.2 Tvar zborcení [zdroj vlastní]

## 10 Tvorba MKP modelu

Všechny potřebné modely byly vytvořeny v programu CATIA V5 a následně importovány do programu Ansys Workbench.

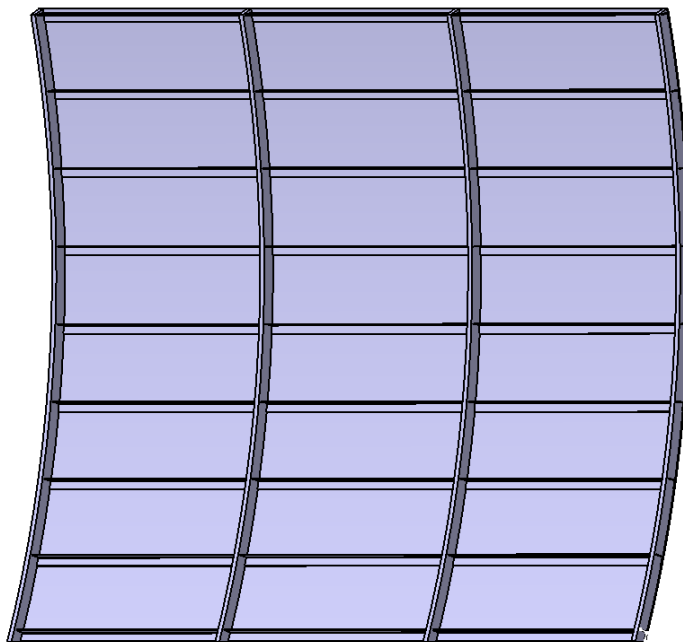
### 10.1 Geometrie

Pro potah byl jako předloha využit trup letounu Boeing 737, průměr trupu je 3760 mm. Parametry modelu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1 Parametry modelu

Poloměr křivosti potahu	$R_p$	1880 mm
Tloušťka potahu	$t_p$	0,04 inch = 1,02 mm
Šířka panelu	B	1000 mm
Délka panelu	A	1500 mm
Počet podélníků	$n_v$	9 ks

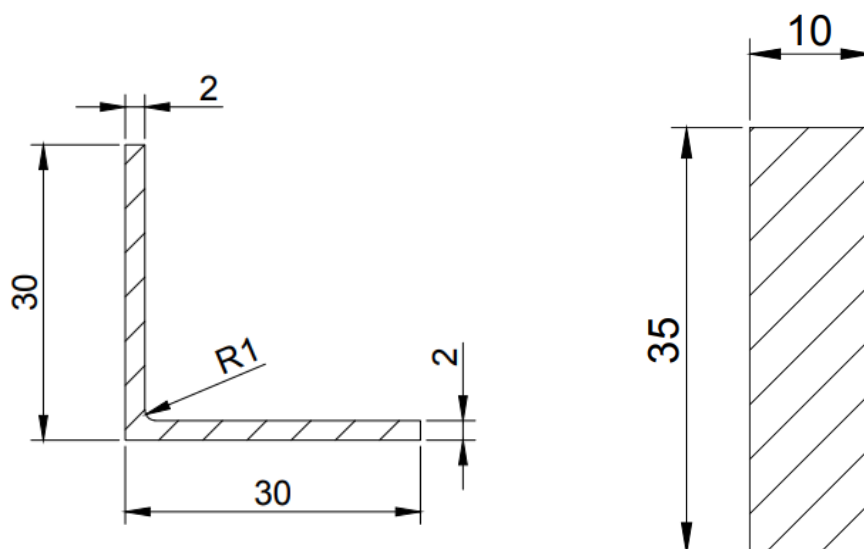
V programu CATIA V5 byl sestaven model panelu znázorněný na obrázku níže. Bylo zvoleno devět podélných a čtyři příčné výztuhy, které jsou pro větší stabilitu výsledku umístěny k okraji panelu.



Obrázek 10.1 Model panelu [zdroj vlastní]

Pro podélné výztuhy byl zvolen L-profil, jeho parametry jsou na následujícím obrázku vlevo. Příčné výztuhy mají obdélníkový průřez podle obrázku vpravo.

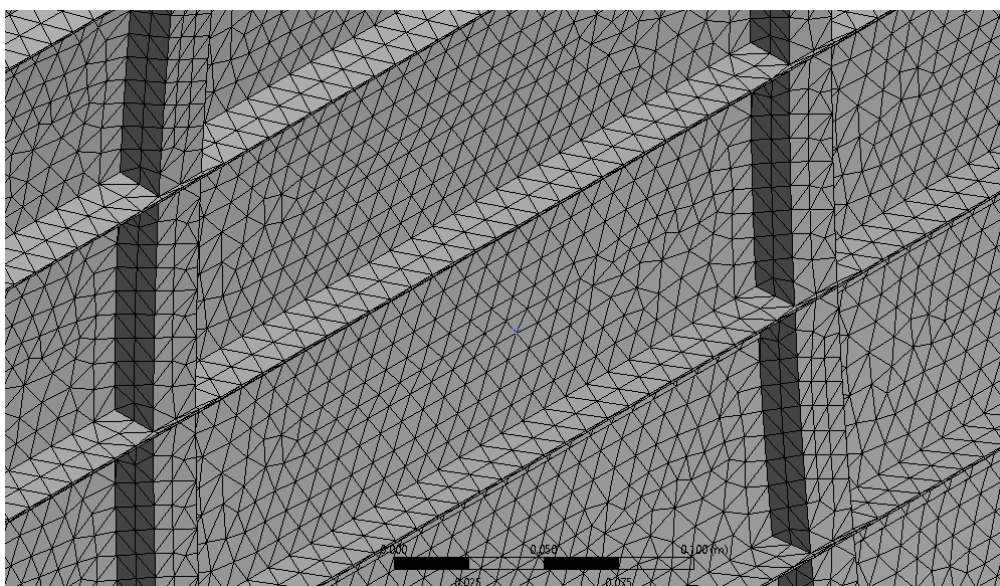




Obrázek 10.2 Průřez podélných a příčných výtuh [zdroj vlastní]

## 10.2 Síť

Vzhledem k jednoduchosti počítané úlohy byla zvolena tetrahedrální síť TET10, je vidět na následujícím obrázku.

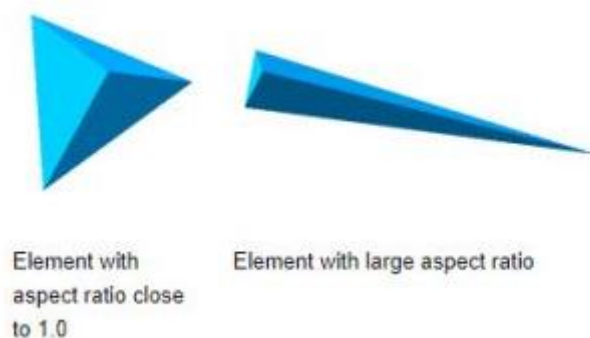


Obrázek 10.3 Zvolená síť [zdroj vlastní]

Velikost prvků byla s ohledem na parametry sledující kvalitu sítě zvolena 10 mm.

*Aspect ratio* by pro kvalitní síť podle zkušeností nemělo překračovat hodnotu 10, což tato síť splňuje. Další zjemňování sítě mělo na výsledky zanedbatelný vliv, naproti tomu značně prodlužovalo výpočetní čas.

*Aspect ratio* je parametr, který popisuje rovnostrannost prvků sítě. Ideální geometrie prvku má hodnotu 1 a je zobrazena na obrázku níže vlevo. Jakákoli odchylka od čtyřstěnu zvyšuje hodnotu parametru, jak je zobrazeno vpravo. Při překročení hodnoty 10 hrozí zkreslení výsledků. Citlivost výsledků na *aspect ratio* byla testována na neporušeném modelu.



Obrázek 10.4 Parametr aspect ratio [Mechead]

### 10.3 Vliv okrajových podmínek

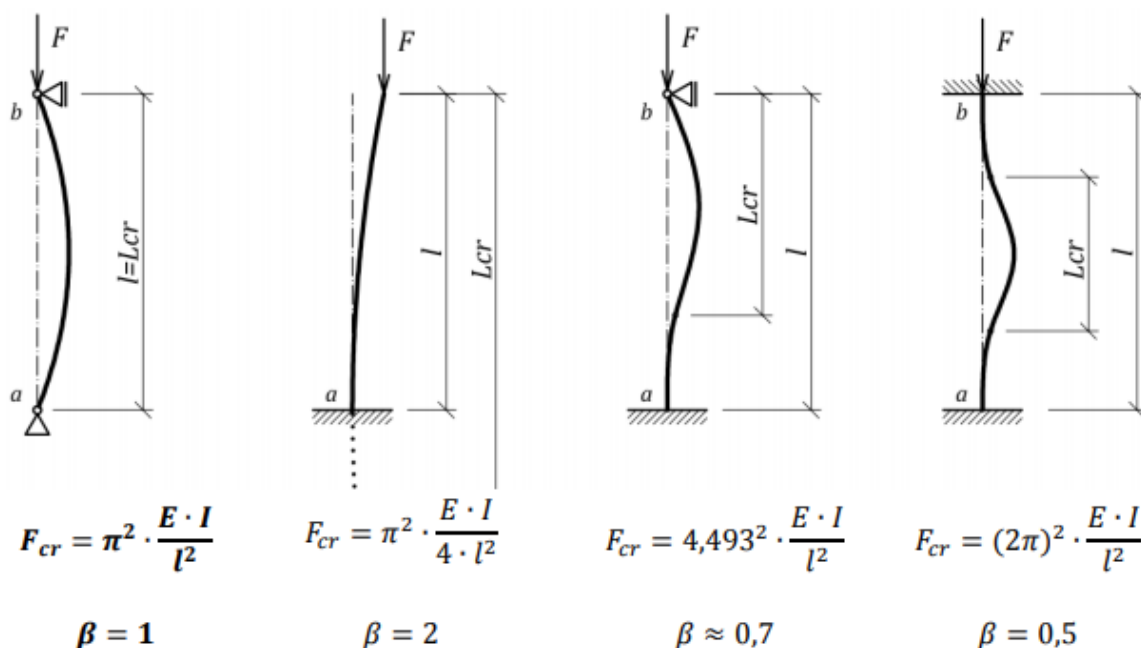
Pro pochopení mechanismu ztráty stability byl využit nejjednodušší případ, tedy přímý prut.

Nejčastěji používanou metodou pro určení kritické síly vzpěru prutu je Eulerova metoda. Podle té je kritická síla rovna:

$$F_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{L_{cr}^2}$$

kde  $L_{cr}^2$  je vzpěrná délka.

