



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy

**Stanovení odolnosti ochranné sítě při nárazu vrtulového dronu  
Safety net resistance assessment in a case of propeller drone impact**

**Bakalářská práce**

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích 3

Studijní obor: Letecká doprava

Vedoucí práce: Ing. Jan Falta

Ing. Nela Krčmářová

---

**Barbora Janová**

Praha 2023



**K618..... Ústav mechaniky a materiálů**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Barbora Janová**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**bakalářský – LED – Letecká doprava**

Název tématu (česky): **Stanovení odolnosti ochranné sítě při nárazu vrtulového dronu**

Název tématu (anglicky): Safety net resistance assessment in a case of propeller drone impact

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- V rámci bakalářské práce bude proveden návrh a realizace metod pro testování ochranné sítě sloužící k zachycení dronů mimo letovou zónu. Dále bude provedena rešerše problematiky bezpilotních vrtulových letounů s ohledem na řešení rotorů dronů a možné následky kolize listů s cizím tělesem spolu s účinky nárazu dronu jako takového. Bude uvažována záchytná polypropylenová síť, u níž budou zjištěny její mechanické vlastnosti a odolnost proti přeseknutí v závislosti na napnutí sítě a typu listů vrtule. Cílem bakalářské práce je návrh metodiky pro testování ochranných sítí a posouzení jejich zádržných schopností na základě realizace a vyhodnocení mechanických zkoušek simulujících kolizi dronu a záchytné sítě.





Rozsah grafických prací: není stanoven

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: M. Hassanalian, A. Abdelkefi, Classifications, applications, and design challenges of drones, 2017.  
Paul McCann BEng. Evaluation of safety nets by experiment. RR835 Research Report, 2011.  
Bresciani, Tammaso. "Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter." MSc theses, 2008.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jan Falta**  
**Ing. Nela Krčmářová**

Datum zadání bakalářské práce:

**1. října 2022**

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

**7. srpna 2023**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu mechaniky a materiálů

prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Barbora Janová  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 1. října 2022



## Abstrakt

Z důvodu značného rozvoje bezpilotních systémů v posledních letech roste adekvátně i snaha o regulaci jejich provozu, primárně z důvodu bezpečnosti. S tím souvisí i myšlenka na vytvoření bezpečných vzdělávacích míst představujících prostor, který by usnadnil osvětu a vzdělávání v oblasti bezpilotních systémů. Hlavními výhodami zřízení takových míst by bylo snížení požadavků na pravidla provozu v jejich prostoru a možnost tréninku dovedností dálkově řídicích pilotů. Tím by se snížila míra nehodovosti reálného provozu. Vzdělávací místa by vytvořila geozóny vymezené pomocí ochranných sítí. Dnes již existují běžně dostupné sítě pro účely bezpilotních systémů, avšak není publikován jednotný postup, jak tyto sítě testovat a zhodnotit, zda jsou způsobilé účelu uživatele. Hlavním cílem práce byl návrh univerzálního postupu pro testování sítí, využitelných pro zachycení vrtulového bezpilotního letadla při letu mimo vymezený prostor. Nejdříve byly zjištěny mechanické vlastnosti sítě, následně bylo provedeno laboratorní testování účinků vyvolaných střetem rotující vrtule s definovanou částí sítě. Bylo provedeno i testování záchytných vlastností sítě v reálných podmínkách. Práce obsahuje rešerši rotorů vrtulových bezpilotních letadel a možných účinků, které vzniknou při jejich styku s cizím tělesem. Výsledkem práce je návrh metodiky pro testování ochranných sítí, využitelných v aplikacích vrtulových bezpilotních letadel, a ohodnocení konkrétní polypropylenové sítě podle této metodiky.

**Klíčová slova:** bezpilotní systémy, ochranné sítě, tahová zkouška, vrtule



## Abstract

Due to the significant development of unmanned aerial systems in recent years, the effort to regulate their operation is also growing adequately, primarily for reasons of safety. Related to this is the idea of creating safe educational places, representing areas that would facilitate awareness and education in the field of unmanned aerial systems. The main advantages of establishing such places would be the reduction of requirements for traffic rules in their scope and the possibility of training the skills of remote pilots. This would reduce the accident rate of real operations. Educational places would create geozones defined by protective nets. In these days, there are already commercially available nets for the purpose of unmanned aerial systems, but there is no published uniform procedure for testing these nets and evaluating whether they are eligible for the purpose of the user. The main objective of the work was the design of a universal procedure for testing of the nets that can be used to intercept a propeller-driven unmanned aerial vehicle while flying outside the defined area. First, the mechanical properties of the net were determined, followed by laboratory testing of the effects caused by the collision of the rotating propeller with a defined part of the net. Testing of the catching ability of the net in real conditions was also carried out. The work includes research on the rotors of propeller-driven unmanned aerial vehicle and the possible effects that arise when they encounter with a foreign body. The result of the work is the proposal of a methodology for testing protective nets usable in propeller unmanned aerial vehicle applications and the evaluation of a particular polypropylene net according to this methodology.

