

# Zkouška odolnosti ochranné přilby

Zdeněk Roháček

---

Bakalářská práce  
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk Roháček**  
Osobní číslo: **T16676**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Zkouška odolnosti ochranné přilby**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Návrh a příprava experimentu
3. Realizace experimentu
4. Vyhodnocení měření



Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **DOLEŽEL, Břetislav. Odolnost plastů a pryží. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 710 s.**
2. **BROWN, Roger. Handbook of polymer testing: physical methods. New York: Marcel Dekker, c1999, x, 845 p. Plastics engineering (Marcel Dekker, Inc.), 50. ISBN 0824701712.**
3. **a dále dle doporučení vedoucího bakalářské práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

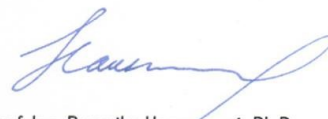
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2017**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ROHÁČEK ZDENĚK Obor: TECHNOLOGICKÁ ZÁŘÍZENÍ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 8.5.2017

Zdeněk Roháček

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá zkoušením vlastností ochranné přilby, které používají stavební dělníci. Teoretická část práce se zabývá popisem polymeru, ze kterých se tato přilba vyrábí, způsobem výroby přilby a dále mechanickými zkouškami. Cílem praktické části je navrhnout a provést zkoušku pádem, která se snímá vysokorychlostní kamerou a poté pomocí softwaru k tomu určenému se vyhodnotí.

Klíčová slova: zkoušky odolnosti, vysokorychlostní kamera, zkouška pádem

## **ABSTRACT**

The point of this work is resistance test of safety helmet, which is used by construction workers. The theoretical part deals with a description of polymer, which is used for safety helmets, a method of manufacturing the helmet and with mechanical tests. The aim of practical part is to suggest and perform a drop test, which is recorded by high-speed camera. Then with help of software is drop test evaluated.

Keywords: resistance test, high-speed camera, drop test

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky a trpělivost, kterou mi při vedení práce věnoval.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 OBECNÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI.....	12
1.2 ZPŮSOB VÝROBY A ZPRACOVÁNÍ.....	12
1.2.1 Výroba ABS .....	12
1.2.2 Zpracování ABS .....	13
<b>2 ZKOUŠKA PÁDEM</b> .....	<b>14</b>
2.1 METODY.....	14
2.1.1 Metoda volným pádem.....	15
2.1.2 Odrazová metoda .....	15
2.2 VYHODNOCENÍ.....	15
<b>3 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROVÝ SYSTÉM</b> .....	<b>16</b>
3.1 HISTORIE.....	16
3.1.1 Historie vysokorychlostní fotografie.....	16
3.1.2 Historie vysokorychlostních kamer.....	17
3.2 POPIS KAMERY .....	18
3.3 PRINCIP KAMERY .....	20
3.4 PODROBNÉ ZNALOSTI K TVORBĚ VYSOKORYCHLOSTNÍHO ZÁZNAMU .....	20
3.4.1 Snímací prvek.....	20
3.4.2 Osvětlení .....	21
3.4.2.1 Plošné osvětlovací pole.....	21
3.4.2.2 Kruhové osvětlovače.....	22
3.4.2.3 Kopulové osvětlovače.....	22
3.4.3 Rozlišení.....	23
3.4.4 Rychlost záznamu .....	23
3.4.5 Rychlost závěrky .....	24
3.5 OBLAST POUŽITÍ.....	25
3.5.1 Použití v medicíně.....	25
3.5.2 Použití ve sportu.....	25
3.5.3 Použití v oblasti přírodních věd .....	26
3.5.4 Použití v průmyslu .....	26
3.5.4.1 Výrobní linka .....	27
3.5.4.2 Automobilový průmysl .....	27
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>28</b>
<b>4 STANOVENÍ CÍLŮ</b> .....	<b>29</b>
<b>5 PŘÍPRAVA SCÉNY</b> .....	<b>30</b>
5.1 PADOSTROJ .....	30
5.2 ZÁVAŽÍ.....	31
5.3 OCHRANNÁ PŘILBA A JEJÍ UMÍSTĚNÍ .....	32
<b>6 SNÍMACÍ ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>33</b>



6.1	VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA .....	33
6.2	OSVĚTLENÍ.....	35
6.3	OBJEKTIV .....	35
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>36</b>
7.1	DOPADOVÁ ENERGIE 13,23 J.....	37
7.2	DOPADOVÁ ENERGIE 19,91 J.....	41
7.3	DOPADOVÁ ENERGIE 26,49 J.....	43
<b>8</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>46</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>48</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>49</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>56</b>

## ÚVOD

V dnešní době je rozvoj polymerů obrovský. Polymery můžeme obohacovat plnivy a různými dalšími přísadami, které přidáme do zpracovatelských směsí. Tyto přísady drasticky mění vlastnosti a díky nízké ceně začínají nahrazovat dražší výrobky pro stejný účel z nejrůznějších oborů. Vliv těchto změn můžeme například vyhodnotit pomocí mechanických zkoušek a zjistit zda polymer vyhovuje určitému výrobku či nikoliv.

Mechanické zkoušky slouží nejen pro kontrolu materiálu, ale také pro zjišťování vlastností materiálu. Těmito zkouškami zjišťujeme, zda materiál opravdu odpovídá předepsaným hodnotám a také ke snížení poruchovosti výrobků. Mechanických zkoušek je celá řada, mezi nejčastější patří zkouška tahem, tlakem, krutem, ohybem a stříhem.

Pro naši potřebu ale použijeme zkoušku pádem. Zkouška pádem představuje jeden ze způsobů měření houževnatosti polymerních materiálů. Zkouška nebude probíhat podle morny ale místo toho se výsledky budou vyhodnocovat pomocí vysokorychlostní kamery.

V současné době neustále rostou požadavky na snižování nákladů, zvyšování bezpečnosti i zdokonalování výrobních procesů. Právě v této oblasti jsou rozšířeny vysokorychlostní kamery. Ty umožňují díky vysokému počtu zaznamenaných snímků za sekundu lépe prozkoumat daný děj. S jejich pomocí je možné zastavit si obraz v potřebném okamžiku a následným zkoumáním odhalit chybu a zajistit nápravu.

Cílem této práce je úvod do daného problému, dále návrh, příprava a provedení zkoušky pádem. Poté pomocí záznamu z vysokorychlostní kamery vyhodnocení experimentu a porovnání výsledků.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 OBECNÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU

V této kapitole se budeme věnovat vlastnostem materiálu ABS a jejich významem pro odolnost ochranné přilby.

### 1.1 Základní vlastnosti

Při zkoušení ochranné přilby proti odolnosti je důležité, z jakého materiálu je daná helma vyrobena. Všechny ochranné přilby, které jsme testovali, byly vyrobeny z amorfního termoplastického průmyslového kopolymeru akrylonitrilbutadienstyrenu, který je více známý svojí zkratkou ABS. [3]

Nejdůležitějšími vlastnostmi a důvod proč se používá na výrobu přileb je jeho tepelná odolnost, pevnost, tvrdost, odolnost proti nárazu a odolnost proti poškrábání. Akrylonitrilbutadienstyren je obvykle používá v rozmezí od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ . ABS se například používá v automobilovém průmyslu dále na výrobu hraček (lego), telefonů nebo na kryty a helmy. [2]

Díky butadienové složce má ABS dobrou nárazovou houževnatost a to i při  $-40^{\circ}\text{C}$ , je teplotně stabilní, není nasákový vodou, je odolný proti vodním roztokům zásad a kyselin, alkoholům i olejům, ale má i nevýhody jako například malá odolnost proti povětrnostnímu stárnutí a proto se doporučuje používat pro interiérové aplikace. U nestabilizovaného polymeru ABS dochází k rychlému zhoršení mechanických vlastností krátce po venkovním vystavení. Projevem stárnutí je žloutnutí polymeru. Hlavní příčinou změny vlastností je vznik křehké vrstvy. Po odstranění vrstvy se vrátí původní vlastnosti polymeru. Proti stárnutí ABS se přidávají antioxidanty spolu s absorberem ultrafialového záření. [1]

### 1.2 Způsob výroby a zpracování

V následující kapitole se podíváme, jak se ABS vyrábí a zpracovává, aby se mohlo aplikovat na běžné potřeby.

#### 1.2.1 Výroba ABS

Termoplast ABS se skládá z akrylonitrilu, styrenu a butadienu a to vždy v určitém poměru podle toho jaké chceme, aby mělo výsledné ABS vlastnosti. Hlavní vlastnosti, které se liší při změně poměru, jsou tuhost a teplotní odolnost. Akrylonitril se vyrábí amoxidací propylenem díky které dostaneme karcinogenní, bezbarvou a jedovatou kapalinu. Styren je bez-

barvá kapalina se sladkým zápachem. Používá se buď jako rozpouštědlo nebo jako surovina na výrobu polymerů. Butadien se nejčastěji používá jako surovina pro výrobu polybutadienu a styren-butadienového kaučuku. Poměr jednotlivých surovin se nejčastěji pohybuje v rozmezí 15-35% akrylonitrilu, 40-60% styrenu a 5-30% butadienu. [3]

ABS se vyrábí blokovou nebo emulzní polymerací akrylonitrilu a styrenu za přítomnosti polybutadienu. Může se například také vyrábět roubováním kopolymeru styren-akrylonitril na butadien-styrenový kaučuk nebo koextruzí, nicméně většina výrobců používá polymeraci emulzní. [1] [2] [4]

### 1.2.2 Zpracování ABS

Terpolymer ABS se dobře zpracovává všemi běžnými technologiemi používaných u termoplastů: vstřikováním, vytlačováním, tvarováním za tepla, válcováním i vyfukováním. Výrobky z ABS se také mohou lepit či svařovat. Ve většině případů na zpracování ABS stačí běžné strojní zařízení. [23]

-Vstřikování: Tento způsob zpracování je velmi rozšířen. Používají se šnekové a pístové vstřikovací stroje. Je nutnost temperace forem a sušící zařízení, kvůli nasákavosti ABS. Používají se několik druhů ABS, které se liší ve viskozitě. [23]

-Vytlačování: Vytlačování desek, trubek a profilů zaujímá velkou část z objemu zpracování ABS. Zpracování vytlačováním nečiní potíže a nepotřebuje speciální stroje. Technologie je stejná jako vytlačování například PVC, PS a dalších polymerů. [23]

-Tvarování za tepla: Používá se jednoduché ruční nebo mechanické formování pomocí modelů a na výrobu tvarově složitých dutých výrobků. Tvarování za tepla je spolu s vstřikováním a vytlačováním nejrozšířenější. Zejména u velkých výrobků (o ploše až desítek čtverečních metrů). [23]

-Válcování: Válcováním se vyrábí fólie až do tloušťky 1 mm. Používají se čtyřválce nebo pětiválce. Výhodou je velká produktivita (desítky metrů za minutu) a kvalita povrchu. Teplota válců se pohybuje okolo 170 °C. [23]

-Vyfukování: Výrobky mají velkou tuhost, odolnost proti ohybu rázem a tvarovou stabilitu. Při konstrukci forem je potřeba počítat s malým smrštěním kolem 1%. Vyfukovací poměr (poměr průměru výrobku a vytlačovaného polotovaru pro vyfukování) nesmí být větší jak 2,5. [23]

## 2 ZKOUŠKA PÁDEM

Jedná se o zkoušku, kdy na výrobek, který chceme otestovat (v našem případě ochranná přilba), pouštíme z určité výšky závaží o určité hmotnosti. Padostroje představují další způsob měření houževnatosti polymerů, odstraní nedostatky kyvadlových přístrojů (volba rychlosti a energie). Padající těleso může mít libovolnou kinetickou energii (záleží na hmotě padajícího tělesa) i rychlost (záleží na výšce pádu). Jak vypadá takový padostroj, můžeme vidět na obrázku 1. [24]



Obr. 1 Padostroj [25]

Zkouška probíhá tak, že se na zkušební těleso nechá padat čidlo či ocelová kulička, jehož hmotnost může být navýšená. Hledá se taková zátěž, při které dojde ke zlomení aspoň 50% vzorků.

### 2.1 Metody

Zkoušek pádem existuje spousta druhů, my si v této práci vysvětlíme dvě metody.