Vzpěrná délka je parametr, který zahrnuje vliv okrajových podmínek na průhyb prutu a tím ovlivňuje výslednou kritickou sílu. Na obrázku níže výčet typických okrajových podmínek a jim odpovídajícím kritickým silám.

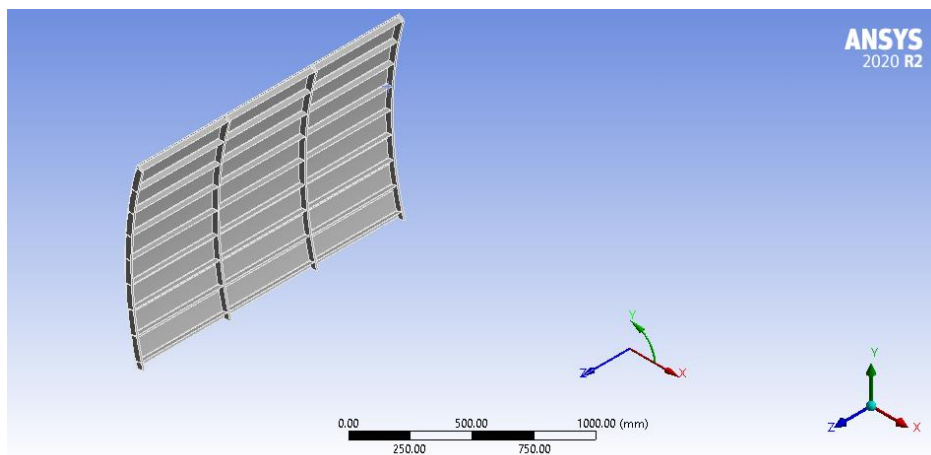


Obrázek 10.5 Vliv okrajových podmínek na velikost kritické síly

Vliv okrajových podmínek na sledovaný panel je obdobný. Proto jsou všechny uvedené závěry platné pouze pro zvolenou kombinaci geometrie a okrajových podmínek. Volba okrajových podmínek se na první pohled neprojeví na statickém MKP výpočtu deformace ani napětí. Ovšem nesprávné okrajové podmínky se u MKP výpočtu vzpěrné stability projeví jiným tvarem ztráty stability konstrukce a tím ovlivňují výslednou kritickou sílu.

## 10.4 Zvolené okrajové podmínky

Panel byl počítán jako po obvodě podepřený, za tímto účelem byl vytvořen cylindrický souřadnicový systém. Je zobrazen na obrázku níže. Obvodovým hranám je v tomto systému zakázán posun x a y. Pro dostatečné určení okrajovými podmínkami je posun ve směru osy z zakázán bodu v počátku souřadnicového systému modelu, tedy u paty krajní příčné výztuhy.

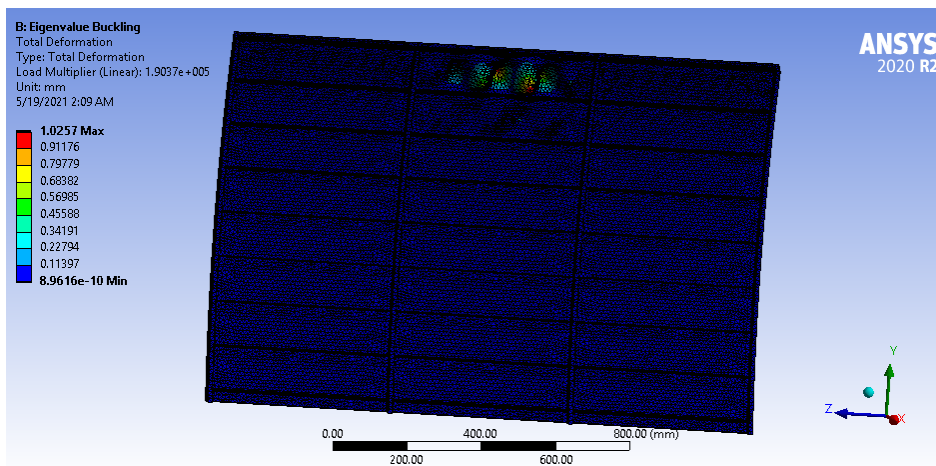


Obrázek 10.6 Cylindrický souřadnicový systém [zdroj vlastní]

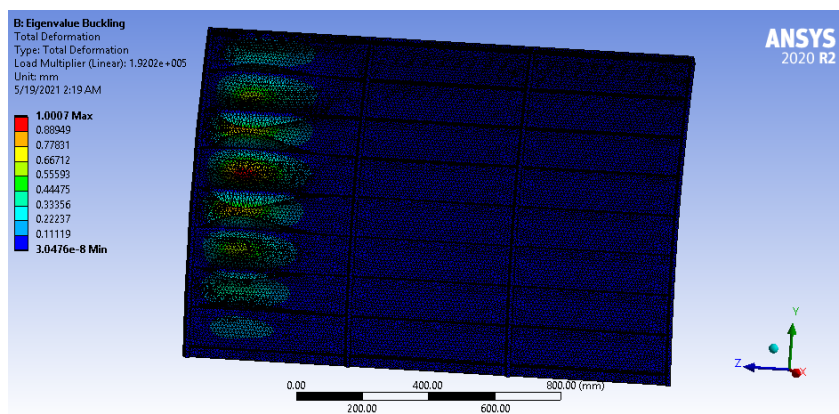
Panel je zatěžován dvěma proti sobě působícími silami o velikosti 1 N na ploše průřezu podélných výztuh a potahu. Zavedení plošné síly na příčnou výztuhu by znamenalo zanesení momentu.

## 10.5 Tvary módů neporušeného panelu

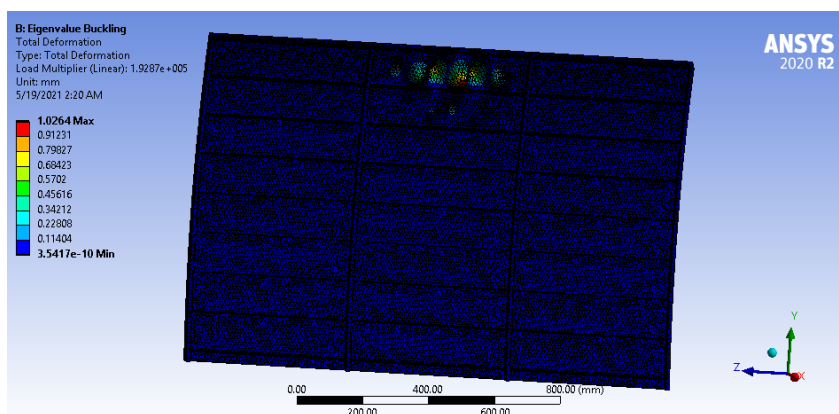
Stoupající zatěžovací síla vyvolává různé tvary zborcení konstrukce. První čtyři módy jsou zobrazeny na následujících obrázcích.



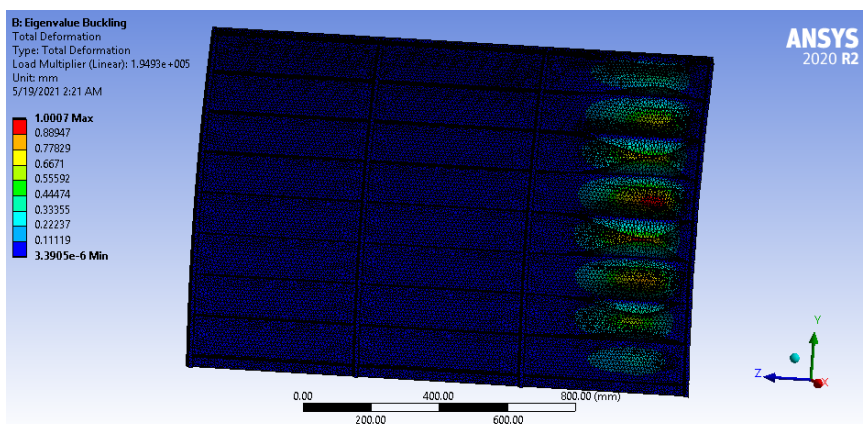
Obrázek 10.7 Múd 1 [zdroj vlastní]



Obrázek 10.8 Mód 2 [zdroj vlastní]



Obrázek 10.9 Mód 3 [zdroj vlastní]



Obrázek 10.10 Mód 4 [zdroj vlastní]

Uvádí se, že ke zvlnění potahu může docházet už při dosažení 30 % početního napětí. Z toho důvodu je model složen z relativně tenkého potahu, vyztuženého mnohem robustnějšími výztuhami. Z prvního zobrazeného modů je vidět, že ztráta stability se týká pouze potahu.

Pro hodnocení změny kritické síly jsou v následujících výpočtech sledovány jen první módy.

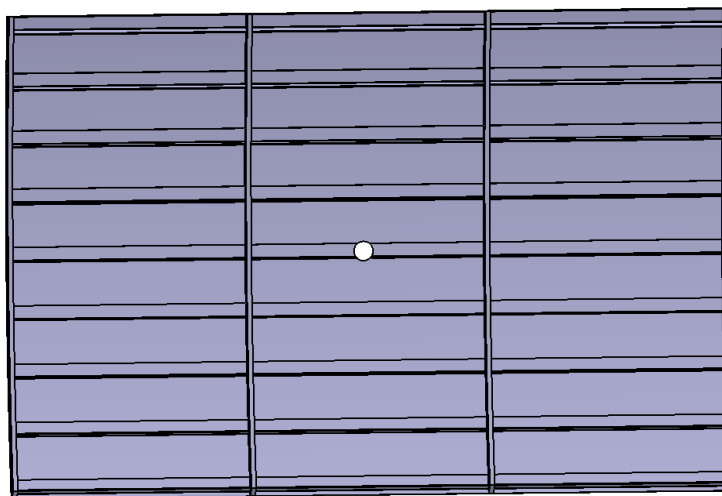
## 11 Pokles únosnosti v závislosti na různých typech poškození

Panel je uvažován jako samostatná konstrukce, ne jako uvolněná část trupu letounu. Příčné i podélné výztuhy jsou s panelem pevně spojeny, což odpovídá svařované nebo lepené konstrukci. Nejsou tedy uvažovány vlivy nýtů ani dopady oddělení výztuh od konstrukce.

Poškození je realizováno kruhovým otvorem o různém průměru. Toto poškození zmírňuje dopad koncentrátorů napětí vnesených do konstrukce úhelníkovým poškozením.