**Keywords:** unmanned aerial systems, safety nets, tensile test, propeller



## Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat především vedoucím mé bakalářské práce Ing. Janu Faltovi a Ing. Nele Krčmářové za odborné vedení a rady. Velké poděkování dále patří Ing. et Ing. Radimovi Dvořákovi a Ing. Zdeňku Svatému, Ph.D., kteří se podíleli na provedení experimentu při náletu dronu do ochranné sítě, a také prof. Ing. Ondřejovi Jirouškovi, Ph.D. za zprostředkování financí na realizaci práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat svému spolužákovi Bc. Janu Stoklasovi za odborné konzultace týkající se softwarových nástrojů Matlab a LaTeX.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Stanovení odolnosti ochranné sítě při nárazu vrtulového dronu vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

V Praze dne 1. srpna 2023

.....  
*Barbora Javorová*  
Podpis



# Obsah

Úvod	13
<b>1 Teoretické základy práce</b>	<b>15</b>
1.1 Bezpilotní letadla (UAVs)	15
1.1.1 Vrtulová UAVs	16
1.1.2 Kolize UAV s cizím tělesem	19
1.2 Pravidla létání s UAVs	21
1.3 Současný stav testování ochranných sítí	22
1.4 Využití ochranných sítí ve spojitosti s provozováním vrtulových UAVs	24
1.5 Koncept provozu vzdělávacích míst pro vrtulová UAVs	26
<b>2 Metody</b>	<b>29</b>
2.1 Návrh metodiky	29
2.2 Test polypropylenové sítě	32
2.2.1 Tahová zkouška	32
2.2.2 Testy vlivu nárazu listu vrtule do části sítě	35
2.2.3 Testování zachycení dronu v reálných podmínkách	38
<b>3 Výsledky</b>	<b>42</b>
3.1 Test polypropylenové sítě	42
3.1.1 Výsledky tahové zkoušky	42
3.1.2 Výsledky testů vlivu nárazu listu vrtule do části sítě	48
3.1.3 Výsledky testování zachycení dronu v reálných podmínkách	67
<b>4 Diskuze výsledků</b>	<b>76</b>
<b>5 Závěr</b>	<b>80</b>
<b>Přílohy</b>	<b>88</b>

## Seznam obrázků

1.1	Různé konstrukce UAVs, převzato z [6]	17
1.2	UAV se 48 vrtulemi, převzato z [18]	19
1.3	Fotografie zásahů hlavy figuríny vrtulovým UAV, převzato z [21]	20
1.4	Návrh protikolizního UAV, převzato z [20]	21
1.5	Speciální zařízení pro testování ochranných sítí, převzato z [28]	23
1.6	Vystřelovací zařízení pro zachycení UAV, převzato z [29]	23
1.7	Speciální brýle využívané u FPV UAVs, převzato z [35]	25
1.8	Vizualizace konceptu vzdělávacích míst pro vrtulová UAVs	27
2.1	Zatěžovací stroj Instron 3382	33
2.2	Zástupce vzorků jednotlivých sad	34
2.3	Upevnění vzorku v gumových obdélnících (a), spoj sítě (b)	34
2.4	Upevňovací prvky	35
2.5	Zjednodušené schéma testovacího zařízení	37
2.6	Fotografie laboratoře	38
2.7	Celková situace – reálný experiment	40
2.8	Značky pro výpočet rychlosti letu dronu $v_d$	40
3.1	Vzorky po provedené tahové zkoušce – sada A	42
3.2	Tahová zkouška vzorků s vyznačeným průměrem – sada A	43
3.3	Vzorky po provedené tahové zkoušce – sada B	44
3.4	Tahová zkouška vzorků s vyznačeným průměrem – sada B	45
3.5	Vzorky po provedené tahové zkoušce – sada C	46
3.6	Tahová zkouška vzorků s vyznačeným průměrem – sada C	47
3.7	Fotografie vzorků v momentě přetržení	47
3.8	Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 1	49
3.9	Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 1 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N	50
3.10	Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 1 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 1 po testování (b)	51
3.11	Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 2	52