### 2.1.1 Metoda volným pádem

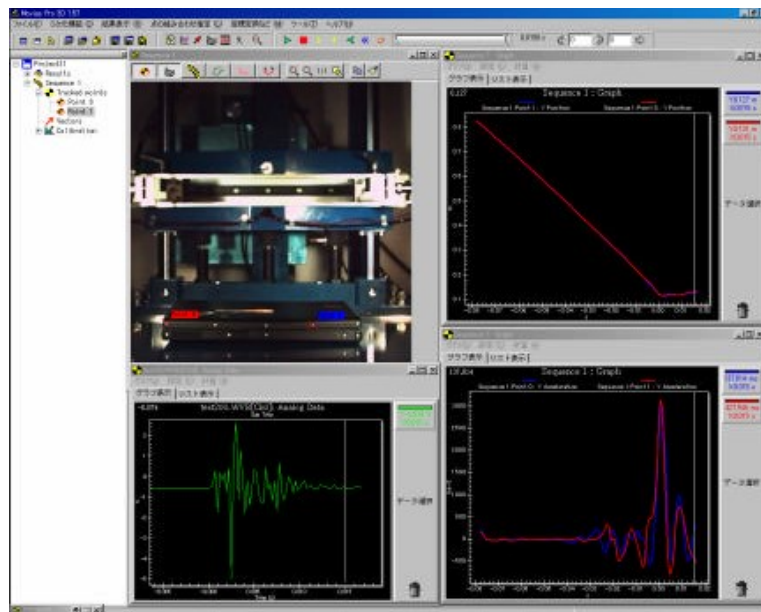
Kulička je u této metody umístěna v beranu, který se zpusť na zkušební vzorek z předem určené výšky. Výsledná tvrdost se potom určí jako podíl práce a objemu vtisku (měrná deformační práce). [26]

### 2.1.2 Odrazová metoda

Odrazovou metodu představil Shore. Používá se volný pád indentoru z určité přednastavené výšky a poté se sleduje odraz od zkoušeného výrobku, který se následně vyhodnotí podle norem. Tato metoda se hlavně používá u velmi tvrdých materiálů. [26]

## 2.2 Vyhodnocení

Vysokorychlostní kamery tady nacházení uplatnění při nahrávání padajícího předmětu. Po nahrání videa se nahrávka přenese do PC nebo jiného softwaru, kde se zpracuje. Pro zvýšení přesnosti se používají i akcelerometry. Záznam se poté přenese do speciálního softwaru MOVIAS. Program záznam vyhodnotí a výsledky přenese do grafu. Jedná se o graf posunutí, zrychlení i polohy. [7]



Obr. 2 Drop test Notebooku [27]

### 3 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROVÝ SYSTÉM

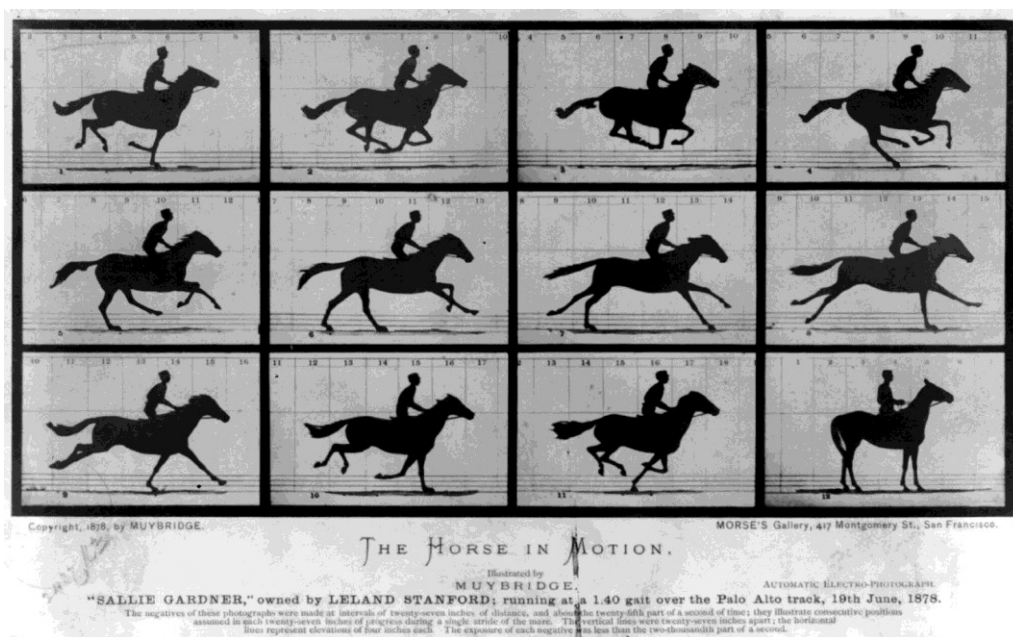
Digitální vysokorychlostní kamera je optoelektronické přenosné zařízení. Jeho základním cílem je tvorba záznamu pomocí velmi vysoké frekvence snímání. Moderní kamery vytváří i záznam zvuku. Dolní hranice 60 snímků za sekundu je minimální hodnota pro kamery, aby se o nich mohlo mluvit jako o vysokorychlostních. [5]

#### 3.1 Historie

Tato kapitola se zabývá historií vysokorychlostních kamer a jim předcházející historií fotografie.

##### 3.1.1 Historie vysokorychlostní fotografie

Počátky vysokorychlostních kamer se datují do 80. let 19. století. Za zakladatele vysokorychlostní fotografie se považuje Eadweard Muybridge známý také pod jménem Edward James Muggeridge (1830-1904). Princip jeho pokusů spočíval v současném použití několika fotoaparátů zároveň. Díky sázce o 25 000 amerických dolarů se snažil dokázat, že při běhu koně existuje okamžik, kdy se ani jedna noha nedotýká země. V budově rozmístil 24 fotoaparátů a pomocí provázků, které kůň přerhl, fotoaparáty fotili v přesně určeném čase. Důkaz mu trval 6 let (1873-1878) po kterých dokázal, že kůň se opravdu v určitém momentu nedotýká země. Při pokusu nafotil více než 20 000 snímků a již tehdy pracoval s expoziční dobou až 1/6000 sekundy. Sekvenci snímků je možné vidět na obr. 3.



Obr. 3 Výsledek pokusu Eadwearda Muybridge [9]



Zároveň předpověděl nutnost cílové fotografie, která byla poprvé provedena 25. června 1880 na koňských dostizích v New Jersey a potvrdila jeho slova. [8]

Na jeho práci navázal Harold Edgerton (1903-1990). Mluví se o něm jako o vynálezci stroboskopu. Tento vynález mu umožnil intenzivní osvětlení scény na určitou dobu, aby mohl zachytit i velmi rychlé jevy, které lidské oko nedokáže zachytit. Pomocí stroboskopu dokázal například zachytit let kulky nebo rozbití žárovky. I díky jeho výzkumu dnes můžeme používat noční vidění, fotografovat pod vodou nebo právě používat vysokorychlostní kamery. Jednu z mnoha jeho prací můžeme vidět na obr. 4. [7]



Obr. 4 Střela ze vzduchovky rozbíjí žárovku [2]

### 3.1.2 Historie vysokorychlostních kamer

Počátkem 60. let 20. století firma Redlake Laboratorie vyrobila vysokorychlostní kameru s rotujícím hranolem HYCAM, kterou můžeme vidět na obr. 5. Kamera měla klasický 16 mm film a dokázala zaznamenat až 10000 snímků za sekundu.

V 70. letech 20. století společnost Video Logic Corporation ukázala světu systém Insar, nebo například systém Unilux. Firma Sony používala Unilux, protože zvládl frekvenci 120 snímků za sekundu.

V 80. letech 20. století se poprvé objevili barevné kamery a to hlavně díky rozvoji elektroniky. Schopnost barevného zobrazení jako první ukázala firma NAC s technologií NAC

200, nicméně společnost NAC nebyla sama. Firma Palaroid a jejich systém Melkel 300 dokázal snímkovat až frekvencí 300 snímků za sekundu a prodával se až do roku 1982.



Obr. 5 Vysokorychlostní kamera HYCAM [7]

Začátkem roku 1994 se na trh s vysokorychlostními kamerami dostala i další firma. Tato firma se jmenovala Redlake Imaging a jako první pod svým jménem začala prodávat kameru MotionScope MS 300, dále také verze MS 250 a MS 500. Následně byly tyto přístroje nahrazeny systémy HR 250 a HR 500. Redlake Imaging ale hlavně změnila kompletně trh s kamerami a to díky nízkým pořizovacím nákladům. [7]

V dalších letech šel pokrok razantně dopředu a v roce 2003 vznikla kamera, která zvládne HD rozlišení 720p a ještě další zlepšení kamery proběhlo v roce 2005, kdy se vyrobila první kamera s full HD rozlišením 1080p. Tyto kamery se běžně používají například u živého sportovního vysílání pro zpomalené záběry.

### 3.2 Popis kamery

V dnešní době se vysokorychlostní kamery konstruuji dvěma způsoby. První způsob (obr. 6.) jsou kamery, které mají ovládání a displej přímo na kameře. Tyto kamery jsou rozšířené a to hlavně díky nízké ceně, snadnému použití a také díky dostačující snímkovací frekvenci 25-1000 Hz, která stačí pro požadavky v oboru. Kamery mají i další výhody jako například lehkost a kompaktnost oproti kamerám s příslušenstvím a tak se hlavně používají ve sportu nebo do továren.



Obr. 6 TS3 High-speed Camera [13]

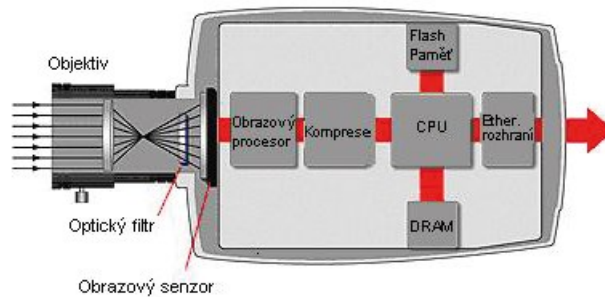
Druhý způsob výroby (obr. 7.) jsou kamery s dodatečným příslušenstvím (nejčastěji PC). Tyto kamery mají na rozdíl od kamer s displejem větší snímkovací frekvenci a tak se používají pro zachytávání rychlejších dějů. Je nutné, aby byla kamera připojena do počítače nebo k CDU. Jednotka CDU umožňuje ovládání kamery. Jejich nevýhodou je větší cena a potřeba dalšího vybavení. Použití je nejčastěji pro balistické testy, crash testy, zkoušky přileb. [7]



Obr. 7 OLYMPUS i-SPEED 2 [14]

### 3.3 Princip kamery

Vysokorychlostní kamery mají stejný způsob snímání obrazu jako běžné kamery.



Obr. 8 Princip kamery [12]

Stručný princip můžeme vidět na obr. 8. Světelné paprsky se dostanou přes objektiv na snímací část, kde se převedou na elektrický náboj. Obrazový procesor převede elektrický náboj na signál, který se převede na příslušný formát. Konečný záznam se potom uloží na flash paměť a ten je možné zhlédnout na displeji kamery popřípadě poslat do počítače či na jednotku CDU, kde se může záznam dále zpracovávat. [12]

### 3.4 Podrobné znalosti k tvorbě vysokorychlostního záznamu

Následující kapitoly mají za úkol rozvést určité části kamery nebo jejich prostředí pro zlepšení vysokorychlostního záznamu.

#### 3.4.1 Snímací prvek

Obrazový snímač nebo také čip je součástka, která je citlivá na světlo a mění světelné paprsky na elektrický náboj. Dnes mezi nejpoužívanější čipy patří CMOS snímač (Complementary Metal Oxide Semiconductor) a CCD snímač (Charge-Coupled Device) a dále mohou být monochromatické nebo barevné. [15]

Snímače ať už CCD nebo CMOS jsou důležité součástky vysokorychlostních kamer. Díky nim je možné ovlivnit velikost světločivné plochy snímače, barevnou hloubku, rozlišení či citlivost ISO. [15]

Senzor CMOS má větší rychlost záznamu než CCD a také je méně energeticky náročný a v neposlední řadě dokáže snímat pouze části snímače, což zlepšuje redukci rozlišení. A to je i důvod proč se používá u digitálních kamer. Nadruhou stranu senzor CCD dokáže dosáhnout vyšší kvality obrazu i většího rozlišení. Porovnání obou snímačů je uděláno v tabulce 1. [15]

Tab. 1 Rozdíly snímače CCD oproti CMOS [15]

Rozdíly CCD versus CMOS		
Snímací čip	CCD	CMOS
Cena	vysoká	nízká
Rozměry řešení	vyšší	nízké
Spotřeba	vysoká	nízká
Kvalita obrazu	vysoká	nižší až nízká
Rozlišení	vysoké	střední
Komplexnost čipu	vysoká	nižší až nízká
Fill faktor (činná plocha)	vysoký	nízký až střední
Digitální šum	nízký	vysoký
Rychlost	nižší až vysoká	vysoká
Dynamický rozsah	vysoký	nižší
Možnost výřezu	nativně žádná	ano

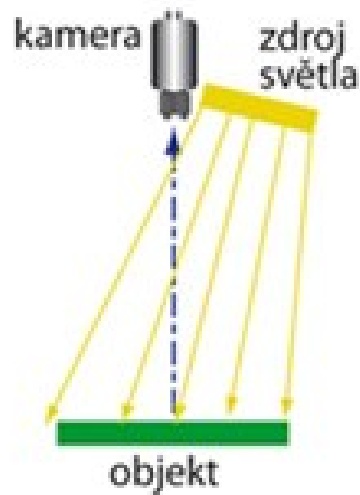
### 3.4.2 Osvětlení

Při natáčení s kamerou, která má vysokou frekvenci snímkování dochází k problémům se světlem. Normální denní světlo by nestačilo, záznam by byl příliš tmavý a nepoužitelný k dalšímu účelu. To je důvod, proč se přidávají osvětlovače. Cílem je zajistit maximální kontrast důležitých částí oproti částem v pozadí, které nejsou tak potřebné. Nejčastěji se používají halogenová světla či LED svítidla.