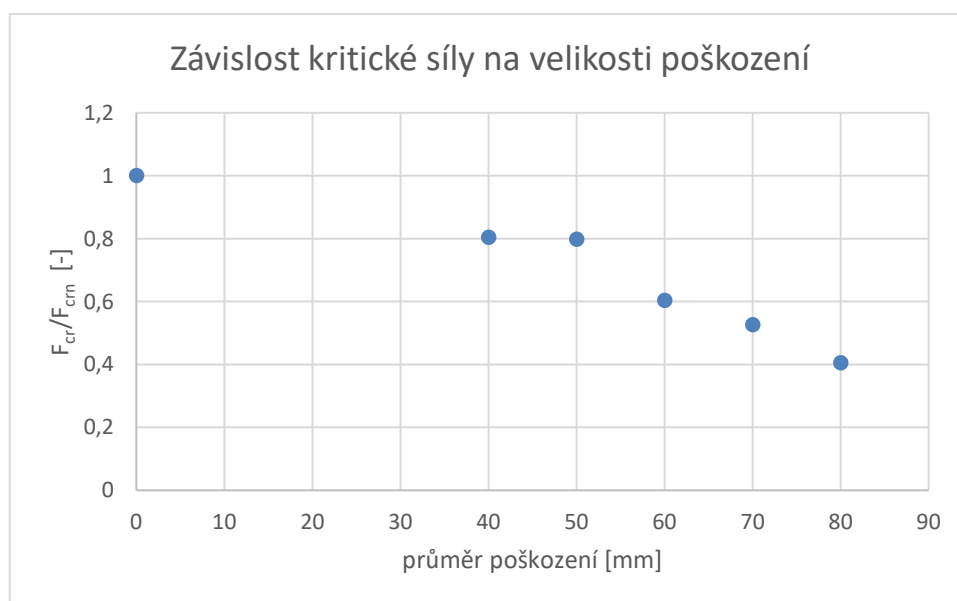
### 11.1 V závislosti na velikosti poškození

Poškození pro tuto závislost bylo vnášeno do středu panelu. Je tedy poškozen středový podélník a zároveň i potah. Velikost poškození začíná na 40 mm, aby došlo k úplnému přerušení podélníku. Další poškození jsou soustředná a jejich průměr se zvětšuje s krokem 10 mm.



Obrázek 11.1 Model pro sledování závislosti na velikosti porušení [zdroj vlastní]

Na grafu níže je znázorněna závislost kritické síly porušeného panelu na průměru poškození v mm. Kritická síla  $F_{cr}$  je přepočítána na podíl kritické síly u neporušeného panelu  $F_{cm}$



Obrázek 11.2 Závislost kritické síly na velikosti poškození [zdroj vlastní]

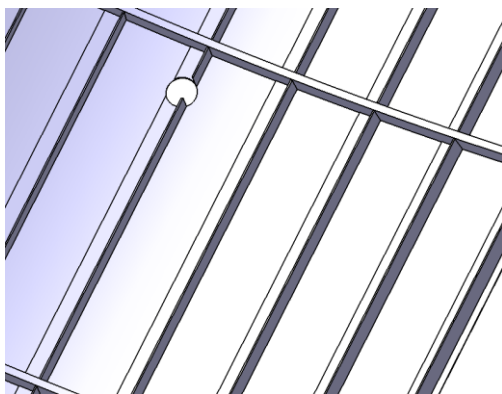
Z grafu je patrné, že dle očekávání s rostoucím poškozením klesá kritická síla, což ve výsledku znamená menší únosnost. Pokud se zaměříme na největší uvažované poškození, tedy průměr

poškození 80 mm, dostaneme hodnotu 40,5 % kritické síly neporušeného panelu. Toto porušení přitom uvažuje jednu z devíti porušených podélných výztuh a plošné porušení potahu, které odpovídá 0,3 %.

Tvary poškození jsou vykresleny v příloze.

## 11.2 V závislosti na poloze poškození po délce podélníku

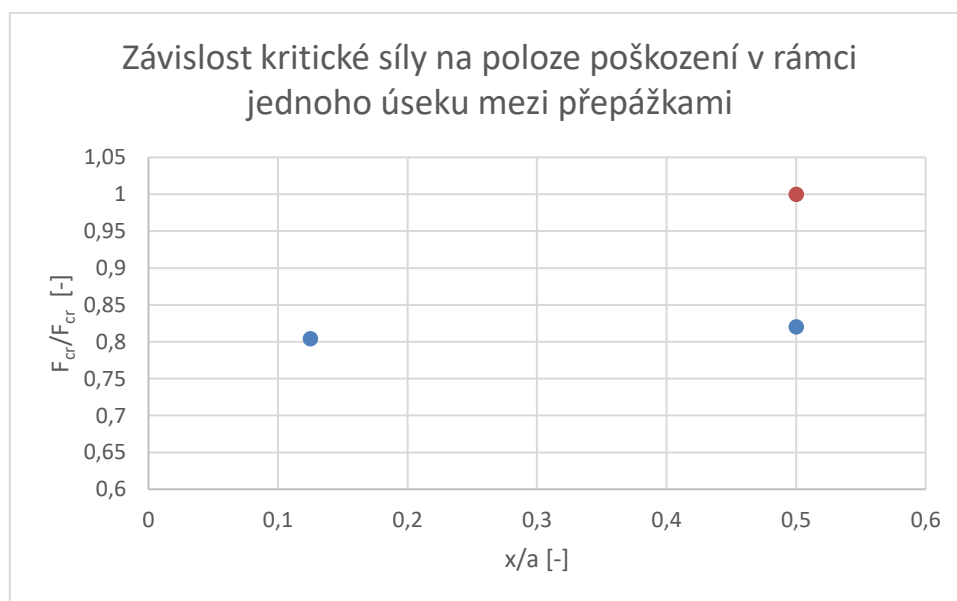
Pro tuto kapitolu byl podélník poškozen ve vzdálenosti jedné osminy délky jednoho okna potahu. Model tohoto poškození je na obrázku níže.



Obrázek 11.3 Model poškození [zdroj vlastní]

Tento výsledek byl následně srovnán s výsledkem kritické síly pro panel poškozený uprostřed.

Kritická síla je opět přepočítaná na podíl kritické síly nepoškozeného panelu. Graficky je toto srovnání na obrázku níže.

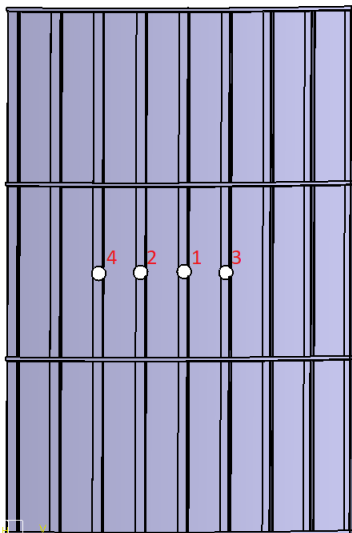


Obrázek 11.4 Závislost kritické síly na poloze poškození [zdroj vlastní]

Na ose x je vzdálenost od příčné přepážky x přepočítaná na podíl vzdálenosti příčných přepážek a. Červený bod odpovídá nepoškozenému panelu. Je umístěn do poloviny vzdálenosti mezi přepážkami pro názornost poklesu poškození mezi nepoškozeným panelem a panelem s poškozením o průměru 40 mm. Druhý modrý bod odpovídá poškození sledovanému v této kapitole. Jak je vidět z grafu, na místě poškození podélníku nezáleží. Rozdíl mezi hodnotami kritické síly pro tato dvě poškození je 1,6 %, což je zanedbatelné.

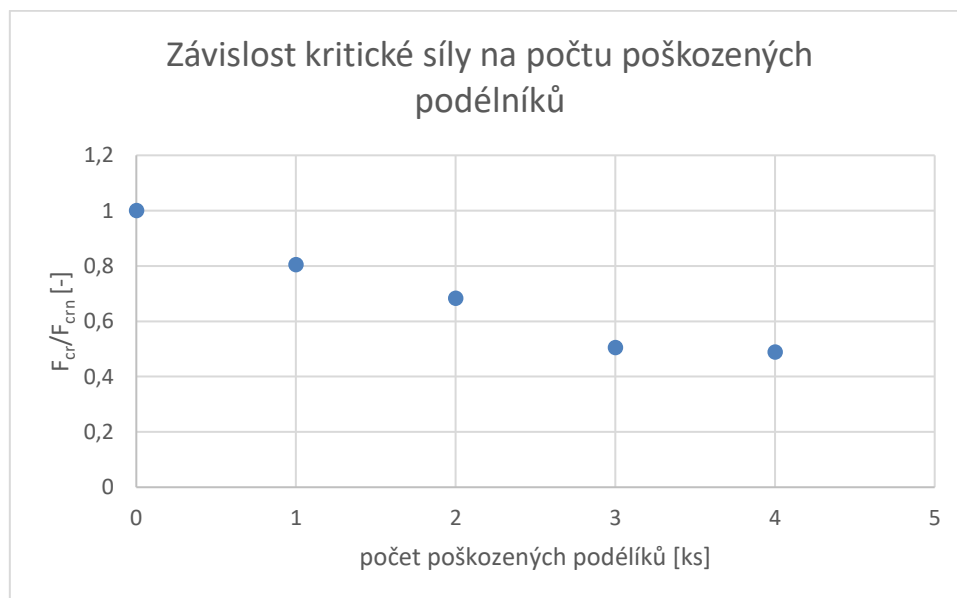
### 11.3 V závislosti na počtu porušených podélníků

Závislost na počtu porušených podélníků opět vychází z prvního poškození z kapitoly závislosti na velikosti poškození, tedy z modelu na obrázku 11.1. Uprostřed je panel poškozen kruhovým otvorem o průměru 40 mm. Pro další bod závislosti zůstává původní poškození a další poškození o stejném průměru je přidáváno dle schématu na následujícím obrázku.



Obrázek 11.5 Schéma poškození [zdroj vlastní]

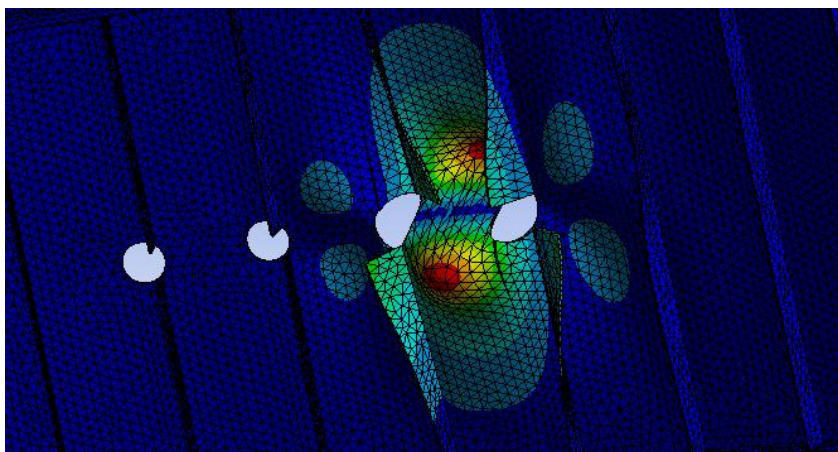
Závislost kritické síly je vykreslena na následujícím grafu. Pro kritickou sílu je opět použit podíl kritické síly nezatíženého panelu.