3.12 Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 2 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N . . . . .	52
3.13 Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 2 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 2 po testování (b) . . . . .	53
3.14 Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 3 . . . . .	54
3.15 Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 3 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N . . . . .	54
3.16 Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 3 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 3 po testování (b) . . . . .	55
3.17 Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 4 . . . . .	56
3.18 Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 4 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N . . . . .	56
3.19 Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 4 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 4 po testování (b) . . . . .	57
3.20 Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou – laboratorní test vrtule 5, napnutí na 2 N	58
3.21 Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivky vzorku, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 5 při napnutí na 2 N . . . . .	58
3.22 Fotografie vzorku z testování kolizí s vrtulí 5 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 5 po testování (b) . . . . .	59
3.23 Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 6 . . . . .	60
3.24 Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 6 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N . . . . .	60
3.25 Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 6 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 6 po testování (b) . . . . .	61
3.26 Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou – laboratorní test vrtule 7, napnutí na 2 N	62
3.27 Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivky vzorku, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 7 při napnutí na 2 N . . . . .	62
3.28 Fotografie vzorku z testování kolizí s vrtulí 7 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 7 po testování (b) . . . . .	63
3.29 Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní test vrtule 8, napnutí na 20 N	64
3.30 Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivky vzorku, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 8 při napnutí 20 N . . . . .	64



3.31 Fotografie vzorku z testování kolizí s vrtulí 8 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 8 po testování (b) . . . . .	65
3.32 Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou – laboratorní test vrtule 9, napnutí na 2 N	66
3.33 Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivky vzorku, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 9 při napnutí na 2 N . . . . .	66
3.34 Fotografie vzorku z testování kolizí s vrtulí 9 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 9 po testování (b) . . . . .	67
3.35 Celý dron využitý pro reálné testování zachycený v testované síti . . . . .	68
3.36 Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – reálný experiment . . . . .	70
3.37 Vizuelní poškození sítě způsobené nálety dronu . . . . .	71
3.38 Porovnání průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků z reálného experimentu . . . . .	72
3.39 Snímky vzorků po tahové zkoušce – reálný experiment sada A . . . . .	72
3.40 Porovnání průměrové křivky nepoškozených vzorků sady B a křivek vzorků z reálného experimentu . . . . .	73
3.41 Snímky vzorků po tahové zkoušce – reálný experiment sada B . . . . .	74
3.42 Porovnání průměrové křivky nepoškozených vzorků sady C a křivek vzorků z reálného experimentu . . . . .	75
3.43 Snímky vzorků po tahové zkoušce – reálný experiment sada C . . . . .	75
4.1 Průměrové křivky tahových zkoušek vzorků sady A, sady B a sady C . . . . .	76

## Seznam tabulek

2.1	Postup metodiky . . . . .	31
2.2	Typy vrtulí, jimiž byly prováděny laboratorní testy . . . . .	36
2.3	Parametry použité kvadrokoptéry . . . . .	41
3.1	Maximální dosažená síla a odpovídající prodloužení vzorků – sada A . . . . .	43
3.2	Maximální dosažená síla a odpovídající prodloužení vzorků – sada B . . . . .	45
3.3	Maximální dosažená síla a odpovídající prodloužení vzorků – sada C . . . . .	46
3.4	Hodnoty vzorku – vrtule 1 . . . . .	50
3.5	Hodnoty vzorků – vrtule 2 . . . . .	52
3.6	Hodnoty vzorků – vrtule 3 . . . . .	53
3.7	Hodnoty vzorků – vrtule 4 . . . . .	55
3.8	Hodnoty vzorku – vrtule 5 . . . . .	58
3.9	Hodnoty vzorků – vrtule 6 . . . . .	60
3.10	Hodnoty vzorku – vrtule 7 . . . . .	62
3.11	Hodnoty vzorku – vrtule 8 . . . . .	64
3.12	Hodnoty vzorku – vrtule 9 . . . . .	66
3.13	Parametry jednotlivých náletů dronu . . . . .	69
3.14	Hodnoty maximálních zatěžovacích sil vzorků vystavených testování v reálných podmínkách a hodnota maximální síly ze vzorků sady A . . . . .	71
3.15	Hodnoty maximálních zatěžovacích sil vzorků vystavených testování v reálných podmínkách a hodnota maximální síly ze vzorků sady B . . . . .	73
3.16	Hodnoty maximálních zatěžovacích sil vzorků vystavených testování v reálných podmínkách a hodnota maximální síly ze vzorků sady C . . . . .	74
4.1	Hodnoty maximálních zatěžovacích sil vzorků jednotlivých sad . . . . .	77