V dnešní době se používají hlavně LED světla, tyto osvětlovače mají malou spotřebu, vlastnosti světla se skoro nemění, snadno se regulují a nepotřebují ani vysoké napětí. Je možné koupit velké množství různých druhů svítidel například rozdělených podle geometrie, účinnosti, barvy světla, velikosti celého svítidla atd. [16]

#### 3.4.2.1 Plošné osvětlovací pole

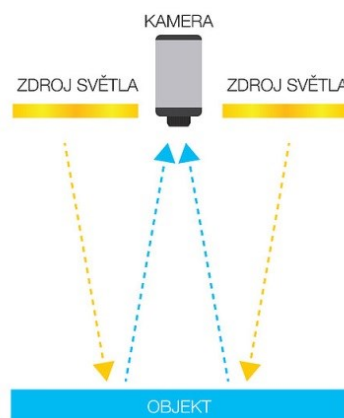
Nejčastěji poskytují směrované světlo. Rozptýlení je dáno vyzařovacím úhlem použitých diod LED. Mnohdy mohou nahradit i dražší osvětlení pokud to pokus dovoluje. Často se používají jako pomocná světla nebo součástí větších osvětlovacích sestav. Princip je možné vidět na obr. 9. [16]



Obr. 9 Plošné osvětlovací pole [17]

### 3.4.2.2 Kruhové osvětlovače

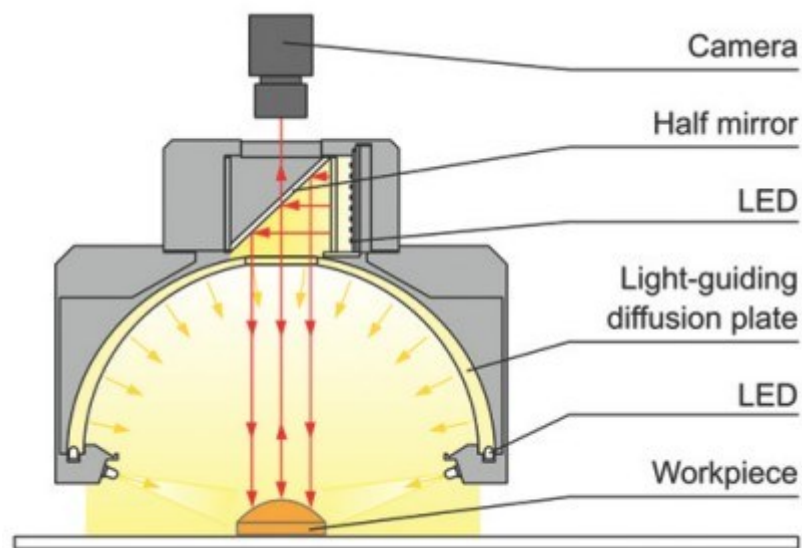
Poskytují rozptýlené světlo směrem od objektivu. Výrobci někdy přidávají tento druh osvětlení přímo na objektiv kamery v podobě jednoduchého LED kruhu. Tento typ osvětlení ale nemá zcela ideální vlastnosti.[16]



Obr. 10 Kruhové osvětlovače [18]

### 3.4.2.3 Kopulové osvětlovače

Používají se, když je nutné rozptýlené světlo. Světlo se vytváří difuzním odrazem na vnitřní ploše polokoule. Osvětlení se také nazývá bezstínové. [16]



Obr. 11 Kopulové osvětlovače [19]

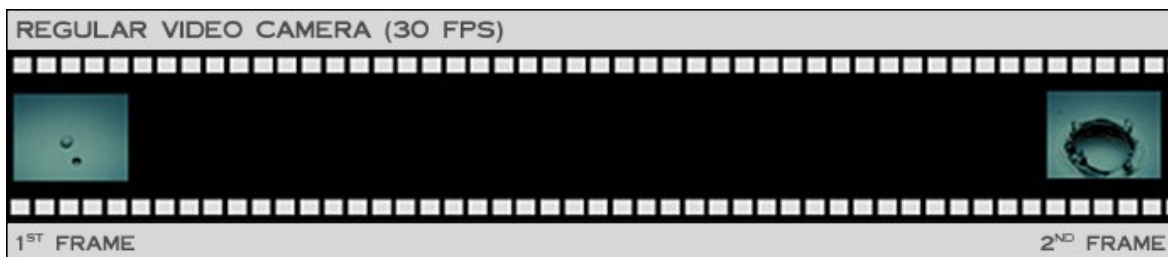
### 3.4.3 Rozlišení

Základní stavební jednotkou je pixel, který nese informaci o barvě a jas. Celkové rozlišení je počet vynásobených mezi sebou pixelů v horizontální a vertikální rovině například 1024 x 768. Rozlišení především určuje snímací prvek. Rozlišení určuje kvalitu při detailech i tisku. U vysokorychlostních kamer se nejčastěji používá rozlišení 1280 x 1024. [6]

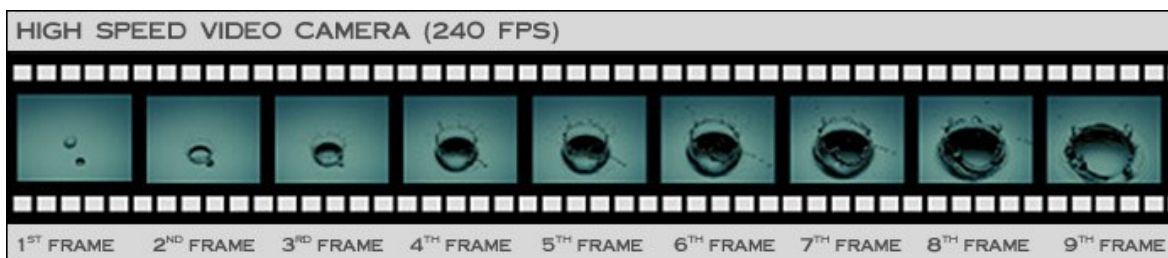
### 3.4.4 Rychlost záznamu

Nejspíš nejdůležitější vlastností vysokorychlostní kamery je možnost zachytit mnoho snímků za sekundu. Tato rychlost snímání se značí fps (frames per second) nebo také Hz. Běžné kamery mají 25 fps, což je dostačující pro normální jevy, protože lidské oko již vnímá jako obraz plynulý a tak není potřeba vyrábět kamery s větším počtem fps. Při ději, který trvá zlomek sekundy se musí využít vysokorychlostní kamery, které dokáží zachytit i takto rychlý jev. Následně se může záznam z kamery zpomalit a vyhodnotit potřebné informace. Dnešní vysokorychlostní kamery mají kolem 20000 fps.

U vysokého kmitočtu snímání jsou velké požadavky na rychlost zpracování a uložení snímků, což klade vysoké požadavky na RAM a Flash paměť. Toto se dá kompenzovat snížením počtu pixelů, ale zase se snižuje rozlišení a je těžší záznam vyhodnotit. [20]



Obr. 12 Kamera 30fps [20]



Obr. 13 Kamera 240fps [20]

Porovnání vysokorychlostní kamery od běžné je možné vidět na obrázku 12 a 13. Když zachytíme stejný jev běžnou kamerou (30 snímků za sekundu), je vidět, že zatímco běžná kamera zachytí pouze 1 snímek, dokáže udělat vysokorychlostní kamera (240 snímků za sekundu) hned 8 snímků. Kdybychom dobu dvakrát prodloužily, vysokorychlostní kamera by měla zachycených už 16 snímků, zatímco běžná kamera pouze 2. [20]

### 3.4.5 Rychlost závěrky



Obr. 14 Rozdíl mezi snímkem s dobou expozice 2s a 3,125ms [21]

Další důležitý parametr kamery je čas, jaký může na snímací prvek dopadat světlo. Tomuto parametru se říká čas závěrky nebo doba expozice. Rozdíl v době expozice je možné vidět na obr. 14. Když je doba expozice moc dlouhá, snímek bude rozmazaný, avšak pokud by byla moc krátká, dokáže pohyb tzv. zmrazit. Při nižší době expozice je nutné uspokojit vyšší nároky na osvětlení.

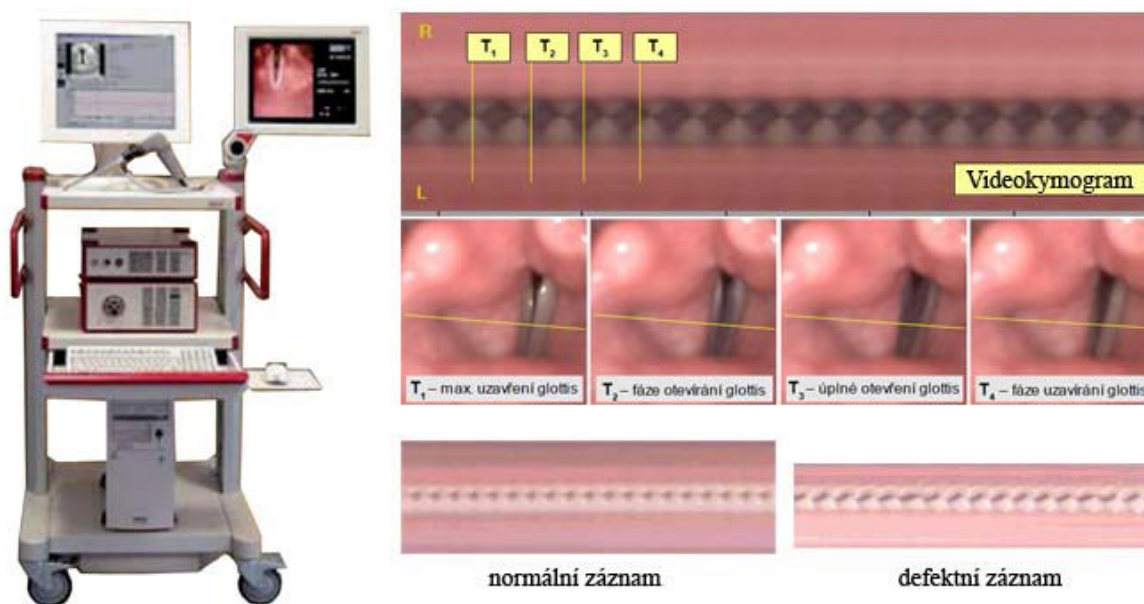


### 3.5 Oblast použití

Vysokorychlostní kamery se používají ve stále více oborech a odvětvích, kde je nutné monitorovat či analyzovat nějaký rychlý jev. Hlavní zásluhu na tom má klesající cena, více výrobců a také více druhů kamer. Kamery se používají na výzkumy, zkoušky, kontroly kvality a bezpečnosti, výrobních procesech atd. Oblasti použití mohou být rozděleny do mnoha kategorií, v této práci je budeme dělit podle oborů.