Obrázek 11.6 Závislost na počtu poškozených podélníků

Na ose y je počet poškozených podélníků. Z grafu je vidět, že se klesání kritické síly po porušení třech podélníků zpomalí. Důvod tohoto chování grafu je na detailu tvaru zborcení panelu se čtyřmi porušenými podélníky na obrázku níže.



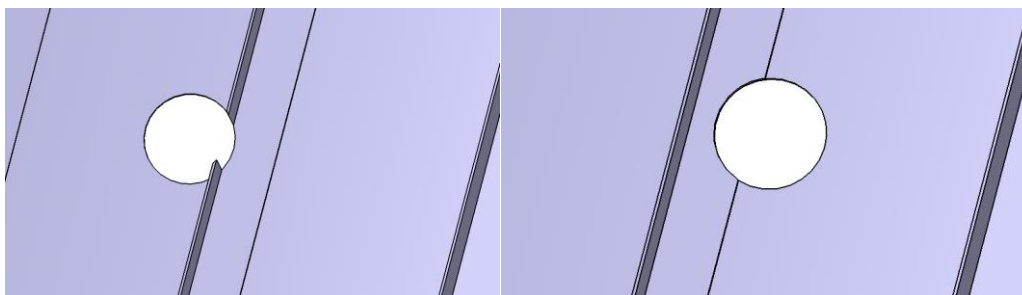


Obrázek 11.7 Detail tvaru zborcení panelu se čtyřmi poškozenými podélníky [zdroj vlastní]

Na tomto detailu je vidět, že ke zhroucení konstrukce dochází nejdříve v jejím středu. Porušení čtvrtého podélníku má už jen minimální vliv, na poklesu kritické síly se to projeví poklesem kritické síly o 1,5 %.

#### 11.4 Poškození podélníku

Dalším sledovaným bodem bylo různé poškození podélníku. Cílem bylo zjistit, jak se na ztrátě stability u panelu zatíženého tlakem podílí profil podélné výtuhy. Na obrázku níže jsou dvě porovnávaná poškození. Ani v jednom případě není podélník zcela přerušen. Na obrázku vlevo je porušením zcela odstraněna zalomená část, na obrázku vpravo, je poškození sahající do poloviny stejného podélníku.



Obrázek 11.8 Model poškození [zdroj vlastní]

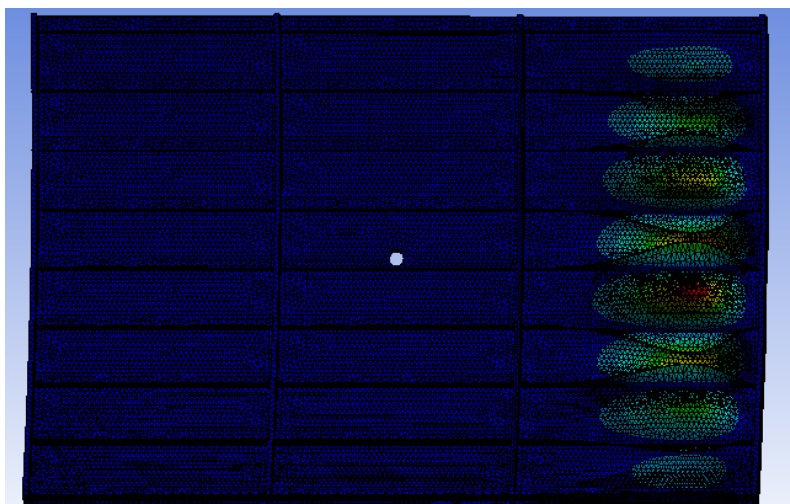
V následující tabulce jsou hodnoty kritické síly obou poškození ve srovnání s kritickou silou nepoškozeného panelu.

Tabulka 2 Kritická síla

	Kritická síla [N]	$F_{cr}/F_{crn}$ [-]
Nepoškozený panel	190370	1
Poškození vlevo	185770	0,976
Poškození vpravo	187870	0,987

Rozdíly mezi příslušnými kritickými silami jsou velmi malé, je tedy nutné analyzovat tvar nestability.





*Obrázek 11.9 Tvar zborcení*

Podle tvaru zborcení bylo poškození příliš malé. Nevyvolalo koncentraci dostatečně velkou, aby na sebe vážala tvar nestability

Změkčení nosníku vyvolá jen sekundární efekt, a to je změkčení okraje zborcené části konstrukce.

## 12 Vyhodnocení

Podélné výztuhy potahu mají za úkol zvyšovat kritické napětí. Kritické napětí potahu je nepřímo úměrné čtverci rozteče mezi výztuhami. Dále zjemňují zvlnění po ztrátě stability potahu.

I přesto ale dochází u poloskořepinových konstrukcí ke zvlnění potahu velmi brzy. Udává se, že již při 30 % početního zatížení.

Konstrukce sledovaného panelu byla navrhována s velmi tenkým potahem a s výrazně robustnějšími podélnými výztuhami. Z toho důvodu je na výpočtu vidět chování při poruše.

Neporušený panel jako první ztrácí stabilitu potahu, což vede k jeho vyboulení, ale podélné výztuhy zůstávají netknuté.

Při porušení prostředního podélníku dochází k okamžité koncentraci napětí v místě porušení. Už nedochází k vyboulení potahu. To je samozřejmě dáno zvolenou geometrií. Podélné výztuhy mají v porovnání s potahem značnou plochu průřezu a při zavedení zatížení na tyto plochy přebírají jeho velkou část. Pokud by byl uvažován panel s podélnými výztuhami menší plochy a nosnější potah, bylo by přerozdělení zatížení méně nevyvážené.

Okamžitá koncentrace napětí do porušení podélné výztuhy ale potvrzuje důležité konstrukční pravidlo, které říká, že podélníky musí být vždy konstruovány jako nepřerušené. Pokud je nutné sestavit podélnou výztuhu z více částí, musí být spojena nerozebíratelným spojem. Přerušená výztuha není schopná přenášet zatížení.

Naproti tomu částečné porušení podélné výztuhy se na poklesu únosnosti projevilo jen minimálně.

Bylo ukázáno, že nezávisí na poruše poškození v rámci jednoho pole mezi příčnými výztuhami, pokles únosnosti je v takových případech srovnatelný.

Pokud uvedeme v souvislosti výsledky MKP s porušením, které vzniká v důsledku použití jednotlivých poškozujících prostředků, je možné vyvodit závěr, že zásah řízenou strelou s tříštivou hlavicí pravděpodobně nevyvolá tak vážné poškození konstrukce jako například bomba na palubě.

Výsledky potvrdily předpoklad, že velké množství menších poškození nepředstavuje pro konstrukci takové nebezpečí jako jedno poškození většího rozsahu. Menší střepiny jsou také schopny přerušit podélnou výztuhu s menší pravděpodobností

Tyto výsledky jsou platné pro konstrukci. Neberou v potaz větší citlivost některých zranitelnějších částí, kdy samozřejmě platí, že velký rozptyl menších střepin poskytuje vyšší pravděpodobnost zasáhnout místo, které letoun vyřadí z provozu. Takovou typickou částí jsou například pohonné jednotky.

## 13 Závěr

Začátek teoretické části práce je věnován definici teroristického útoku. Tato definice není všude jednotná, i právo si terorismus vykládá různě. Pro potřeby této práce je za terorismus považováno násilí, či dokonce hrozba násilím, které sleduje konkrétní cíl.

Některé útoky na civilní dopravní letouny z posledních let bohužel postrádají objasněný motiv. V nepřehledné politické situaci, kdy na daném území probíhá vojenský střet, není pro vyšetřovatele snadné zjistit k čemu došlo.

Příliš mnoho letounů už však bylo sestřeleno omylem a dokud nezavládne světový mír, dá se předpokládat, že čísla budou dál narůstat.

Je zřejmé, že výrobci letadel ani sami dopravci nebudou přijímat drahá opatření kvůli tak málo pravděpodobné bezpečnostní hrozbě. Neustále ale přibývají nové koncepce letounů, které by mohly být nebezpečí teroristického útoku přizpůsobené už od začátku vývoje.

Počáteční kapitoly dále shrnují stručnou historii terorismu, důvody vedoucí k teroristickým útokům a přehled vybraných útoků na letadla za poslední léta.

Dále byly útoky na letadla rozděleny na útoky vedené zevnitř a zvenčí, byla stručně popsána jejich charakteristika a v čem konkrétně spočívá jejich největší nebezpečí. Spolu s nimi byly stejně rozděleny i použité poškozující prostředky.

Možné rozsahy poškození a jejich důsledky byly popsány pro jednotlivé typy konstrukce trupu letounu.

Letoun byl rozdělen na části, u kterých byl popsán pravděpodobný způsob porušení a jeho závažnost. K vytypování kritických míst konstrukce není možné stanovit obecný algoritmus. Vždy záleží na použitém poškozujícím prostředku, a tedy na charakteru výsledného poškození. Obecně platí to, že menší části jsou na stejné poškození citlivější než velké, jako například trup. To je způsobeno relativní velikostí výsledného poškození. Dále jsou velmi ohrožené části pohyblivé, tedy kormidla nebo pohonné jednotky.

Praktická část analyzuje vyztužený zakřivený panel, nejprve analyticky a poté metodou MKP. Sleduje různé poškození panelu a reakci výsledné kritické síly na toto poškození.

## Použité zdroje

Tištěné

[1] Ball, E. Robert. *The Fundamental of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design Education series*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA, 1985. 399 s. ISBN0-930403-02-9

[2] ČALKOVSKÝ, A. DANĚK, V. PÁVEK, J. *Konstrukce a pevnost letadel 1. díl*. Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1984.

[3] FILIPEC, Ondřej. *Fenomén terorismus: česká perspektiva*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2017. ISBN 978-80-244-5040-7

[4] FOLTIN, Pavel. ŘEHÁK, David. *Důvody realizace a formy terorismu*. 2005 Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/269278618\\_Duvody\\_realizace\\_a\\_formy\\_terorismu](https://www.researchgate.net/publication/269278618_Duvody_realizace_a_formy_terorismu)

[5] HUB, Juraj. *Stavebná mechanika leteckých konstrukcí: pro bakalářské studium*. Brno: Univerzita obrany, 2009. ISBN 978-80-7231-630-4.