## Seznam symbolů a zkratek

$\sigma$	Mechanické napětí
$\varepsilon$	Relativní prodloužení
$F$	Zatěžovací síla
$L$	Okamžitá délka
$\Delta L$	Prodloužení
$L_0$	Původní délka
$S$	Okamžitý průřez
$S_0$	Původní průřez
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CASA	Civil Aviation Safety Authority
ČR	Česká republika
EU	Evropská unie
FPV	First Person View
GNSS	Global Navigation Satellite System
MTOW	Maximum TakeOff Weight
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PETG	Polyetylen Tereftalát Glykol
PLA	Polylactic Acid - kyselina polyléčná
PVC	Polyvinylchlorid
SLZ	Sportovní létající zařízení
TTL	Transistor-transistor logic
UAV(s)	Unmanned Aerial Vehicle(s) – Bezpilotní letadlo(a)



## Úvod

V souvislosti s vývojem technologií a pokrokem v oblasti letectví jsou dnes bezpilotní systémy využívány v nejrůznějších odvětvích lidské činnosti, např. v zemědělství, průmyslu, využívají se pro armádní účely či pro různé volno-časové aktivity. Variabilita využití bezpilotních letadel a možnost jejich přizpůsobení nabízí široké spektrum využití, protože disponují relativně malou velikostí a schopností obsloužit i špatně dostupná místa. Možnost dálkového ovládání bez přítomnosti člověka na palubě přináší nový rozměr – bezpilotní letadla lze využít při aktivitách, které by mohly být člověku nebezpečné, nebo jejich využití významně snižuje nákladnost daného úkonu. Do budoucna lze předpokládat rozšíření použitelnosti bezpilotních letadel v závislosti na vývinu lehčích a vhodnějších materiálů pro jejich konstrukci a zlepšování jejich letových a provozních vlastností. S tím souvisí také snaha vyvíjet nové softwary, které by umožnily zcela autonomní provoz.

V současné době však stále převládá provoz na základě dálkového řízení bezpilotních letadel uživatelem, kde existují rizika lidské chyby při řízení. To může mít za následek vznik škod na majetku, nebo újmy na zdraví. Aby se předešlo vzniku takových situací, podléhá provoz bezpilotních systémů regulacím. Pravidla provozu bezpilotních systémů stanovují podmínky, při kterých mohou být provozovány s ohledem na bezpečnost osob, životního prostředí a také okolního leteckého provozu. Nedodržování předpisů z nepozornosti, nebo nevědomosti může zvýšit riziko vzniku incidentu, nebo nehody.

Se zvyšujícím se využíváním bezpilotních systémů roste potřeba znalostí pravidel provozu a nabízí se myšlenka pro vytvoření míst, která by zajišťovala bezpečný prostor pro potřeby seznamování se s problematikou bezpilotních systémů a se záměrem prevence chyb pilotů v reálném provozu. Jednou z možností, jak zprostředkovat bezpečný letový prostor, je využití ochranných sítí. Ochranné sítě představují mechanickou zábranu a zadrží bezpilotní letadla v požadovaném prostoru. Pro možnost využití sítě při provozu zamýšlených bezpilotních letadel je třeba zajistit, aby vykazovala dostatečnou zádržnou schopnost a zajistila tak bezpečnost všech uživatelů.

Cílem práce byl návrh univerzální metodiky pro ověření způsobilosti ochranné sítě využitelné v aplikacích pro vrtulová bezpilotní letadla. Konkrétně navržení postupu, který by stanovil, zda je ochranná síť schopna zachytit bezpilotní letadla v situaci, kdy by mělo dojít k jejich vylétnutí z prostoru ohraničeného ochrannou sítí. Nejprve byl zvolen postup pro zjištění základních



mechanických vlastností ochranné sítě definujících její pevnost v tahu. Následně byl stanoven postup pro testování střetu sítě s rotující vrtulí. Způsobilost sítě byla zhodnocena na základě porovnání základních mechanických vlastností, nové nepoškozené sítě, a mechanických vlastností sítě vystavené kolizím s vrtulí. Metodika by měla umožnit použití stejného postupu při testování různých ochranných sítí, využívaných pro tento účel pro různé skupiny vrtulových bezpilotních letadel. Proměnnými by byly pouze parametry bezpilotních letadel, pro které by byl uvažován provoz. Kromě vytvoření metodiky byla také ohodnocena jedna konkrétní polypropylenová síť, která byla využita pro otestování metodiky.