#### 3.5.1 Použití v medicíně

Jednou z důležitých aplikací vysokorychlostních kamer je ve zdravotnictví. Videokymografie, jedna z nejpoužívanějších metod, se používá k diagnostice hlasivek. Sledovat lze funkci hlasivek například pomocí sestavy WOLF, který dokáže zachytit až 8000 fps. Podle vyhodnocení lze nalézt karcinom nebo defektní hlasivku. Na obr. 15 je možné vidět sestavu WOLF, normální a defektní záznam videokymogram. [6]

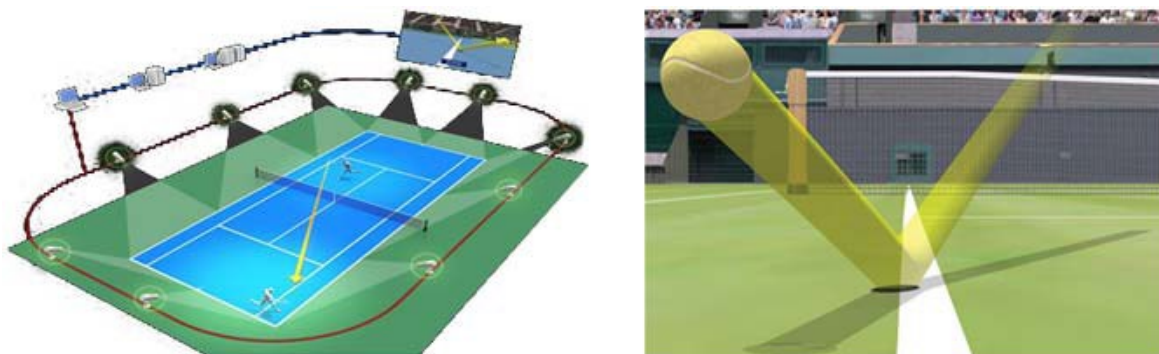


Obr. 15 Sestava WOLF a videokymogram [6]

#### 3.5.2 Použití ve sportu

Důležitou roli hrají kamery i ve sportu. Již těžko bychom hledali sport, ve kterém se nepoužívají vysokorychlostní kamery ať už k určení vítěze nebo dodržování pravidel. Dobrý příklad je tenis. Rychlosti míčků jsou občas tak vysoké, že je těžké určit, jestli míček dopadl mimo hřiště nebo do něho. S tímto problémem pomáhá Jestřábí Oko (Hawk Eye). Deset kamer je umístěno s rozestupy okolo hřiště. Snímají pohyb míčku a pomocí softwaru jsou

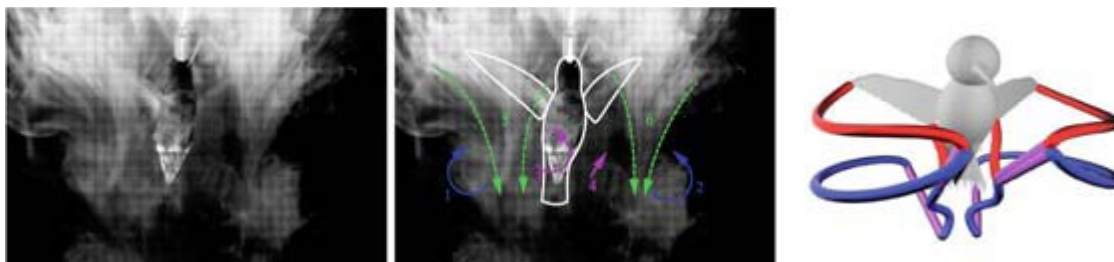
vyhodnocovány a následně poslány rozhodčímu. Software dokáže určit trajektorii již krátce po odpalu a také pomáhá se statistikami jako například rychlost. Kamery se nejenom používají při profesionálních utkáních, ale i při tréninku, kde pomáhají sportovcům zlepšit techniku atd. [6]



Obr. 16 Rozmístění kamer a práce Jestřábího oka [6]

### 3.5.3 Použití v oblasti přírodních věd

Zde spadá analyzování všeho od fyzikálních zákonů až po živočichy. Díky výzkumu pomocí vysokorychlostních kamer například víme jak lítá kolibřík. Vznikl s více kamerami z různých úhlů. Kamery měli frekvenci 1000 snímků za sekundu. Na obrázku 17 je možné vidět několik snímků z tohoto pokusu. [22]



Obr. 17 Výzkum letu kolibříka [22]

Mnoho těchto výzkumů se následně uplatňuje i v průmyslu. Například silové působení, chemické reakce a jiné. Použití je také možné ve vzdělávání či přípravě zábavných videozáznamů.

### 3.5.4 Použití v průmyslu

Vysokorychlostní kamery jsou hojně využívány i v mnoha odvětvích průmyslu. Používají se k výzkumu, testování, či zlepšení účinnosti. Častěji se používají kamery s 30-120 fps, protože tyto kamery mají menší rozměry, výroba těchto kamer je lehčí a hlavně jsou podstatně levnější. V této práci ukážeme pouze několik aplikací.

### 3.5.4.1 Výrobní linka

U výrobních linek je snaha o co nejrychlejší a nejplynulejší provoz linky. Spousta drobných vad, které člověk nezachytí, nakonec vedou k častějším poruchám a výroby více zmetků. Právě tyto nedokonalosti se dají odhalit pomocí vysokorychlostních kamer a následně odstranit. Používají se například v nastavování, seřizování, údržbě a také dohlíží na dopravníky, obráběcí nebo stříhací stroje. Ukázka kontroly výroby je možné vidět na obr. 18. [7]



Obr. 18 Zátkovací zařízení [6]

### 3.5.4.2 Automobilový průmysl

Bezpečnost je jedním z hlavních faktorů v automobilovém průmyslu. Nemalý podíl na tom mají právě vysokorychlostní kamery. Náraz probíhá ve zlomku sekundy a je nutné na něm zachytit a zkoumat co možná nejvíc informací. Pomocí kamery se vyhodnocují testy jako čelní nárazová zkouška při rychlosti 64 km/hod do přesazené deformovatelné bariéry, boční nárazová zkouška při rychlosti 50 km/hod, boční náraz do stromu při rychlosti 29 km/hod a zkoušky bezpečnosti chodců při rychlosti 40 km/hod. [7]

Výsledky nárazu se vyhodnocují na jednotlivé lidské partie. Jednotlivé části lidského těla kamera nasnímá pomocí bodů, které jsou k nim přidělané. Následně se záznam vyhodnotí a zjistí se, jak velké zranění náraz způsobil. Vyhodnocuje se zranění u řidiče, spolujezdce, dětí i chodců. [7]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 STANOVENÍ CÍLŮ

Praktická část se dále dle zadání zabývá zkouškou pádem a jejím zaznamenáním pomocí vysokorychlostní kamery. Záznamy z této kamery byly vyhodnoceny v programu i-SPEED 2, který je určený pro kameru Olympus i-SPEED 2.

Mezi hlavní cíle bakalářské práce patří:

- Návrh a příprava experimentu
- Realizace experimentu
- Zaznamenání experimentu na vysokorychlostní kameru
- Vyhodnocení výsledků

## 5 PŘÍPRAVA SCÉNY

V této kapitole se budeme věnovat jednotlivým částem použitých při experimentu. Naše zaměření bude na důležité části pro scénu jako padostroj, závaží i samotnou přilbu a její umístění pod padostrojem. Pro lepší představu, jak celá scéna vypadala, se můžeme podívat na obr. 20.



Obr. 19 Scéna

### 5.1 Padostroj

Pro realizaci experimentu byl použit ruční padostroj, který je možné vidět na Obr. 21. Jedná se o padostroj, který umožňuje nastavitelnou výšku pádu i změnu závaží dle potřeby. Vhodný pro experiment je především v jednoduchosti, dále umožňuje snadno osvětlit a zaznamenat pád pomocí vysokorychlostní kamery.



Obr. 20 Ruční padostroj

## 5.2 Závaží

Pro testování přileb bylo vyrobeno závaží s nastavitelnou hmotností díky možnosti přidělení dalších částí závaží. Pro naše měření byla nastavena pouze jedna hmotnost a to 2,7 kg. Závaží bylo vysoustruženo pro tuto zkoušku, a proto je možné vidět zúžené zakončení, které je vhodné na prorážení. Závaží se v průběhu experimentu neměnilo.



Obr. 21 Vysoustružené závaží

### 5.3 Ochranná přilba a její umístění

Všech šest přileb, které se testovali, byly vyrobeny stejnou technologií (vstříkování) a ze stejného materiálu ABS. Důležité pro test odolnosti je místo dopadu závaží vzhledem k přilbě. Bylo vybráno místo s nejpravděpodobnějším místem úderu cizím tělesem. Jak vypadalo naše provedení, je možné vidět na obrázku 23.



Obr. 22 Umístění závaží vzhledem k přilbě



## 6 SNÍMACÍ ZAŘÍZENÍ

Pro záznam vysokorychlostního děje byla použita digitální vysokorychlostní kamera Olympus i-SPEED 2, která byla vynalezena firmou Olympus Optical Co. A vyrábí se ve Velké Británii.

### 6.1 Vysokorychlostní kamera

Kamera je určena pro snímání velmi rychlých dějů a umožňuje snímání až 33 000 snímků za sekundu. Šířka této kamery je 11,5 cm, výška je 11 cm, délka 13,3 cm a váží 2kg. Napájení je alternativně 220/110 V, přes napájecí zdroj upraveno na 12 Vss. Z kamery jsou pak napájeny všechny ostatní zařízení, které jsou k ní připojeny.



Obr. 23 Vysokorychlostní kamera Olympus i-SPEED 2

Kamera má rychlost snímání 60 – 33000 fps. S rostoucí rychlostí snímání klesá rozlišení, a proto by se měl volit kompromis mezi kvalitou a rychlostí. Obrázek 20 nám ukazuje příklady rozlišení a rychlostí.

Tab. 2 Příklady rozlišení a rychlostí

Počet snímků za sekundu	Rozlišení X	Rozlišení Y	Rozlišení snímku	Poměr zvětšení	Maximální expoziční čas
[fps]	[bod]	[bod]	[bod]		[ $\mu$ s]
1000	800	600	480000	1,00	1000
2000	576	432	248832	1,39	500
3000	448	336	150528	1,79	333
4000	384	288	110592	2,08	250
5000	320	240	76800	2,50	200
6000	288	216	62208	2,78	166
8000	256	192	49152	3,13	125
10000	224	168	37632	3,57	100
15000	160	120	19200	5,00	66,7
20000	128	96	12280	6,25	50,0
33000	96	72	6912	8,33	30,3

Vysokorychlostní děj je zaznamenáván do kruhové paměti. Poté je přenesen pomocí datového kabelu do počítače, kde se vyhodnotí pomocí softwaru. Kapacita paměti je 2 GB, proto je nutné záznam uložit před vypnutím napájení. Po vypnutí napájení se záznam smaže. Výhodou této kamery je její možnost ovládání více způsoby a proto se například používá tam, kde je nevhodné nebo nebezpečné prostředí.



Obr. 24 Zadní strana kamery i-SPEED 2

## 6.2 Osvětlení

Pro náš test bylo použito přímé osvětlení vyráběné firmou Olympus. Důležité je kvalitní nasvícení scény a její bodové zaostření. Pozici osvětlení vzhledem ke kameře je možné vidět na obrázku 26.



Obr. 25 Osvětlení kamery

## 6.3 Objektiv

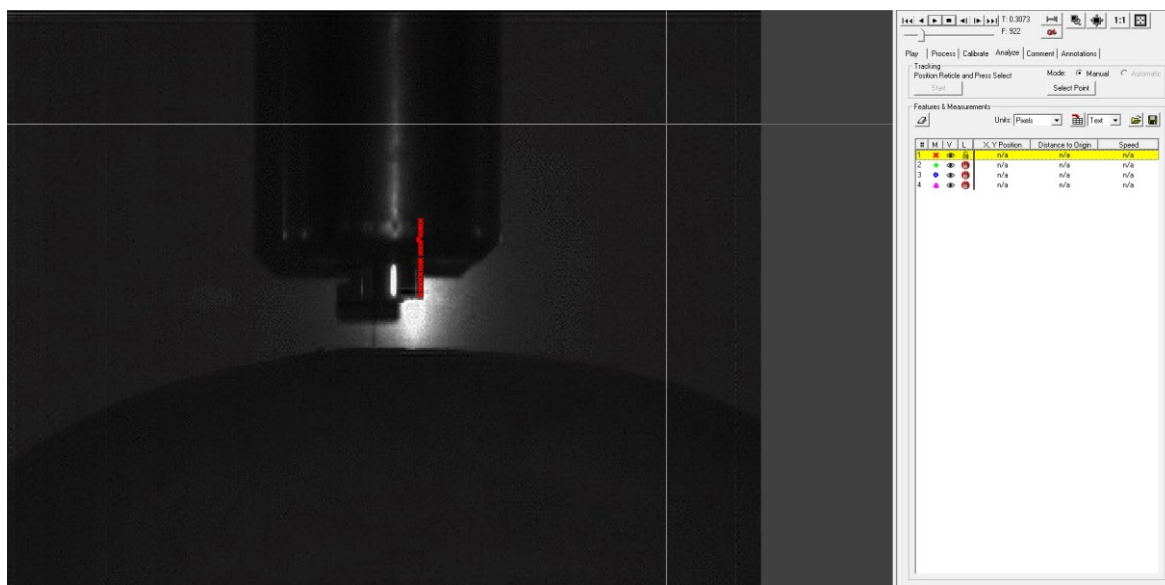
Další věcí pro kvalitní záznam z vysokorychlostní kamery je bezpochyby objektiv. Můžeme volit mezi řadou různých objektivů podle parametrů. Jako první parametr považujeme ohniskovou vzdálenost. U objektivů s delší ohniskovou vzdáleností je větší zvětšení, ale zase mají nižší světelnost. Pokud je kamera blízko scény je možné použít objektiv s krátkou ohniskovou vzdáleností. Při naší zkoušce jsme ostřili na vzdálenost 50 cm. Objektiv použitý při experimentu můžeme vidět na obrázku 27.



Obr. 26 Objektiv

## 7 VYHODNOCENÍ

Vyhodnocení probíhalo v softwaru určeném pro vysokorychlostní kameru. Důležité byly vybrané body, které měnili svoji pozici vzhledem k nule souřadného systému. První bod, který se sledoval, byl zvolený na padajícím závaží. Tento bod byl použit pro zmapování délky pádu závaží na zvoleném úseku. Druhý bod, který se sledoval, byl nejvyšší bod přilby a zároveň bod na který dopadal konec závaží. Třetí bod byl náhodně zvolený bod na okraji přilby pro lepší pochopení chování přilby. Vyhodnocení probíhalo po jednotlivém snímku. Ukázkou vyhodnocení v softwaru pro vysokorychlostní kameru můžeme vidět na obrázku 28.