[6] KAN, N. S. *Pevnost letounu*. Praha: Naše vojsko 1957.

[7] KOPŘIVA, Z. PÁVEK, J. *Konstrukce a projektování letadel I*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta strojní, 1982

[8] LOŠŤÁK, M. *Bezpečnost dopravního letounu při poškození draku teroristickým útokem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 85 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc.

[9] PETRÁSEK, Miloslav. *Konstrukce letadel I*. Brno: Univerzita obrany, 2011. ISBN 978-80-7231-212-2.

[10] SIKORA, Thomas F. *Military Explosives Headquarters, DEPARTMENT OF THE ARMY* Washington, D.C., 25, 1990. Dostupné z: <http://www.lexpev.nl/downloads/tm91300214militaryexplosives.pdf>

[11] TUREČEK, Jaroslav. *Policejní pyrotechnika*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2014. ISBN 978-80-7380-510-4

Internetové

[12] Bloomberg, M. *The airport security measure*. In: Skift [online] 2016 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://skift.com/2016/03/24/the-airport-security-measure-that-works-yet-too-few-airports-use/>

[13] Full text: bin Laden's 'letter to America'. In: The Guardian [online] 2002 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/world/2002/nov/24/theobserver>

## Zdroje obrázků

Obrázek 2.1 Útoky 11. září na Světové obchodní centrum v NY [obrázek]. In: Armyweb [online] 2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: [https://www.armyweb.cz/images/UDALOSTI/11\\_ZARI/11zari\\_01.jpg](https://www.armyweb.cz/images/UDALOSTI/11_ZARI/11zari_01.jpg)

Obrázek 2.2 Místo sestřelení letu Iran Air 655 [obrázek]. In: Novinky.cz [online] 2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/zahranicni/blizky-a-stredni-vychod/clanek/pred-30-lety-sestrelil-americky-kriznik-iransky-civilni-airbus-110666>

Obrázek 2.3 Trosky letu Pan Am 103 [obrázek]. In: Novinky [online] 2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.noviny.sk/zahranicie/https>

Obrázek 2.4 Trosky letu MH17 [obrázek]. In: WSJ.com [online] 2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.wsj.com/articles/malaysia-airlines-flight-17-hit-by-high-energy-objects-says-dutch-report-1410251123>

Obrázek 2.5 Raketa země-vzduch S-200 [obrázek]. In: Army Recognition [online] 2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: [https://www.armyrecognition.com/russia\\_russian\\_missile\\_system\\_vehicle\\_uk/sa-5\\_gammon\\_s-200\\_angara\\_vega\\_ground\\_to\\_air\\_missile\\_system\\_technical\\_data\\_sheet\\_specifications\\_uk.html](https://www.armyrecognition.com/russia_russian_missile_system_vehicle_uk/sa-5_gammon_s-200_angara_vega_ground_to_air_missile_system_technical_data_sheet_specifications_uk.html)

Obrázek 2.6 Trosky letu PS752 [obrázek]. In: Aeronews [online] 2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://aeronewsglobal.com/cao-iran-issues-preliminary-report-ukraine-international-flight-ps752/>

Obrázek 5.12 Zborcení konstrukce [obrázek]. In: Mech [online] 2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <http://mech.fd.cvut.cz/members/malinovsky/teorie-konstrukci/5%20-%20Skorepiny.pdf>

Obrázek 10.5 Vliv okrajových podmínek na velikost kritické síly [obrázek] Přednášky předmětu Pružnost a pevnost I, FSI, VUT

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Útoky 11. září .....	4
Obrázek 2.2 Místo sestřelení letu Iran Air 655 .....	5
Obrázek 2.3 Trosky letu Pan Am 103 .....	5
Obrázek 2.4 Trosky letu MH 17.....	6
Obrázek 2.5 Raketa země-vzduch S-200 .....	7
Obrázek 2.6 Trosky letu PS752.....	8
Obrázek 3.1 Počet útoků na palubě a ztrát na životech v průběhu let [ <a href="https://ourworldindata.org/terrorism">https://ourworldindata.org/terrorism</a> ].....	9
Obrázek 3.2 Semtex [explosia.cz].....	11
Obrázek 3.3 FIM-92 Stinger [missiledefenseadvocacy.org].....	12
Obrázek 3.4 9K37 BUK [Wikipedie].....	12
Obrázek 3.5 SPYDER [czdefence.cz].....	13
Obrázek 4.1 Komponenty elektrické soustavy A 380 [Civil Avionics Systém].....	15
Obrázek 4.2 Fly-by-wire [Researchgate.net] .....	15
Obrázek 4.3 Explosivní dekomprese [foto Alan Levin] .....	16
Obrázek 4.4 Základní klasifikace zatížení [9].....	17
Obrázek 4.5 Proměnlivá zatížení [9].....	18
Obrázek 5.1 Příhradová konstrukce [Kan].....	19
Obrázek 5.2 Poškození prutu v prutové konstrukci [zdroj vlastní].....	20
Obrázek 5.3 Nosníková konstrukce [9].....	20
Obrázek 5.4 Konstrukce nosníkového trupu [Kan].....	20
Obrázek 5.5 Průstřel tenkého materiálu [zdroj vedoucí práce] .....	21
Obrázek 5.6 Průstřel tlustšího materiálu [zdroj vedoucí práce] .....	21
Obrázek 5.7 Nosníková poloskořepina [9].....	22
Obrázek 5.8 Poškození trupu [zdroj vedoucí práce] .....	23
Obrázek 5.9 Poloskořepinová konstrukce [9] .....	23
Obrázek 5.10 Poškození letounu B-17 [warhistoryonline.com] .....	24
Obrázek 5.11 Skořepinová konstrukce [Slavetin.cz] .....	24
Obrázek 5.12 Ztráta stability skořepinové konstrukce.....	25
Obrázek 6.1 Šíření střepin po explozi [8] .....	26
Obrázek 6.2 Šíření střepin v čase [8] .....	26
Obrázek 6.3 Model šíření střepin [8] .....	27
Obrázek 6.4 Vzdálenost mezi střepinami po obvodu [8].....	28
Obrázek 6.5 Stanovení horizontální vzdálenosti mezi střepinami [8] .....	28
Obrázek 6.6 Maximální úhel rozptylu střepin, kdy dochází k zásahu trupu [zdroj vlastní] ....	29
Obrázek 6.7 Výseč úhlu $\beta$ v celkové oblasti šíření střepin [8].....	29
Obrázek 6.8 Vznik spojitého otvoru ve velmi měkkém materiálu [zdroj vlastní].....	31
Obrázek 9.1 Geometrie podélné výztuhy [zdroj vlastní] .....	36
Obrázek 9.2 Tvar zborcení [zdroj vlastní] .....	37
Obrázek 10.1 Model panelu [zdroj vlastní].....	38
Obrázek 10.2 Průřez podélných a příčných výztuh [zdroj vlastní] .....	39
Obrázek 10.3 Zvolená síť [zdroj vlastní] .....	39
Obrázek 10.4 Parametr aspect ratio [Mechead] .....	40
Obrázek 10.5 Vliv okrajových podmínek na velikost kritické síly.....	40
Obrázek 10.6 Cylindrický souřadnicový systém [zdroj vlastní] .....	41
Obrázek 10.7 Mód 1 [zdroj vlastní] .....	41
Obrázek 10.8 Mód 2 [zdroj vlastní] .....	42
Obrázek 10.9 Mód 3 [zdroj vlastní] .....	42
Obrázek 10.10 Mód 4 [zdroj vlastní] .....	42

Obrázek 11.1 Model pro sledování závislosti na velikosti porušení [zdroj vlastní] .....	43
Obrázek 11.2 Závislost kritické síly na velikosti poškození [zdroj vlastní] .....	43
Obrázek 11.3 Model poškození [zdroj vlastní] .....	44
Obrázek 11.4 Závislost kritické síly na poloze poškození [zdroj vlastní] .....	44
Obrázek 11.5 Schéma poškození [zdroj vlastní] .....	45
Obrázek 11.6 Závislost na počtu poškozených podélníků .....	45
Obrázek 11.7 Detail tvaru zborcení panelu se čtyřmi poškozenými podélníky [zdroj vlastní]	46
Obrázek 11.8 Model poškození [zdroj vlastní] .....	46
Obrázek 11.9 Tvar zborcení .....	47
Obrázek 14.1 Ekvivalentní stres.....	55
Obrázek 14.2 Celková deformace .....	55
Obrázek 14.3 Ekvivalentní napětí .....	56
Obrázek 14.4 Celková deformace .....	56
Obrázek 14.5 Poškození 40 mm ve 12,5 % délky panelu potahu .....	57
Obrázek 14.6 Poškození 40 mm.....	57
Obrázek 14.7 Poškození 50 mm.....	58
Obrázek 14.8 Poškození 60 mm.....	58
Obrázek 14.9 Poškození 70 mm.....	59
Obrázek 14.10 Poškození 80 mm.....	59
Obrázek 14.11 Porušení dvou podélných výztuh.....	60
Obrázek 14.12 Porušení tří podélníků.....	60
Obrázek 14.13 Porušení čtyř podélníků .....	61