# 1 Teoretické základy práce

## 1.1 Bezpilotní letadla (UAVs)

Pro účely bakalářské práce je nezbytné definovat pojmy „bezpilotní letadlo“ a „bezpilotní systém“.

*„Bezpilotní letadlo je jakékoli letadlo provozované nebo projektované pro autonomní provoz nebo pro pilotování na dálku bez pilota na palubě“* [1]. *„Bezpilotním systémem se rozumí bezpilotní letadlo a vybavení pro jeho řízení na dálku“* [2]. Bezpilotní systémy se v závislosti na maximální vzletové hmotnosti (MTOW), maximální dosažitelné výšce, maximální dosažitelné rychlosti během vodorovného letu a dalších charakteristikách dělí do sedmi tříd s označením C0, C1, C2, C3, C4, C5 a C6 [3]. Další důležité pojmy pro pochopení problematiky jsou „provozovatel bezpilotních systémů“ a „provozovatel letadla“.

*„Provozovatelem bezpilotních systémů je jakákoli právnická nebo fyzická osoba provozující nebo zamýšlející provozovat jeden nebo více bezpilotních systémů“* [2]. *„Provozovatelem letadla se rozumí právnická nebo fyzická osoba provozující nebo navrhující k provozování jedno nebo více letadel“* [1]. V neposlední řadě je potřeba definovat pojem „dálkově řídicí pilot“.

*„Dálkově řídicí pilot je fyzická osoba odpovědná za bezpečné provádění letu bezpilotního letadla ovládáním jeho letových ovládacích prvků, a to buď manuálně nebo v případě, že bezpilotní letadlo létá automaticky, tím, že monitoruje jeho letovou dráhu a je neustále schopna kdykoli zasáhnout a letovou dráhu změnit“* [1]. Dále bude pro bezpilotní letadlo využito označení UAV vycházející z anglického názvu „unmanned aerial vehicle“, pro množné číslo bude použito označení UAVs.

V posledních dvou desetiletích došlo k výraznému rozmachu bezpilotních systémů po celém světě. Tento rozmach byl podmíněn rychlým vývojem technologií, které se pohybují v dostupné cenové relaci. Popularita vzrostla nejen u široké veřejnosti, nýbrž došlo k začleňování UAVs do různých odvětví. Velmi důležitou výhodou UAVs je schopnost obsloužit i špatně dostupná místa, proto dochází k jejich využívání v situacích, kde by přítomnost člověka byla obtížná, nebezpečná či nemožná. Za použití bezpilotních systémů mohou být prováděny inspekční činnosti, při nichž se prohledávají polární oblasti, nebo sledují populace stád v zemědělském odvětví [4,5]. UAVs našla své využití také ve vojenském sektoru a jsou velmi důležitou součástí vybavení pro některé záchranné mise a při ochraně a monitorování životního prostředí [6]. UAVs mají velkou perspektivu i ve vesmíru a během vesmírných misí. Pro příklad lze uvést NASA a její vývoj bezpilotních systémů pro průzkum Marsu [7]. V závislosti na diverzitě využití bezpilotních systémů byla vyvinuta široká škála různých UAVs lišících se svými vlastnostmi a vybavením pro řízení. Podle aplikace a prostředí, ve kterém



se pohybuje, je UAV přizpůsobeno svým pohonem, počtem vrtulí, charakteristickou hmotností, rozměry a dalšími charakteristikami. V závislosti na charakteristikách UAVs vzniklo hned několik rozdělení využívaných v různých částech světa. [6, 8]

Jako příklad lze uvést rozdělení podle Rolanda E. Weibela a R. Johna Hansmana, Jr. založené primárně na hmotnosti UAVs. Toto dělení tvoří pět kategorií počínaje kategorií mikro s nižší hmotností než 2 lb (907,185 g), dále mini, taktickou, střední a kategorií těžkou konče. Další dělení založené na hmotnostech UAVs provedla například australská vládní agentura Civil Aviation Safety Authority (CASA). Kromě dělení podle hmotnosti existují dělení i podle dalších charakteristik UAVs, jako například podle letového dosahu či pohonu. Kategorizaci podle hmotnosti a letového dosahu zavedli B. Zakora a A. Molodchick. [6]