Obr. 27 Ukázkou vyhodnocení bodu 1

Data byly dále převedeny do Excelu, kde se zpracovávali pro větší přehlednost. Měření bylo provedeno pro 6 přileb a to ve třech měnících se výškách pádu. Hmotnost závaží se po dobu experimentu neměnila. U každé výšky pádu byla také spočítána dopadová rychlost závaží i energie závaží. Dopadová rychlost závaží byla vypočtena pomocí vzorce:

$$v = \sqrt{2 * g * h} \quad (1)$$

Kde

g ... gravitační zrychlení  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

h ... Výška pádu [m]

A energie byla vypočtena pomocí vzorce:

$$E = \frac{m * v^2}{2} \quad (2)$$

Kde

m ... hmotnost závaží [g]

v ... rychlost  $\left[\frac{m}{s}\right]$

Dopadová rychlost a energie pro pád z výšky 50 cm:

$$v = \sqrt{2 * g * h} = \sqrt{2 * 9,81 * 0,5} = 3,13 \text{ m} * \text{s}^{-1} \quad (1)$$

$$E = \frac{m * v^2}{2} = \frac{2,7 * 3,13^2}{2} = 13,23 \text{ J} \quad (2)$$

Dopadová rychlost a energie pro pád z výšky 75 cm:

$$v = \sqrt{2 * g * h} = \sqrt{2 * 9,81 * 0,75} = 3,84 \text{ m} * \text{s}^{-1} \quad (1)$$

$$E = \frac{m * v^2}{2} = \frac{2,7 * 3,84^2}{2} = 19,91 \text{ J} \quad (2)$$

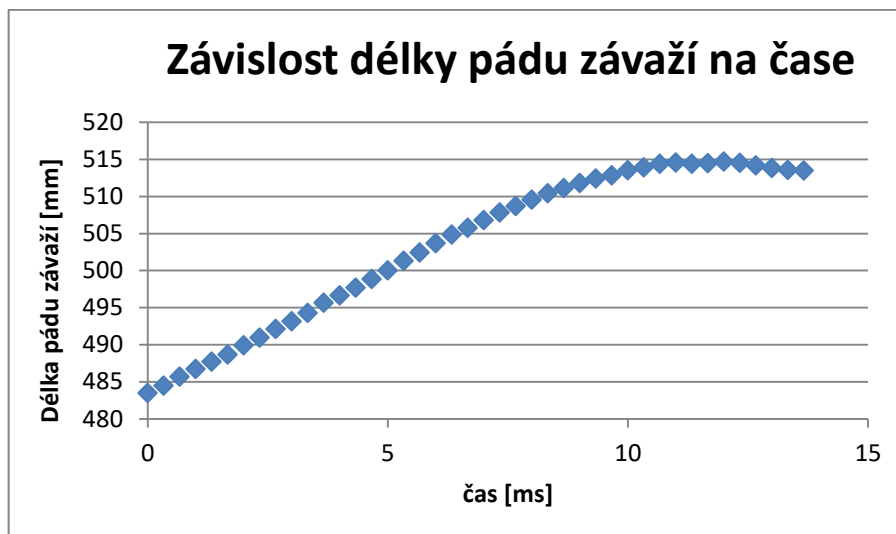
Dopadová rychlost a energie pro pád z výšky 100 cm:

$$v = \sqrt{2 * g * h} = \sqrt{2 * 9,81 * 1} = 4,43 \text{ m} * \text{s}^{-1} \quad (1)$$

$$E = \frac{m * v^2}{2} = \frac{2,7 * 4,43^2}{2} = 26,49 \text{ J} \quad (2)$$

## 7.1 Dopadová energie 13,23 J

V první části zkoušky bylo pouštěno závaží o hmotnosti 2,7 kg z výšky 50 cm s dopadovou energií 13,23 J. Výsledky byly vyhodnoceny v programu Excel, kde se vypočetly průměry, směrodatné odchylky a nakonec se data převedly do grafu. Jako první byl vyhodnocen bod 1, ze kterého jsme po následných přepočtech dostali graf závislosti délky pádu na čase.



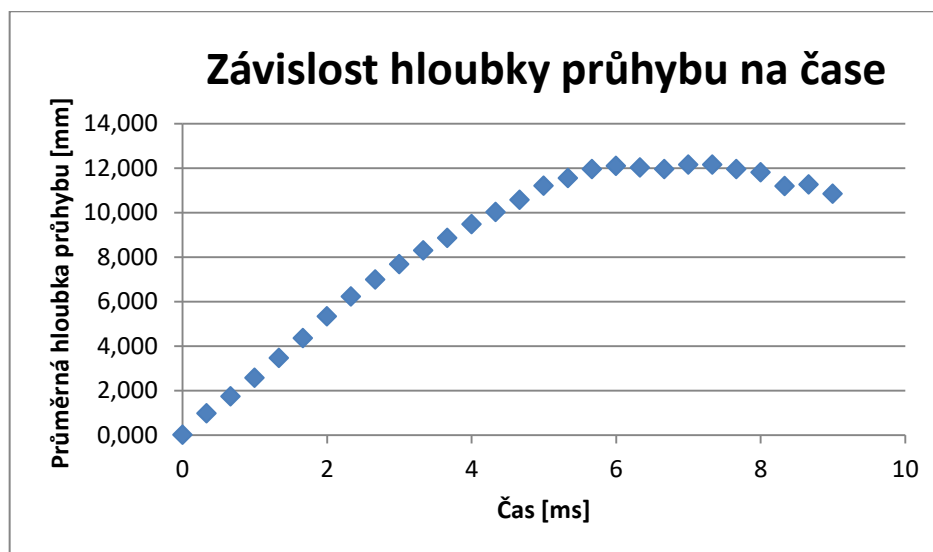
Obr. 28 Závislost Délky pádu závaží na čase 50 cm

Na obr. 29 je možné vidět závislost délky pádu na čase. V první části od 0ms do 9ms je lineární přírůstek délky pádu. V čase 5ms závaží dopadne na přilbu a má kinetickou energii 13,23 J. Od času 9ms se přírůstek zpomaluje až do času 12ms, kdy je délka pádu závaží nejvyšší a to 514,645 mm. Poté se závaží odráží od přilby a tím pádem klesá i délka pádu.

Tab. 3 Tabulka závislosti délky pádu na čase 50 cm

Čas [ms]	Délka pádu [mm]	Čas [ms]	Délka pádu [mm]
0,000	483,488	7,000	506,777
0,333	484,455	7,333	507,814
0,667	485,698	7,667	508,644
1,000	486,735	8,000	509,543
1,333	487,702	8,333	510,371
1,667	488,671	8,667	511,061
2,000	489,915	9,000	511,751
2,333	490,952	9,333	512,374
2,667	492,125	9,667	512,788
3,000	493,162	10,000	513,479
3,333	494,269	10,333	513,892
3,667	495,650	10,667	514,374
4,000	496,618	11,000	514,512
4,333	497,652	11,333	514,371
4,667	498,825	11,667	514,439
5,000	500,000	12,000	514,645
5,333	501,313	12,333	514,506
5,667	502,421	12,667	514,161
6,000	503,667	13,000	513,814
6,333	504,840	13,333	513,536
6,667	505,739	13,667	513,466

Bod 2: Druhý bod, který se sledoval, byl zvolen na přilbě a bylo to místo s nejpravděpodobnějším místem úderu cizím tělesem



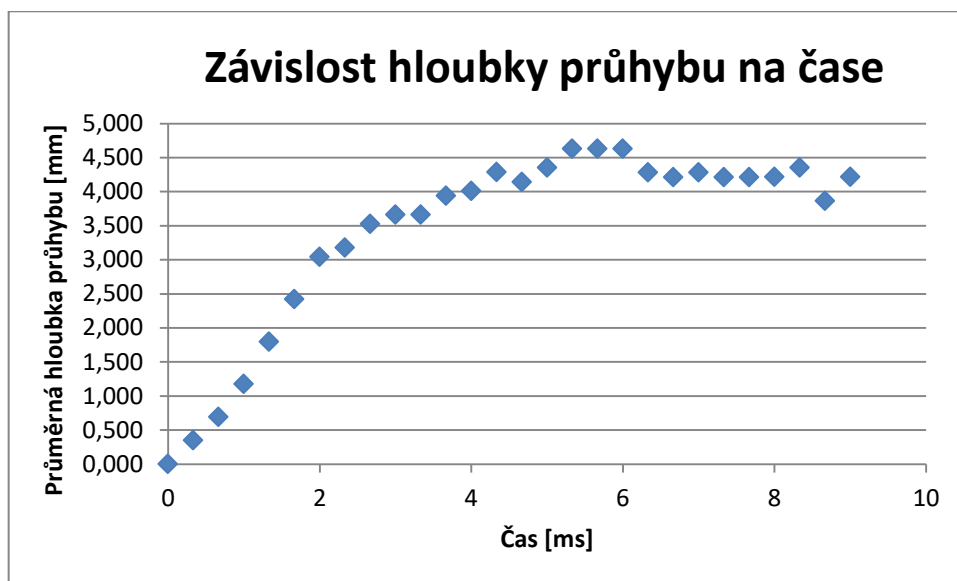
Obr. 29 Závislost průměrné hloubky hlavního průhybu na čase 50 cm

Na obr. 30 vidíme závislost hloubky průhybu na čase. V čase 0ms se závaží poprvé dotkne přilby. Od času 0ms až do času 5ms je lineární přírůstek hloubky. Od času 6ms do času 8ms se průhyb pohybuje kolem konstantních hodnot, největší průhyb je v čase 7ms a rovná se hodnotě 12,15 mm. Od času 8ms se závaží odráží od přilby a s tím se vrací i přilba do normálního stavu.

Tab. 4 Tabulka průměrné hloubky hlavního průhybu 50 cm

Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]	Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,000	0,000	4,667	10,570	0,774
0,333	0,968	0,627	5,000	11,191	0,667
0,667	1,729	0,718	5,333	11,535	0,717
1,000	2,558	0,721	5,667	11,949	0,737
1,333	3,456	0,632	6,000	12,085	0,837
1,667	4,352	0,503	6,333	12,014	0,913
2,000	5,321	0,562	6,667	11,942	1,269
2,333	6,217	0,450	7,000	12,151	1,146
2,667	6,978	0,493	7,333	12,151	1,092
3,000	7,669	0,642	7,667	11,944	1,255
3,333	8,292	0,487	8,000	11,804	1,542
3,667	8,844	0,644	8,333	11,181	1,766
4,000	9,464	0,600	8,667	11,249	1,860
4,333	10,017	0,755	9,000	10,831	2,151

Bod 3: Třetí bod byl jako druhý také zvolen na přilbě, ale tentokrát na boční straně přilby mimo dopad závaží



Obr. 30 Závislost průměrné hloubky vedlejšího průhybu na čase 50 cm

Na obr. 31 je vidět závislost vedlejší hloubky na čase. Tak jako v bodě 2, je 0ms čas, kdy se závaží poprvé dotkne přilby. Od 0 do 2ms můžeme vidět lineární přírůstek hloubky vedlejšího průhybu. V čase od 2 do 4ms se přírůstek zpomalil, ale roste až do času 5ms, od kterého se hloubka průhybu pohybuje kolem konstantních hodnot. Největší průhyb je 4,63 mm a to v čase 5,33ms.

Tab. 5 Tabulka průměrné hloubky vedlejšího průhybu 50 cm

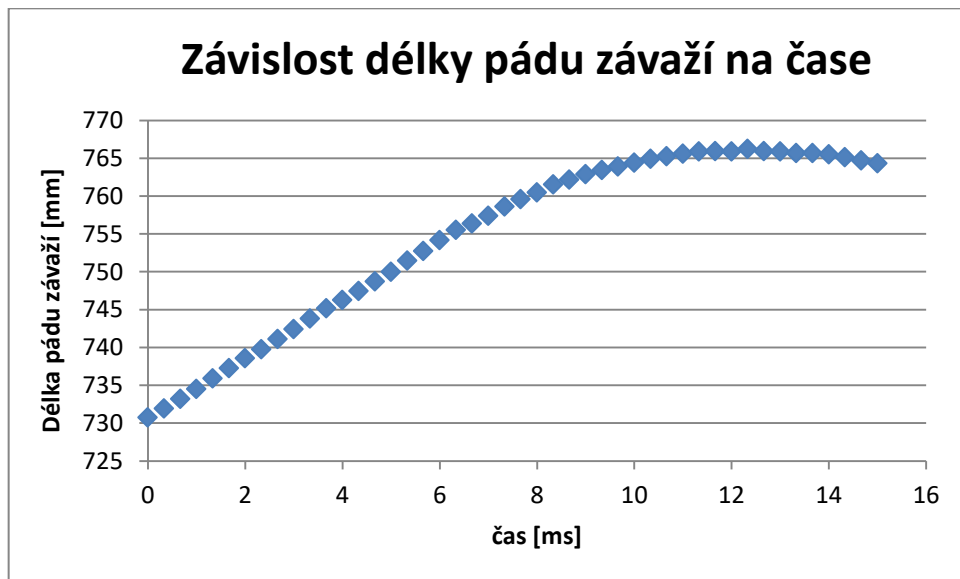
Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]	Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,000	0,000	4,667	4,143	0,501
0,333	0,346	0,313	5,000	4,350	0,661
0,667	0,692	0,571	5,333	4,628	0,792
1,000	1,175	0,316	5,667	4,627	0,950
1,333	1,798	0,438	6,000	4,628	0,658
1,667	2,420	0,425	6,333	4,283	0,678
2,000	3,043	0,451	6,667	4,209	0,778
2,333	3,178	0,338	7,000	4,282	0,852
2,667	3,524	0,229	7,333	4,213	0,473
3,000	3,662	0,411	7,667	4,213	0,468
3,333	3,662	0,411	8,000	4,214	0,408
3,667	3,940	0,592	8,333	4,351	0,665
4,000	4,010	0,704	8,667	3,866	0,471
4,333	4,286	0,750	9,000	4,214	0,485



Po každé zkoušce byla každá jednotlivá přilba zkontrolována na případné poškození. Ani 1 z 6 přileb nebyla viditelně poškozena a všechny byly použity při zkoušce z větší výšky.