## Seznam použitých zkratk a symbolů

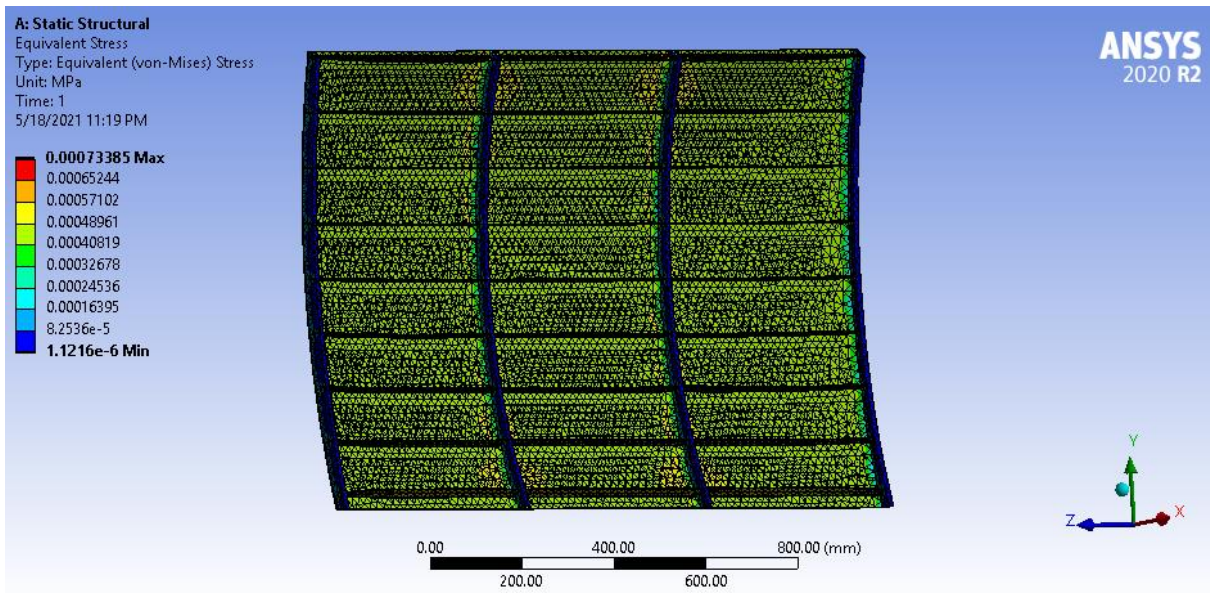
Symbol	Veličina
A	Délka panelu
APU	Auxiliary power unit
$A_v$	Plocha výztuhy
b	Šířka potahového pole
B	Šířka panelu
$F_{cr}$	Kritická síla
$h_i$	Přírůstek výchozí šířky pole způsobený rozptylem
$h_0$	Výchozí šířka pole
$h(R)$	Celková šířka pole
$L_{cr}^2$	Vzpěrná délka
$M_k$	Kroutící moment
$M_o$	Ohybový moment
$n_{\beta}$	Počet střepin
$N_c$	Celková únosnost
$N_m$	Mezní zatížení na panel
$N_{pot}$	Únosnost potahu
$n_v$	Počet podélníků
O	Počet střepin šířících se ve vertikální rovině
P	Celkový počet střepin
$P_{poc}$	Početní zatížení
$P_{pr}$	Provozní zatížení
$p$	Počet střepin šířících se vertikálně
r	Poměr úhlů
R	Vzdálenost výbuchu od trupu letounu
RDX	Hexogen
$R_p$	Poloměr křivosti potahu
$R_t$	Poloměr trupu zasaženého letounu
$R_t$	Velikosti trupu
S	Stanovení největšího možného poškození
$S_p$	Velikost poškození
$S_s$	Určení velikosti střepiny
$T_y$	Posouvající síla
t	Počet střepin šířících se horizontálně
$t_p$	Tloušťka potahu
$W_I$	Modul průřezu určen pro tlakovou stranu celého příčného průřezu
$W_{II}$	Modul průřezu určen pro tlakovou stranu účinného příčného průřezu
Z	Celkový počet střepin
$\alpha$	Úhel šíření střepin
$\Delta\sigma_{\hat{k}}$	Vliv zakřivení potahu
$\sigma_{KRp}$	Kritické napětí potahu
$\sigma_{KRv}$	Kritické napětí podélné výztuhy



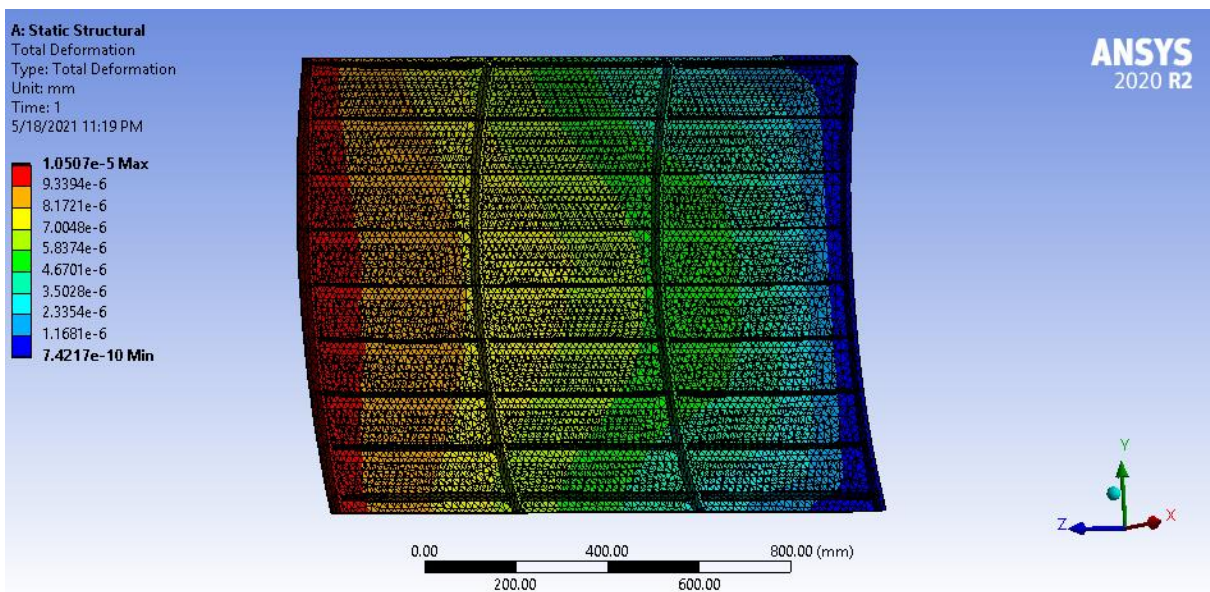
# Přílohy

## Neporušená konstrukce

Static structural analýza v programu ANSYS pro neporušenou konstrukci:



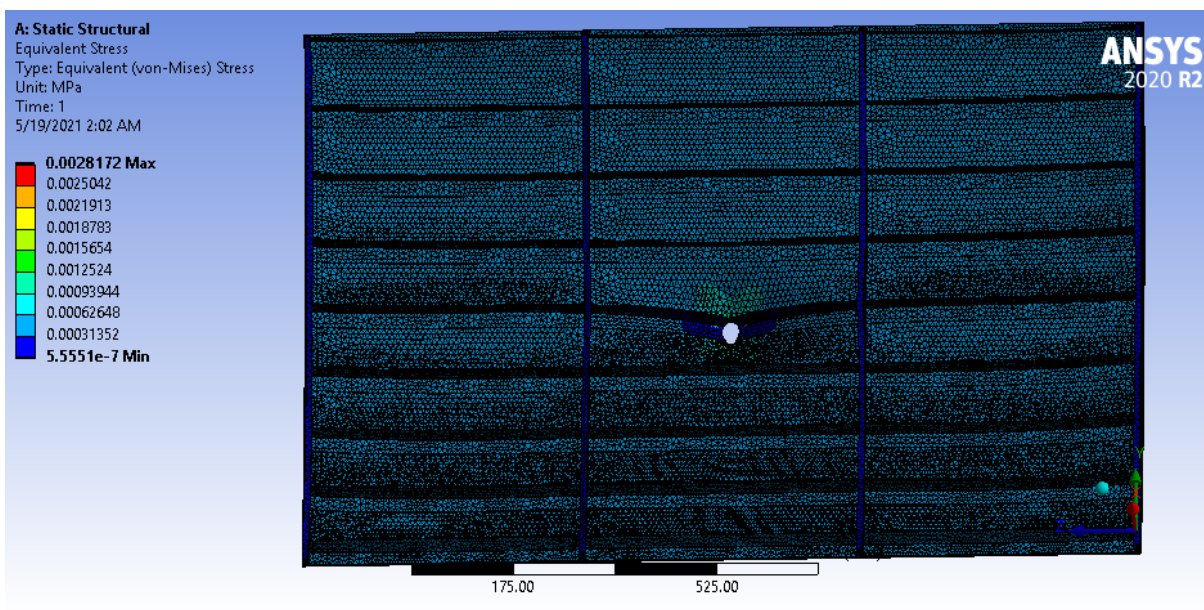
Obrázek 0.1 Ekvivalentní stres



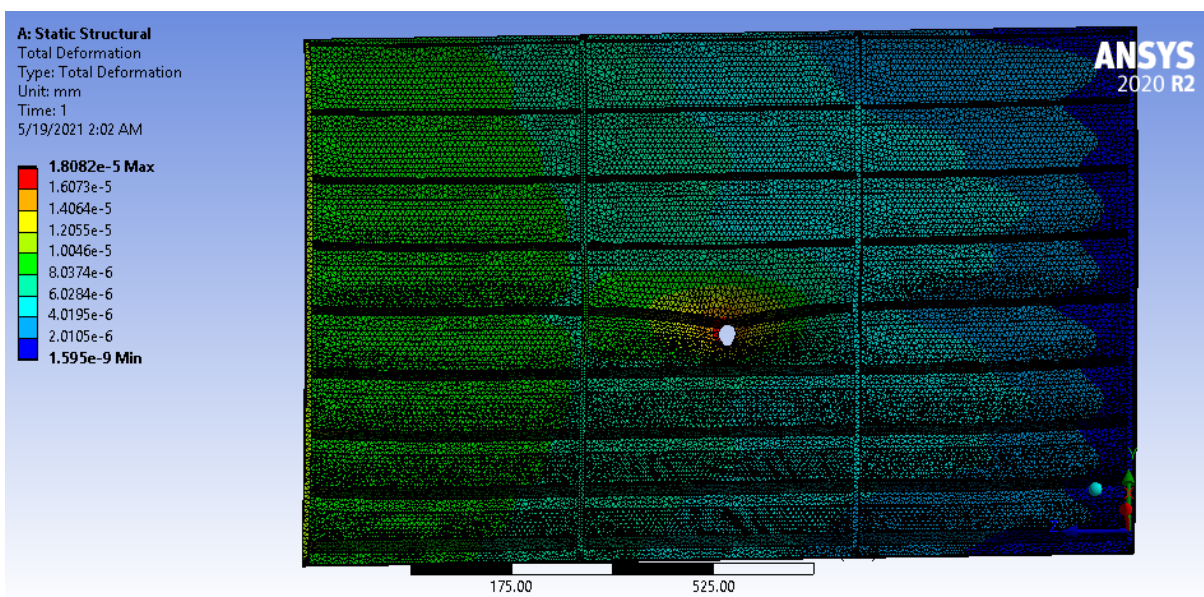
Obrázek 0.2 Celková deformace

## Velikost porušení

Static structural analýza pro porušenou konstrukci (40 mm):