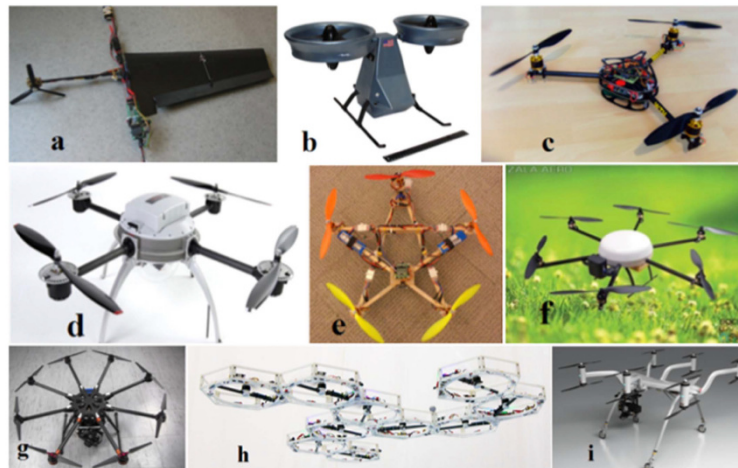
V poslední době je velmi důležitou otázkou materiál na výrobu bezpilotních systémů, především pak na výrobu UAVs. Materiál ovlivňuje důležité vlastnosti jako hmotnost a únosnost UAV. Existují bezpilotní systémy, u kterých jsou UAVs tvořena z kompozitních materiálů, uhlíkových vláken, plastu, hliníku nebo lehkých slitin, ale rozvoj bezpilotních systémů a jejich diverzity využití má za následek snahu o neustálé zdokonalování v této oblasti. UAVs se využívají i na aplikace pod vodou a mohou být vybavena senzory a kamerami, které lze využít pro snímkování ve dne i v noci, či pro lokalizaci hrozeb chemického a jaderného původu. [5, 6, 9, 10]

### 1.1.1 Vrtulová UAVs

UAVs existuje velké množství různých druhů, jak již bylo uvedeno v předchozích odstavcích, a díky rychlé inovaci a vývoji vznikají další. Pro účely této práce bude cíleno pouze na UAVs poháněná vrtulovými rotory tzv. vrtulemi.

Konstrukce UAV by měla mít, co možná nejnižší hmotnost tak, aby vyhověla technickým požadavkům na konkrétní provoz. Typicky používané rozdělení UAVs je založeno na počtu ramen konstrukce, kdy se využívají názvy jako bikoptyra, trikoptyra, kvadrokoptyra a chronologicky dále. Existuje několik variant uspořádání ramen konstrukce pro vrtulová UAVs, například do tvaru H, V nebo Y, nejčastěji využívaný tvar konstrukce je tvar X, u kterého jsou použity čtyři vrtule. Na obrázku 1.1 jsou zachyceny různé konstrukce UAVs s různým počtem ramen. [10]





Obrázek 1.1: Různé konstrukce UAVs, převzato z [6]

Důležitou součástí UAV jsou motory a vrtulové rotory, které dohromady tvoří pohonný systém. Vrtule jsou technická zařízení skládající se alespoň ze dvou listů [11]. Úkolem pohonného systému je překonat odporové a tíhové síly, a vytvořit dostatečně velkou aerodynamickou sílu pro pohon UAV. Tato síla se nazývá tah. Vrtule získávají tah pomocí rotačního pohybu, kdy je točivý moment přeměňován na práci. Tah vyprodukovaný vrtulí je závislý na jejich charakteristikách, mezi které patří otáčky za minutu, tvar a plocha listů, průměr a stoupání. Vrtule s větším průměrem jsou schopny generovat větší tah, a s větším tahem je UAV schopno unést větší hmotnost [12, 13]. Kromě charakteristik vrtulí je tah také ovlivněn okolními podmínkami, například hustotou vzduchu, která klesá se zvyšující se nadmořskou výškou. Pro zajištění dostatečně velkého tahu, a tedy pohonu pro odpovídající vrtuli, musí být zvolen motor s dostatečně velkým kroučícím momentem. Pro pohon vrtulových UAVs je nejvhodnější pohon elektromotorem [6]. Při otáčení vrtule a generování tahu je ovlivněno proudění vzduchu a jeho směr, díky čemuž vzniká vztlak. Vztlak je síla kolmá na nabíhající proud. S rostoucím vztlakem se zvyšují i deformační síly vrtule, a proto je nutné vrtuli navrhnout z vhodného materiálu, aby při působení těchto sil nevznikala poškození. Další silou působící na UAV je odpor. Odporová síla je rovnoběžná k nabíhajícímu proudu vzduchu. [13–16]