## 7.2 Dopadová energie 19,91 J

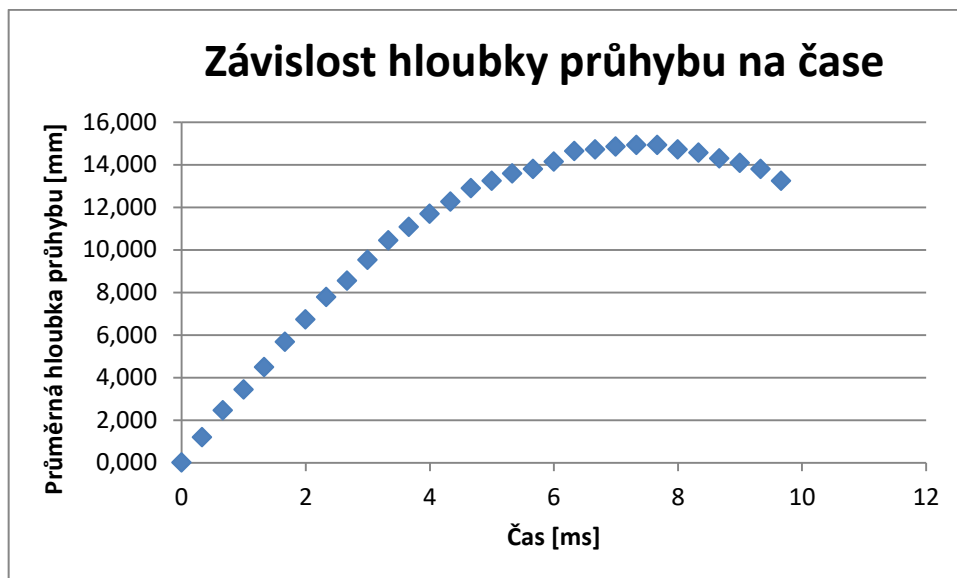
V druhé části zkoušky bylo závaží o nezměněné hmotnosti pouštěno z výšky 75 cm. Jako první byl vyhodnocen bod 1: Délka pádu závaží.



Obr. 31 Závislost Délky pádu závaží na čase 75 cm

Na obr. 32 je vidět závislost délky pádu závaží na čase pro dopadovou energii 19,91 J. Od času 0ms až do času 8ms je lineární přírůstek. Od 8ms se přírůstek snižuje až do času 12,33ms, kdy je délka pádu závaží nejvyšší a to 766,24 mm. Od tohoto času se závaží odráží od přilby a vrací se zpět až do konce našeho měření.

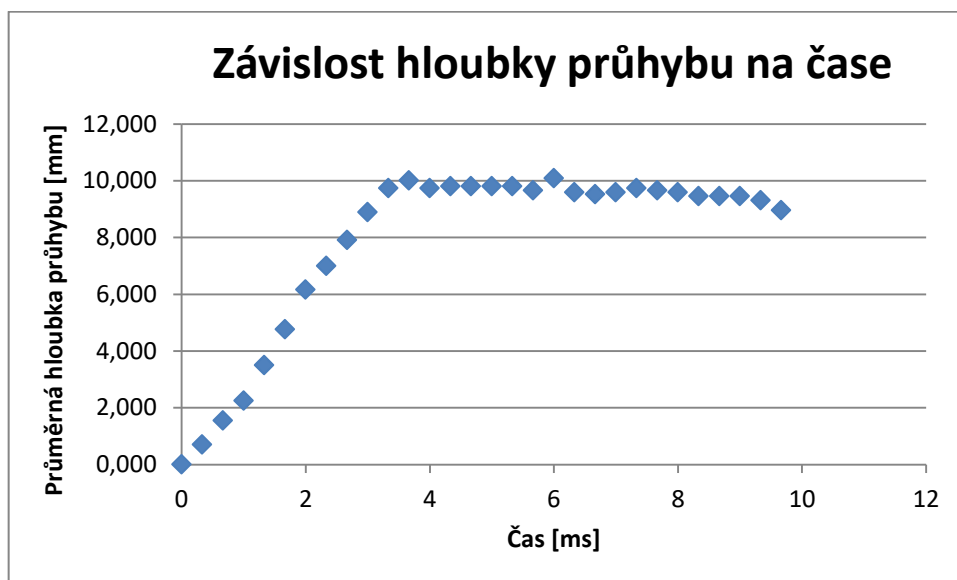
Bod 2: Hlavní průhyb



Obr. 32 Závislost průměrné hloubky hlavního průhybu na čase 75 cm

Na obr. 33 můžeme vidět závislost průměrné hloubky hlavního průhybu na čase pro dopadovou energii 19,91 J. Od času 0ms až do času 4ms vidíme strmý nárůst hloubky průhybu. Poté můžeme vidět menší nárůst a v čase 7,33ms je průhyb největší a to 14,91 mm. Od toho času se přilba vrací do původní polohy.

Bod 3: Vedlejší průhyb



Obr. 33 Závislost průměrné hloubky vedlejšího průhybu na čase 75 cm

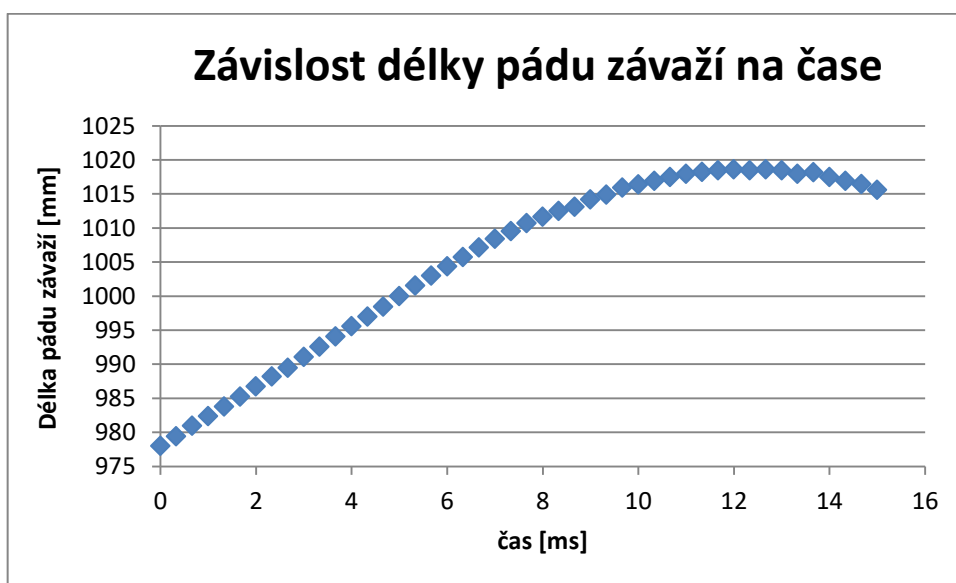
Na obr. 34 je znázorněna závislost průměrné hloubky vedlejšího průhybu na čase pro dopadovou energii 19,91 J. Od času 0ms až do času 4ms je lineární přírůstek průhybu. V čase

od 4ms do 9ms hloubka průhybu pohybuje kolem stejných hodnot. Nejvyšší hodnota je v čase 6ms a rovná se hodnotě 10,08 mm.

I po této části zkoušky byly přilby opět zkontrolovány. Tentokrát byla vidět i pouhým okem velmi malá prohlubeň.

### 7.3 Dopadová energie 26,49 J

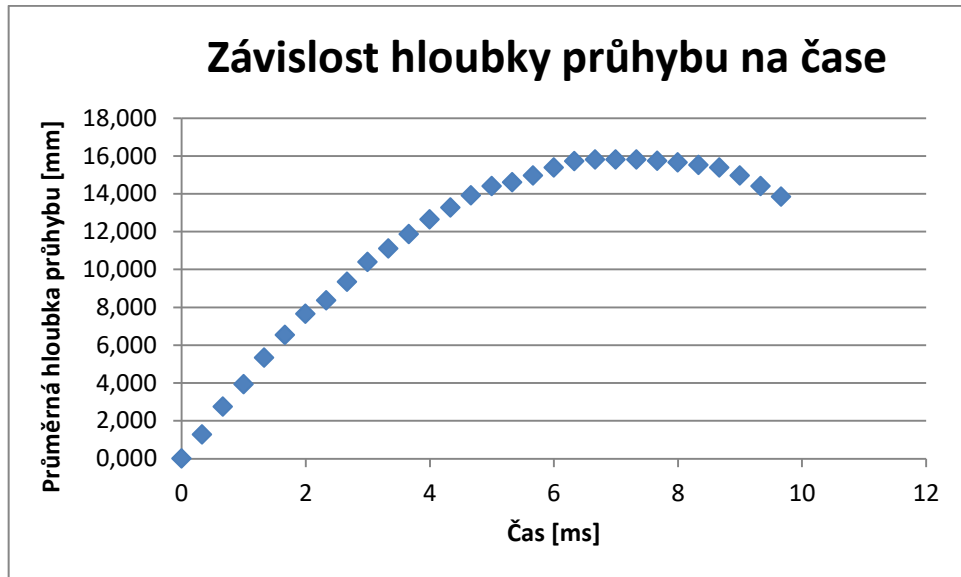
V poslední části zkoušky bylo závaží spouštěno z výšky 100 cm. Hmotnost závaží se i v tomto případě nezměnila. Vyhodnocení bylo opět provedeno v programu Excel. Bod 1: Délka pádu závaží.



Obr. 34 Závislost Délky pádu závaží na čase 100 cm

Na obr. 35 opět vidíme závislost Délky pádu závaží na čase tentokrát pro délku pádu 100 cm a pro dopadovou energii 26,49 J. Od začátku měření letí závaží volným pádem až do času 5ms, kde narazí na přilbu. Od času 5ms přilba postupně brzdí závaží a to až do času 12,66ms, kde má závaží největší délku pádu. Poté se závaží odráží od přilby a délka pádu klesá.

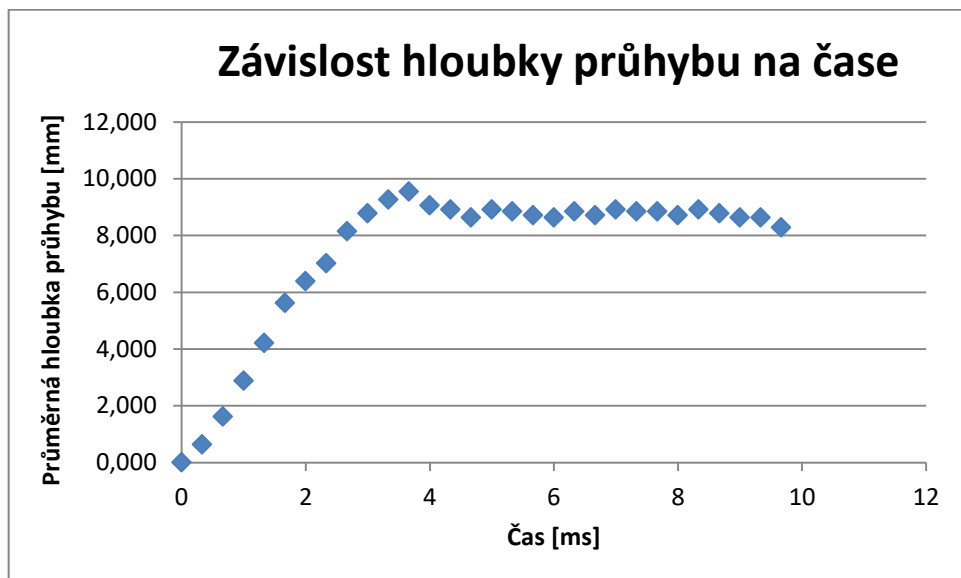
Bod 2: Hlavní průhyb



Obr. 35 Závislost průměrné hloubky hlavního průhybu na čase 100 cm

Jak se přilba chová při dopadové energii 26,49 J, můžeme vidět na obr. 36. Od času 0ms, kde závaží narazí na přilbu, se postupně zvětšuje hloubka hlavního průhybu až do času 7,33ms. V tomto čase je hloubka průhybu největší a to 15,80 mm. Od tohoto času se závaží opět odráží zpět.