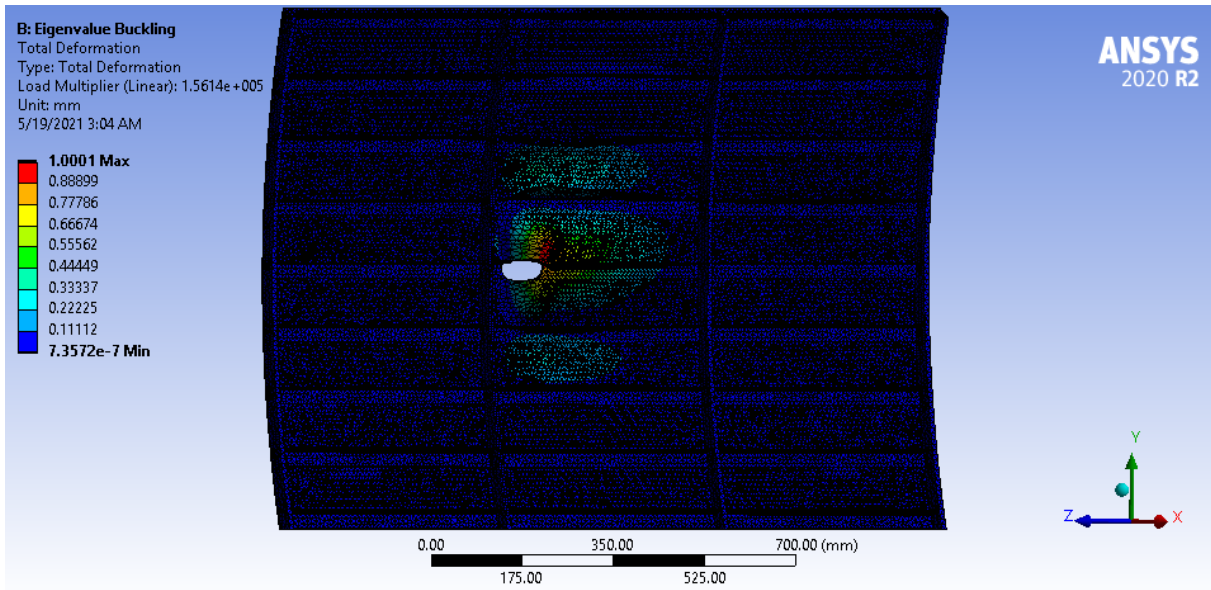
Obrázek 0.3 Ekvivalentní napětí



Obrázek 0.4 Celková deformace

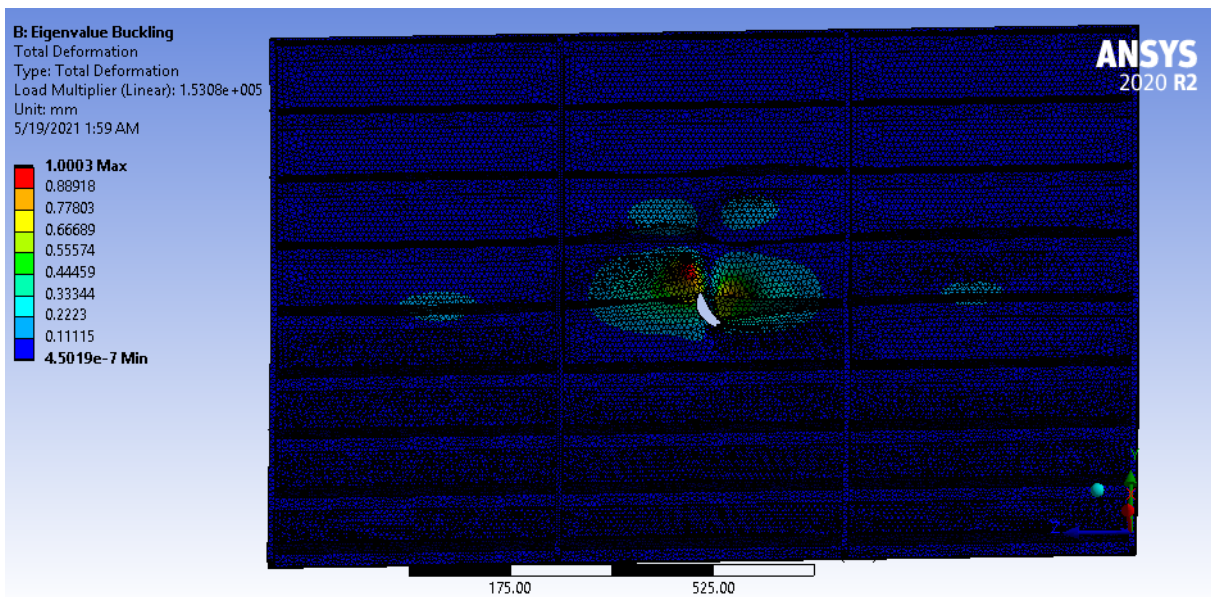


## Ztráta stability v závislosti na poloze po délce

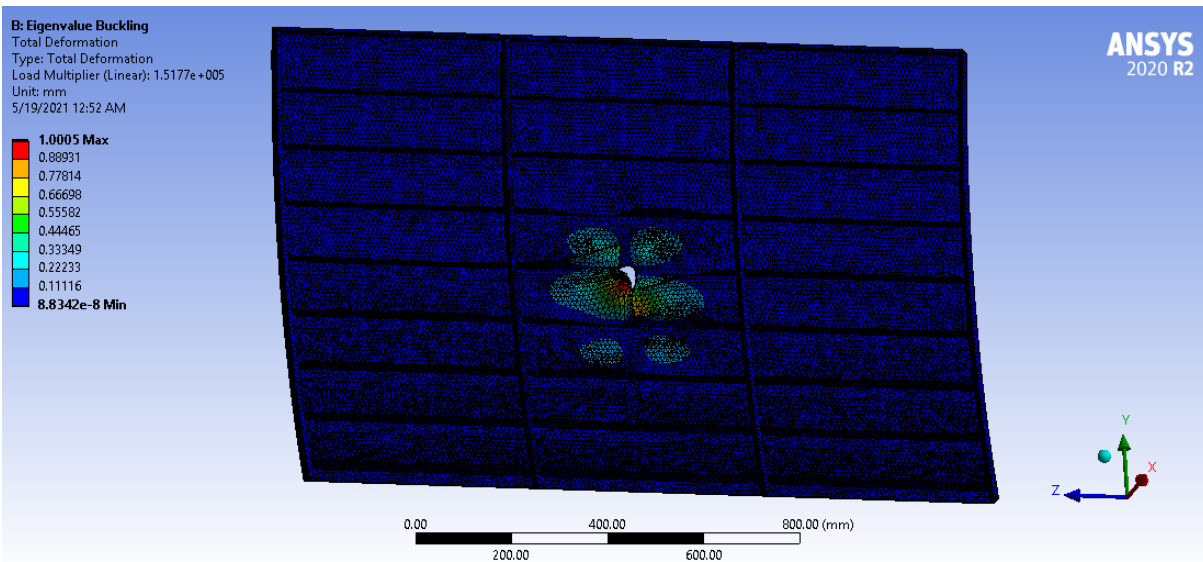


Obrázek 0.5 Poškození 40 mm ve 12,5 % délky panelu potahu

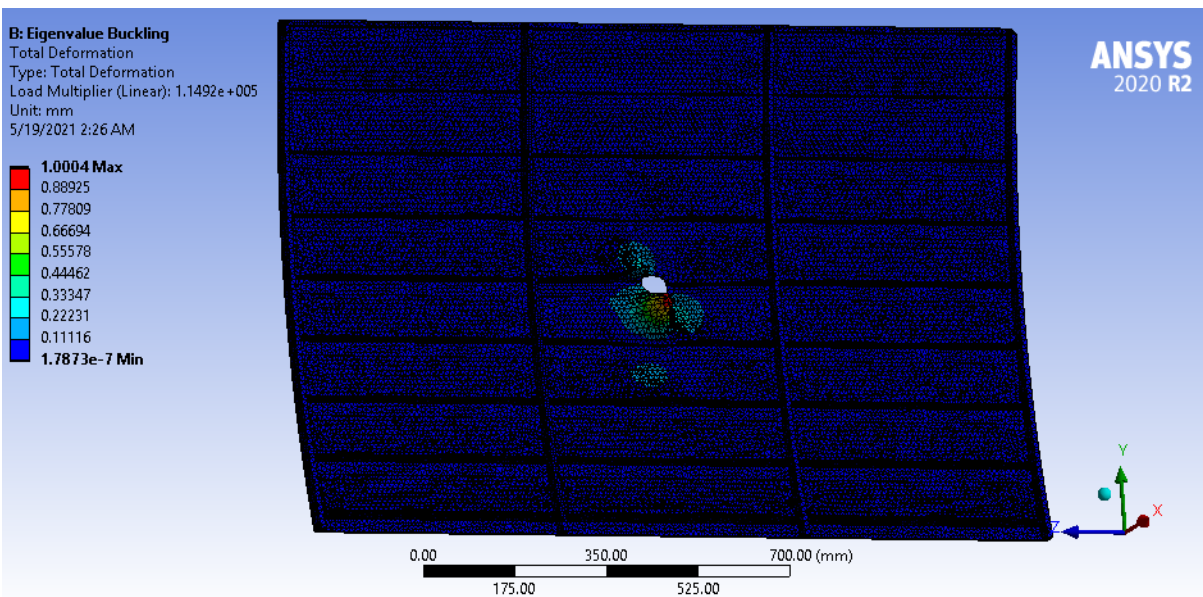
## Ztráta stability pro zvyšující se velikost poškození