Pro schopnost letu v různých směrech musí být pohon jednotlivých vrtulí zajištěn separátně. Směr točení vrtulí je možný po směru hodinových ručiček i proti směru hodinových ručiček. Rotace probíhá kolem fixní osy, přičemž osy jednotlivých vrtulí jsou paralelní. Úhel náběhu vrtule je ve většině případů neměnný, pevný. V rámci konstrukce jednotlivých UAVs jsou využity oba směry rotace, čímž vznikají stabilní konstrukce bez nutnosti přidaného svislého rotoru, který

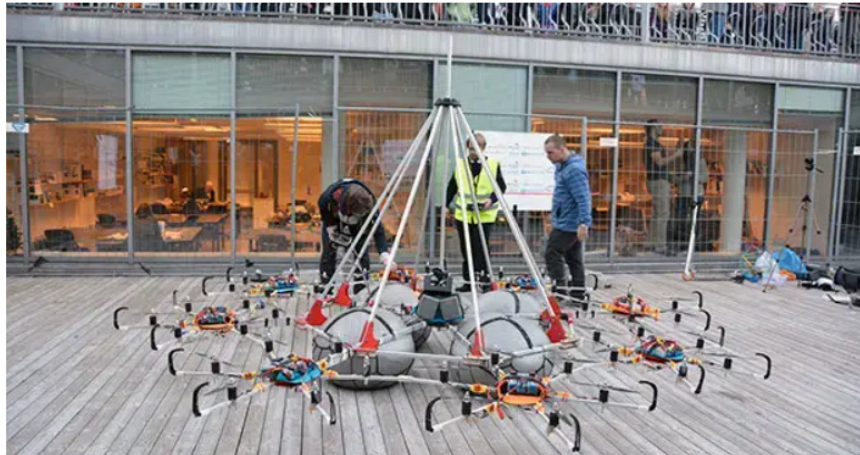


by vyrovnával reakční otáčivý moment. Dvojice vrtulí se stejným směrem rotací se vůči sobě umísťují diagonálně. [15, 16]

U kvadroptér, které se využívají nejčastěji, lze dosáhnout čtyř různých pohybů. Kvadroptéta je schopna se pohybovat ve vertikálním směru tím, že dochází ke stejné změně rychlosti otáčení všech čtyř vrtulí. Při snížení otáček dochází k pohybu směrem dolů, a naopak při zvýšení otáček se kvadroptéra pohybuje nahoru. Druhý pohyb, který kvadroptéra ovládá je pohyb dopředu a dozadu. Vzniká změnou rychlosti rotace pravé přední a zároveň levé zadní vrtule. Rychlost bude vždy u jedné vrtule z těchto jmenovaných zvýšena, a u druhé snížena. Pro pohyb dopředu se sníží rychlost rotace přední vrtule a rychlost rotace zadní vrtule se zvýší. Pro pohyb dozadu je změna rychlostí rotace analogicky naopak. Stejný princip se využívá při pohybu doprava, či doleva. Zde se však mění rychlosti rotace u levé přední a pravé zadní vrtule. Důvodem vodorovného pohybu ve dvou směrech jsou točivé momenty, které vznikají ke dvěma různým osám. Celkový vertikální tah je při vodorovném pohybu tedy doprava, doleva, dopředu nebo dozadu stejný jako při vznášení ve stejné poloze. Poslední pohyb je zatáčení. Kvadroptéra se pohybuje kolem svislé osy pomocí změny rychlosti rotace dvojice levé přední a pravé zadní vrtule, a souběžně změny rychlosti rotace zbylých dvou vrtulí. Vždy se rychlost jedné dvojice zvýší a druhé sníží. Pro popis pohybů byla využita diplomová práce [15], kde byla popsána kvadroptéra, pro níž tyto skutečnosti platily. V závislosti na konfiguraci kvadroptéry se pak mohou dvojice vrtulí lišit v pravolevé orientaci, ale princip zůstává zachován. Příklad popisu pohybů kvadroptéry využívající jiné kombinace vrtulí je uveden ve článku [17]. [15]