Bod 3: Vedlejší průhyb



Obr. 36 Závislost průměrné hloubky vedlejšího průhybu na čase 100 cm

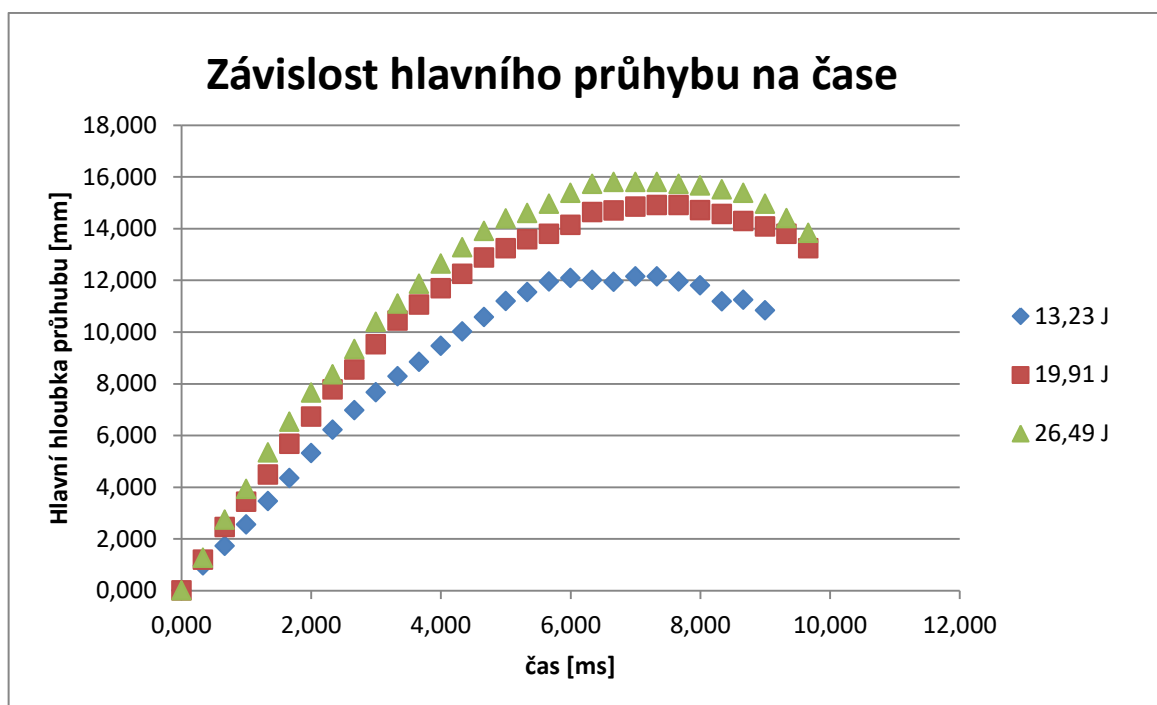
Jak vypadá průběh u vedlejšího průhybu, je znázorněné na obr. 37. Hloubka průhybu narůstá až do času 3,66ms. Poté poklesne a drží se kolem stejných hodnot až do 9ms. Od to-

hoto času se přilba vrací do původního tvaru. Největší hloubka průhybu je v čase 3,66ms a to 9,55 mm.

Po konečné zkoušce byly přilby opět zkontrolovány. Prohlubeň, která byla větší než u předchozích výšek pádu, dosahovala i několik milimetrů. Navíc u některých přileb vznikaly rýhy od závaží, které se většinou po prvním odrazu a následném dopadu sklouzlo po přilbě. Přilba se již v žádném případě nehodila na jakékoli další testy, protože by zkreslovala výsledky.

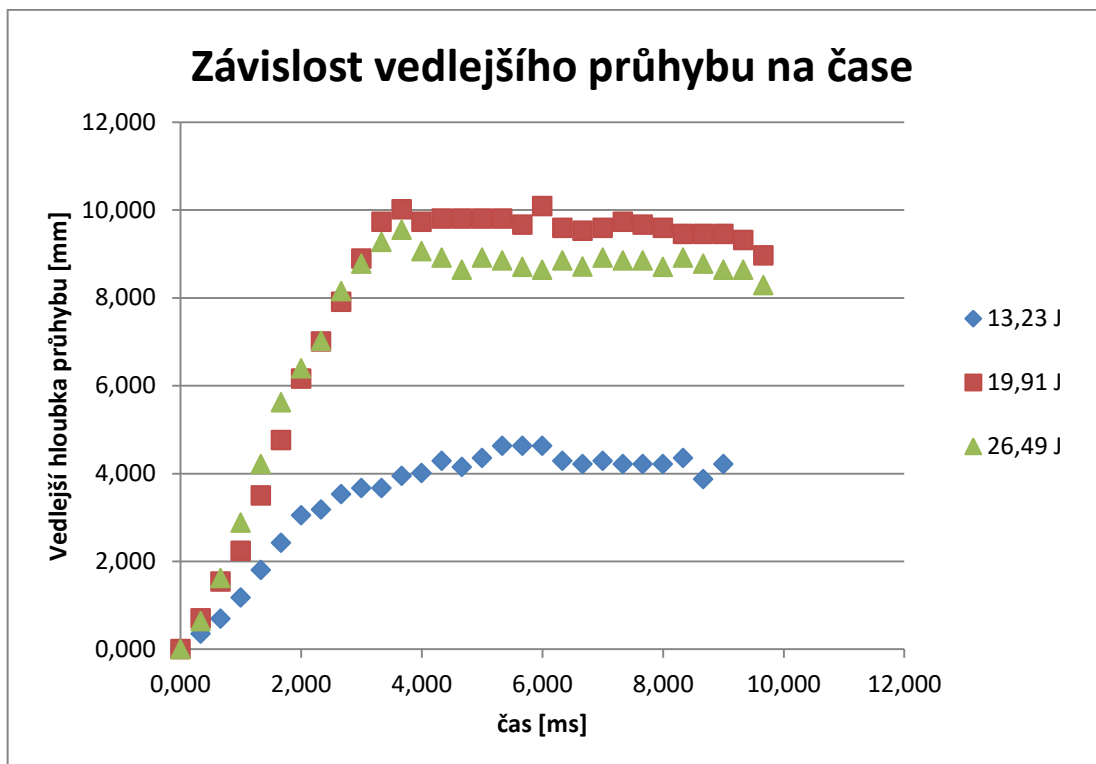
## 8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Experimentální část spočívala v provedení měření průhybu po dopadu závaží pomocí vysokorychlostní kamery. Bylo vybráno celkem 6 přileb z polymeru ABS. Na tyto přilby bylo použito závaží o hmotnosti 2,7 kg a to z tří různých výšek (50cm, 75cm, 100cm). Jako první se prováděl test z výšky 50cm (dopadová energie 13,23 J) pro všech 6 přileb poté z výšky 75cm (dopadová energie 19,91 J) a nakonec z výšky 100cm (dopadová energie 26,49 J). Po provedeném měření byly výsledky zpracovány nejprve v programu i-SPEED 2 kde se pomocí bodů analyzovali videa. Poté byly jednotlivé souřadnice bodů přepočítány a převedeny do programu MS Excel, kde se z nich udělaly tabulky a grafy.



Obr. 37 Srovnání hlavních průhybů

Jak to vypadá s hlavním průhybem tedy místem, kde je největší pravděpodobnost dopadu závaží můžeme vidět na obr. 38. Z grafu je patrné, že při vyšší dopadové energii se zvětšuje i hloubka průhybu přilby. Při dopadové energii 13,23 J je maximální hodnota hloubky průhybu v čase 7ms  $12,151 \pm 1,146$  mm. Při dopadové energii 19,91 J je největší hodnota v čase 7,33ms  $14,914 \pm 1,727$  mm. Při největší měřené dopadové energii 26,49 J je největší průhyb  $15,797 \pm 3,040$  mm a to v čase 7,33ms.



Obr. 38 Srovnání vedlejších průhybů

Na obr. 39 je vidět grafické srovnání u vedlejšího průhybu, tedy průhybu mimo dopad závaží. Tento průhyb se nechová tak jako předchozí, hloubka roste pouze do určitého času a poté se pohybuje kolem stejných hodnot až do odražení závaží zpět. Při dopadové energii 13,23 J je největší hodnota v čase 5,33ms a to  $4,628 \pm 0,792$  mm. U dopadové energie 19,91 J je maximální hodnota  $10,081 \pm 2,956$  mm v čase 6ms. U největší energie je to pak  $9,545 \pm 0,972$  mm a to už v čase 3,66ms.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala zkoušením stavební přilby z polymeru ABS. V teoretické části byl popsán polymer ABS, padostroj a největší kapitola se zabývala popisem vysokorychlostních kamer. V praktické části byla navržena a poté provedena zkouška pádem pomocí ručního padostroje, která se natáčela pomocí vysokorychlostní kamery Olympus i-SPEED 2 a poté vyhodnoceny výsledky z této zkoušky.

Na zkoušku bylo použito 6 přileb. Na přilby dopadalo závaží o hmotnosti 2,7 kg při různých dopadových energiích. Konec pádu závaží a celá deformace přilby až do odražení závaží se přitom snímala na vysokorychlostní kameru. Ze záznamu se potom pomocí souřadnic bodů analyzovali videa a zjišťovaly se hloubky 2 měřených průhybů.

U hlavního průhybu, tedy místa kam dopadalo závaží, se při vyšší dopadové energii zvětšovala i hloubka průhybu. U vedlejšího průhybu se také zvětšovala hloubka při vyšší dopadové energii, ale hloubka průhybu pro energii 26,49 J je menší než pro energii 19,91 J. Tato nepřesnost je pravděpodobně způsobena vyhodnocením v softwaru i-SPEED 2, kde je občas obtížné analyzovat stejný bod po celou dobu záznamu. Nejvyšší hodnotě hloubky hlavního průhybu bylo dosaženo při dopadové energii 26,49 J a hodnota byla  $15,797 \pm 3,040$  mm. U vedlejšího průhybu byla maximální hodnota hloubky  $10,081 \pm 2,956$  mm při dopadové energii 19,91 J.

Po každé zkoušce byly přilby kontrolovány na případné poruchy následkem zkoušky. Pro nejmenší dopadovou energii 13,23 J byly všechny přilby v pořádku, žádné povrchové poškození. U energie 19,91 J byly vidět drobné zanedbatelné povrchové poruchy, a proto byly použity i pro zkoušku s dopadovou energií 26,49 J. Po této části byly přilby viditelně poškozené, prohlubeň po závaží byla nevratná a také vznikaly rýhy po odrazu závaží. Tyto přilby by už nebyly vhodné pro další testy, protože by mohli zkreslovat výsledky.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] DOLEŽEL, Břetislav. *Odolnost plastů a pryží*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 710 s.
- [2] ABS - akrylonitril-butadién-styrén. *RESINEX* [online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/abs.html>
- [3] Acrylonitrile butadiene styrene. *WIKIPEDIA The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene)
- [4] Koextrudované polymery/ABS. *Happy Materials* [online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: [http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-11\\_10\\_ABS.pdf](http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-11_10_ABS.pdf)
- [5] Rychloběžná kamera. *Pokusy z fyziky* [online]. [cit. 2015-11-04]. Dostupné z: <http://pokusy.upol.cz/iga/iga-2013/fyzika-netradicne/rychlomezna-kamera-11/>
- [6] TICHÝ, V. *Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 96 s. 3 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [7] HUDEČEK, Jan. *Název: Možné aplikace vysokorychlostních kamerových systémů v průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2013. s., 37. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jana Doňarová, Ph.D.
- [8] Eadweard Muybridge. *WIKIPEDIA The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard\\_Muybridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge)
- [9] The Horse in Motion. *WIKIPEDIA The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard\\_Muybridge#/media/File:The\\_Horse\\_in\\_Motion.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge#/media/File:The_Horse_in_Motion.jpg)
- [10] Štřela ze vzduchovky. *WIKIPEDIA The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Harold\\_Eugene\\_Edgeron#/media/File:Schuss\\_gluehbirne.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Harold_Eugene_Edgeron#/media/File:Schuss_gluehbirne.jpg)
- [11] *Princip činnosti IP kamer* [online]. [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/10480-princip-cinnosti-typy-a-komunikacni-rozhrani-ip-kamer>
- [12] *TS3 High-speed Camera* [online]. [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: <http://buyersguide.vision-systems.com/fastec-imaging-corp/p/ts3-100s-highspeed-camera.html>