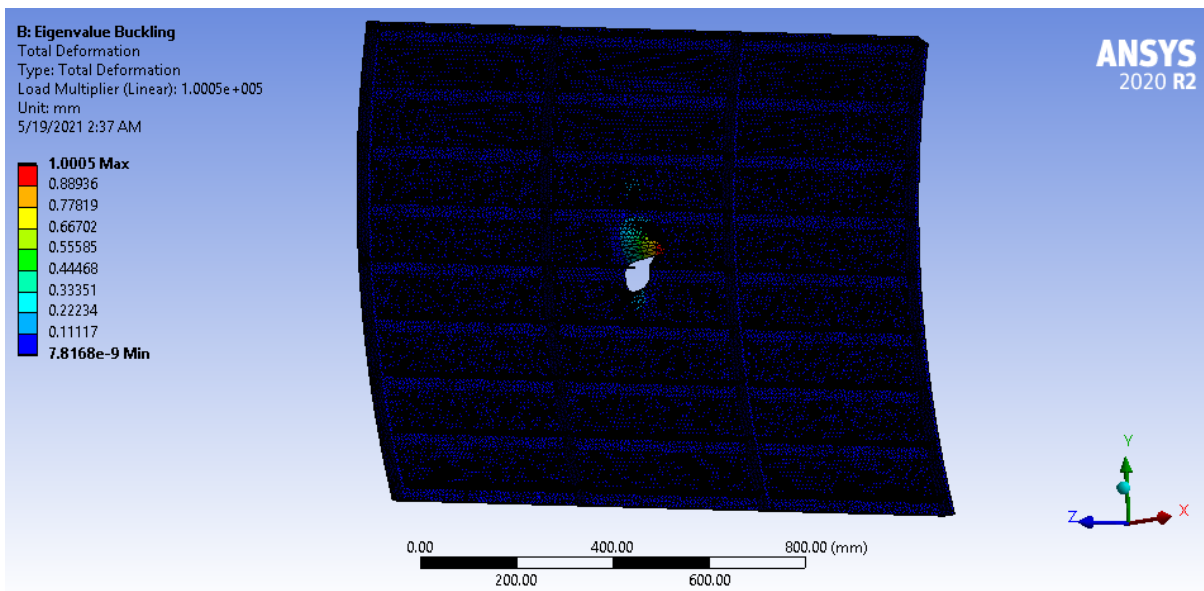
Obrázek 0.6 Poškození 40 mm



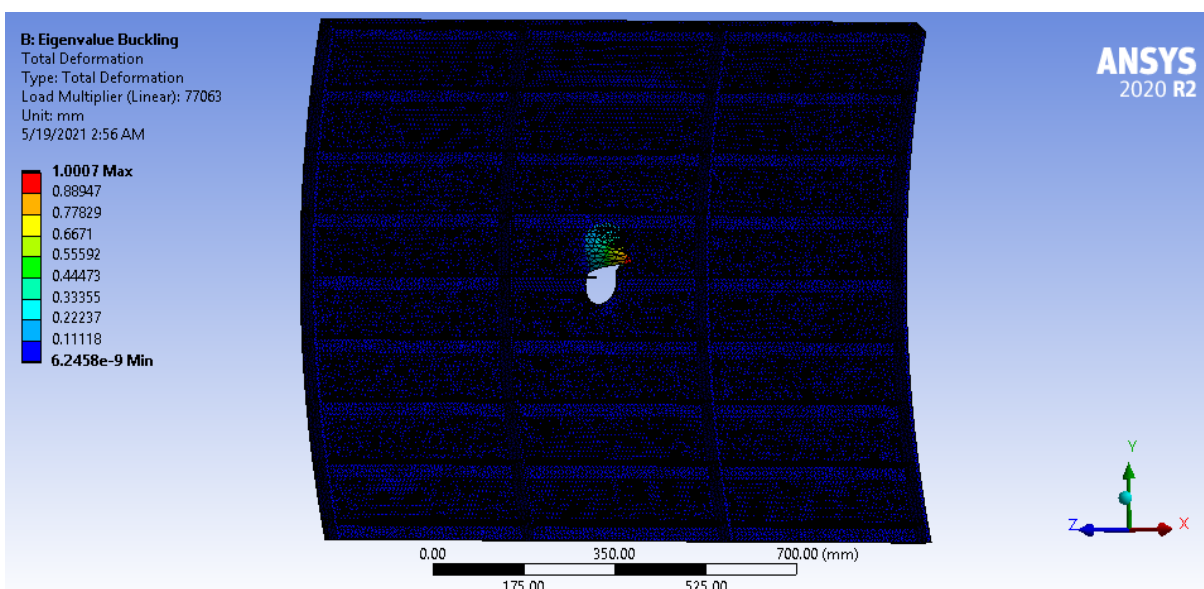
Obrázek 0.7 Poškození 50 mm



Obrázek 0.8 Poškození 60 mm



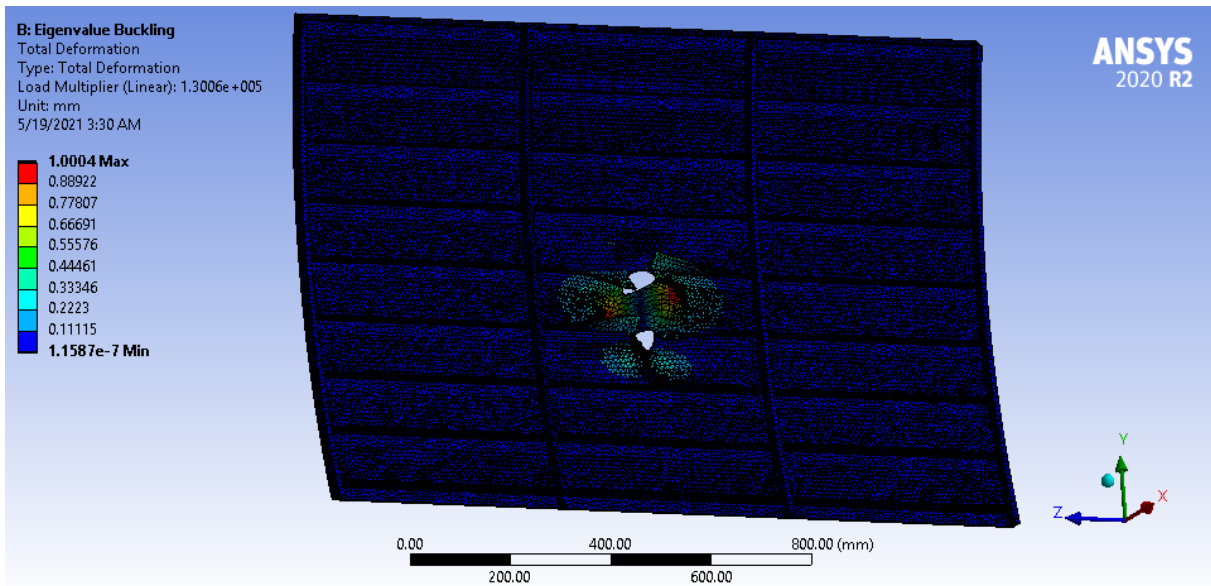
Obrázek 0.9 Poškození 70 mm



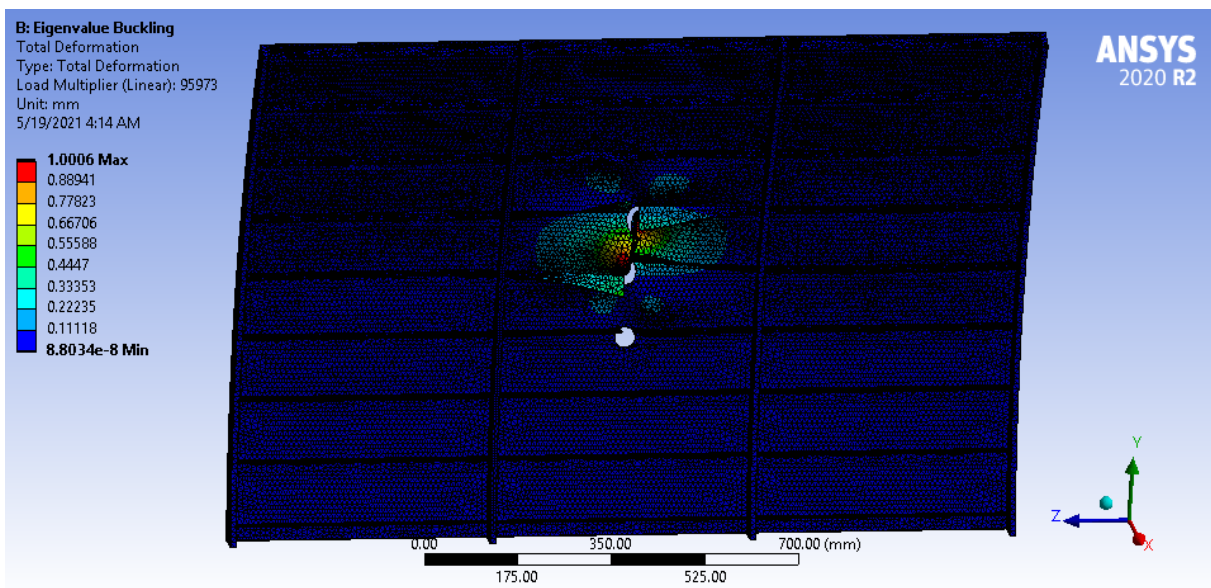
Obrázek 0.10 Poškození 80 mm

## Počet porušených podélníků

V grafu vychází první bod z neporušeného panelu a druhý z kapitoly o různé velikosti porušení (40 mm)

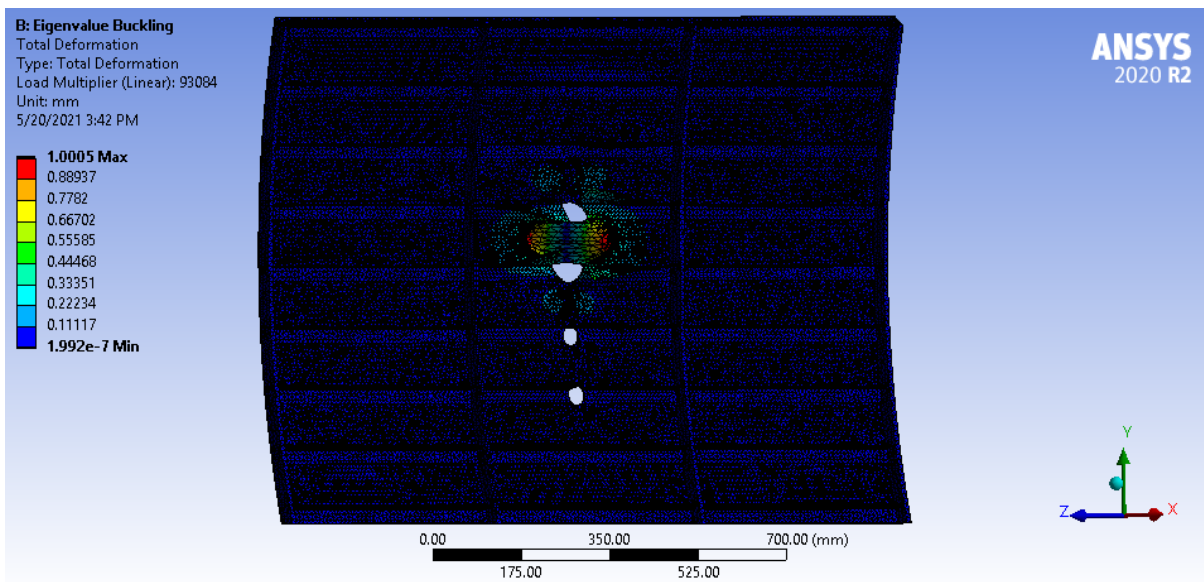


Obrázek 0.11 Porušení dvou podélných výztuh



Obrázek 0.12 Porušení tří podélníků





Obrázek 0.13 Porušení čtyř podélníků

## Poškození podélníku