- [13] *OLYMPUS i-SPEED 2* [online]. [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: [http://apisc.com/Olympus\\_iSPEED\\_2.htm#](http://apisc.com/Olympus_iSPEED_2.htm#)
- [14] *Snímací čipy* [online]. [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/fotomobily-snimaci-cipy-cmos-vs-ccd/2885>
- [15] *Osvětlení* [online]. [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/36988.pdf>
- [16] *Schéma* [online]. [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: [http://www.strojovevideni.cz/content/files/images/a\\_schema.jpg](http://www.strojovevideni.cz/content/files/images/a_schema.jpg)
- [17] *Kruhové osvětlovače* [online]. [cit. 2015-11-14]. Dostupné z: <http://www.analyzaobrazu.cz/typo3temp/pics/2fe69cd8f6.jpg>
- [18] *Kopulové osvětlovače* [online]. [cit. 2015-11-14]. Dostupné z: <http://www.visionx.cz/site/assets/files/1320/ccs.jpg>
- [19] *Rychlost záznamu* [online]. [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://www.photron.com/index.php?cmd=camera>
- [20] *Rychlost závěrky* [online]. [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: [http://www.lesnickaskola.cz/gallery/clanky3501/2012-10-13\\_digitalni\\_fotografie.pdf](http://www.lesnickaskola.cz/gallery/clanky3501/2012-10-13_digitalni_fotografie.pdf)
- [21] *Výzkum letu kolibříka* [online]. [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: [https://www.academia.edu/2451321/Hummingbirds\\_generate\\_bilateral\\_vortex\\_loops\\_during\\_hovering\\_evidence\\_from\\_flow\\_visualization](https://www.academia.edu/2451321/Hummingbirds_generate_bilateral_vortex_loops_during_hovering_evidence_from_flow_visualization)
- [22] STARÝ, Miroslav. *Terpolymery ABS, zpracování a použití*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977, 243 s. Makromolekulární látky.
- [23] *DYNAMICKÉ ZKOUŠKY* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_11.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf)
- [24] *Padostroj* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://prokcssmedia.blob.core.windows.net/sys-master-images/hda/he3/8943328460830/padastroj.jpg>
- [25] KOPŘIVA, A. *Měření tvrdosti materiálů a zpracování naměřených výsledků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 34 s., 4 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
- [26] *Test Results* [online]. [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <http://www.nacinc.com/support/how-are-others-using-nac-high-speed-cameras/application-note-drop-testing.pdf>

- [27] BROWN, Roger. *Handbook of polymer testing: physical methods*. New York: Marcel Dekker, c1999. *Plastics engineering* (Marcel Dekker, Inc.), 50. ISBN 0824701712.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

v	Dopadová rychlost
g	Gravitační zrychlení
h	Výška pádu
E	Energie
m	Hmotnost

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Padostroj [25] .....	14
Obr. 2 Drop test Notebooku [27] .....	15
Obr. 3 Výsledek pokusu Eadwearda Muybridge [9] .....	16
Obr. 4 Střela ze vzduchovky rozbíjí žárovku [2] .....	17
Obr. 5 Vysokorychlostní kamera HYCAM [7] .....	18
Obr. 6 TS3 High-speed Camera [13] .....	19
Obr. 7 OLYMPUS i-SPEED 2 [14] .....	19
Obr. 8 Princip kamery [12] .....	20
Obr. 9 Plošné osvětlovací pole [17] .....	22
Obr. 10 Kruhové osvětlovače [18] .....	22
Obr. 11 Kopulové osvětlovače [19] .....	23
Obr. 12 Kamera 30fps [20] .....	24
Obr. 13 Kamera 240fps [20] .....	24
Obr. 14 Rozdíl mezi snímkem s dobou expozice 2s a 3,125ms [21] .....	24
Obr. 15 Sestava WOLF a videokymogram [6] .....	25
Obr. 16 Rozmístění kamer a práce Jestřábího oka [6] .....	26
Obr. 17 Výzkum letu kolibříka [22] .....	26
Obr. 18 Zátkovací zařízení [6] .....	27
Obr. 19 Scéna .....	30
Obr. 20 Ruční padostroj .....	31
Obr. 21 Vysoustružené závaží .....	31
Obr. 22 Umístění závaží vzhledem k přilbě .....	32
Obr. 23 Vysokorychlostní kamera Olympus i-SPEED 2 .....	33
Obr. 24 Zadní strana kamery i-SPEED 2 .....	34
Obr. 25 Osvětlení kamery .....	35
Obr. 26 Objektiv .....	35
Obr. 27 Ukázka vyhodnocení bodu 1 .....	36
Obr. 28 Závislost Délky pádu závaží na čase 50 cm .....	38
Obr. 29 Závislost průměrné hloubky hlavního průhybu na čase 50 cm .....	39
Obr. 30 Závislost průměrné hloubky vedlejšího průhybu na čase 50 cm .....	40
Obr. 31 Závislost Délky pádu závaží na čase 75 cm .....	41
Obr. 32 Závislost průměrné hloubky hlavního průhybu na čase 75 cm .....	42

---

Obr. 33 Závislost průměrné hloubky vedlejšího průhybu na čase 75 cm.....	42
Obr. 34 Závislost Délky pádu závaží na čase 100 cm .....	43
Obr. 35 Závislost průměrné hloubky hlavního průhybu na čase 100 cm .....	44
Obr. 36 Závislost průměrné hloubky vedlejšího průhybu na čase 100 cm.....	44
Obr. 37 Srovnání hlavních průhybů.....	46
Obr. 38 Srovnání vedlejších průhybů .....	47

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Rozdíly snímače CCD oproti CMOS [15].....	21
Tab. 2 Příklady rozlišení a rychlostí .....	34
Tab. 3 Tabulka závislosti délky pádu na čase 50 cm.....	38
Tab. 4 Tabulka průměrné hloubky hlavního průhybu 50 cm .....	39
Tab. 5 Tabulka průměrné hloubky vedlejšího průhybu 50 cm .....	40

**SEZNAM PŘÍLOH**

PŘÍLOHA 1: Tabulka závislosti délky pádu na čase 75 cm.....	57
PŘÍLOHA 2: Tabulka průměrné hloubky hlavního průhybu 75 cm .....	58
PŘÍLOHA 3: Tabulka průměrné hloubky vedlejšího průhybu 75 cm.....	59
PŘÍLOHA 4: Tabulka závislosti délky pádu na čase 100 cm.....	60
PŘÍLOHA 5: Tabulka průměrné hloubky hlavního průhybu 100 cm .....	61
PŘÍLOHA 6: Tabulka průměrné hloubky vedlejšího průhybu 100 cm.....	62



**PŘÍLOHA 1: TABULKA ZÁVISLOSTI DÉLKY PÁDU NA ČASE 75  
CM**

Čas [ms]	Délka pádu [mm]	Čas [ms]	Délka pádu [mm]
0,000	730,748	7,667	759,591
0,333	731,938	8,000	760,501
0,667	733,198	8,333	761,552
1,000	734,529	8,667	762,182
1,333	735,929	9,000	762,882
1,667	737,259	9,333	763,442
2,000	738,590	9,667	763,932
2,333	739,780	10,000	764,422
2,667	741,110	10,333	764,913
3,000	742,440	10,667	765,261
3,333	743,840	11,000	765,611
3,667	745,170	11,333	765,892
4,000	746,290	11,667	765,962
4,333	747,480	12,000	765,892
4,667	748,740	12,333	766,243
5,000	750,000	12,667	765,962
5,333	751,470	13,000	765,892
5,667	752,730	13,333	765,682
6,000	754,200	13,667	765,683
6,333	755,530	14,000	765,543
6,667	756,371	14,333	765,123
7,000	757,421	14,667	764,702
7,333	758,611	15,000	764,352

## **PŘÍLOHA 2: TABULKA PRŮMĚRNÉ HLOUBKY HLAVNÍHO PRŮHYBU 75 CM**

Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]	Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,000	0,000	5,000	13,232	1,082
0,333	1,191	0,319	5,333	13,583	1,351
0,667	2,451	0,323	5,667	13,793	1,259
1,000	3,431	0,327	6,000	14,143	1,265
1,333	4,482	0,448	6,333	14,633	1,261
1,667	5,672	0,531	6,667	14,703	1,486
2,000	6,722	0,723	7,000	14,843	1,573
2,333	7,772	0,664	7,333	14,914	1,727
2,667	8,542	0,604	7,667	14,914	1,727
3,000	9,523	0,767	8,000	14,704	2,140
3,333	10,434	1,141	8,333	14,564	2,164
3,667	11,063	1,017	8,667	14,284	2,491
4,000	11,692	0,846	9,000	14,074	2,068
4,333	12,251	0,951	9,333	13,794	2,334
4,667	12,882	0,929	9,667	13,233	1,969

**PŘÍLOHA 3: TABULKA PRŮMĚRNÉ HLOUBKY VEDLEJŠÍHO PRŮHYBU 75 CM**

Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]	Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,000	0,000	5,000	9,801	3,116
0,333	0,700	0,343	5,333	9,801	3,114
0,667	1,540	0,509	5,667	9,661	2,744
1,000	2,240	0,632	6,000	10,081	2,956
1,333	3,500	0,782	6,333	9,591	2,684
1,667	4,759	0,943	6,667	9,521	2,634
2,000	6,159	1,367	7,000	9,590	2,835
2,333	6,999	1,792	7,333	9,731	2,886
2,667	7,909	2,045	7,667	9,661	2,968
3,000	8,889	2,147	8,000	9,591	2,985
3,333	9,729	2,568	8,333	9,451	2,869
3,667	10,009	2,868	8,667	9,452	2,906
4,000	9,731	3,101	9,000	9,451	2,714
4,333	9,801	3,116	9,333	9,311	2,751
4,667	9,801	2,989	9,667	8,962	2,582

**PŘÍLOHA 4: TABULKA ZÁVISLOSTI DÉLKY PÁDU NA ČASE 100  
CM**

Čas [ms]	Délka pádu [mm]	Čas [ms]	Délka pádu [mm]
0,000	978,029	7,667	1010,741
0,333	979,433	8,000	1011,653
0,667	980,977	8,333	1012,496
1,000	982,381	8,667	1013,128
1,333	983,784	9,000	1014,181
1,667	985,259	9,333	1014,884
2,000	986,733	9,667	1015,937
2,333	988,207	10,000	1016,429
2,667	989,470	10,333	1016,920
3,000	991,085	10,667	1017,482
3,333	992,559	11,000	1017,974
3,667	994,104	11,333	1018,256
4,000	995,578	11,667	1018,467
4,333	996,982	12,000	1018,607
4,667	998,456	12,333	1018,468
5,000	1000,000	12,667	1018,609
5,333	1001,544	13,000	1018,469
5,667	1003,019	13,333	1017,978
6,000	1004,353	13,667	1018,187
6,333	1005,757	14,000	1017,486
6,667	1007,161	14,333	1016,925
7,000	1008,425	14,667	1016,433
7,333	1009,548	15,000	1015,591

**PŘÍLOHA 5: TABULKA PRŮMĚRNÉ HLOUBKY HLAVNÍHO PRŮHYBU 100 CM**

Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]	Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,000	0,000	5,000	14,392	1,926
0,333	1,264	0,267	5,333	14,602	2,157
0,667	2,738	0,357	5,667	14,954	2,257
1,000	3,932	0,518	6,000	15,375	2,409
1,333	5,336	0,642	6,333	15,726	2,379
1,667	6,529	0,923	6,667	15,796	2,482
2,000	7,653	1,215	7,000	15,796	2,702
2,333	8,355	1,329	7,333	15,797	3,040
2,667	9,338	1,410	7,667	15,727	3,199
3,000	10,390	1,486	8,000	15,657	3,359
3,333	11,092	1,604	8,333	15,517	3,515
3,667	11,865	1,555	8,667	15,377	3,518
4,000	12,637	1,548	9,000	14,956	3,760
4,333	13,269	1,719	9,333	14,395	3,806
4,667	13,900	1,842	9,667	13,834	3,961

**PŘÍLOHA 6: TABULKA PRŮMĚRNÉ HLOUBKY VEDLEJŠÍHO PRŮHYBU 100 CM**

Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]	Čas [ms]	Průměrná hloubka průhybu [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,000	0,000	5,000	8,914	0,408
0,333	0,632	0,230	5,333	8,844	0,524
0,667	1,615	0,416	5,667	8,703	0,568
1,000	2,878	0,417	6,000	8,634	0,230
1,333	4,211	0,532	6,333	8,844	0,377
1,667	5,616	0,694	6,667	8,704	0,346
2,000	6,389	0,739	7,000	8,914	0,479
2,333	7,020	0,446	7,333	8,844	0,366
2,667	8,143	0,646	7,667	8,844	0,373
3,000	8,774	0,327	8,000	8,703	0,427
3,333	9,265	0,454	8,333	8,914	0,309
3,667	9,545	0,972	8,667	8,774	0,485
4,000	9,054	0,779	9,000	8,633	0,432
4,333	8,914	0,391	9,333	8,634	0,439
4,667	8,633	0,333	9,667	8,283	0,507