Výhodou vrtulových UAVs je, že kromě horizontálního a vertikálního pohybu se dokážou vznášet ve stanoveném bodě bez změny polohy a dokážou provést vertikální vzlet i přistání. Další výhodou je dobrá manévrovatelnost, především u kvadroptér či hexakoptér, a jejich jednoduchost. Oproti tomu jejich hlavní nevýhoda je vysoká spotřeba energie. [6, 16]

V dnešní době lze sestrojít UAV s libovolným počtem vrtulí v závislosti na potřebách a požadavcích uživatele. Příkladem toho je UAV se 48 vrtulemi, které sestavil Henning Pedersen se studenty na univerzitě v Oslu, v Norsku. V roce 2016 bylo zapsáno do Guinnessovy knihy rekordů jako dálkově řízená multikoptéra, která do té doby unesla největší užitečné zatížení. Na obrázku 1.2 je fotografie UAV sestaveného na univerzitě v Oslu. [18]



Obrázek 1.2: UAV se 48 vrtulemi, převzato z [18]

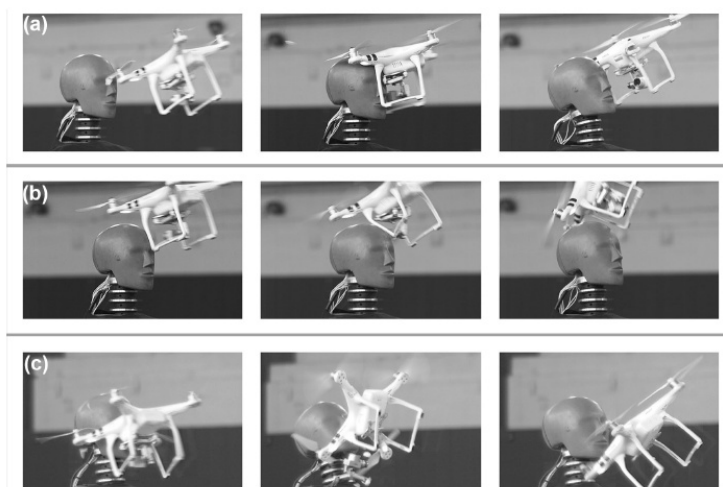
Mezi materiál, využívaný pro výrobu vrtulí, patří například plasty, uhlíková vlákna, nebo může být využit moderní přístup a vrtule mohou být vyrobeny pomocí 3D tisku z ABS, PLA nebo PETG. [13,19]

### 1.1.2 Kolize UAV s cizím tělesem

Provoz bezpilotních systémů s sebou nese bezpečnostní rizika. U vrtulových UAVs představuje hlavní riziko kromě kinetické energie UAV také kolize s rotující vrtulí. Může dojít ke vzniku nehody, která má za následek hmotné škody, nebo újmu na zdraví. Existuje několik příčin vzniku nehody UAV, a to například mechanické selhání UAV, či selhání z důvodu nepříznivého počasí, kolize UAV s překážkou, ztráta kontroly nad UAV z důvodu vybití baterie, nebo ztráty signálu vlivem přílišného vzdálení UAV od vysílačky. S rostoucí snahou vytvořit bezpečný provoz UAVs pomocí regulací jejich provozu roste také snaha v oblasti vývoje opatření sloužících jako zábrana vzniku kolizí rotujících vrtulí s překážkou, a tím zmírnění následků v případě nárazu. Avšak v oblasti definovaných možných následků stále existují mezery, a hodnocení rizik je neustále zlepšováno. Provoz bezpilotních systémů v jejich současné podobě není bezpečný v prostoru nad lidmi. V rámci norem se využívají prahové hodnoty, které stanovují hranici přijatelného rizika. V kontextu bezpečnosti lidského zdraví pak nad touto definovanou hodnotou existuje příliš vysoké riziko vzniku vážných zranění. Legislativa Evropské unie definuje prahovou hodnotu 80 J udávající maximální hodnotu kinetické energie, která může být přenesena při nárazu na člověka [2]. Vrtulová UAVs mohou způsobovat mechanická nebo nemechanická zranění. V rámci nemechanických zranění může dojít ke vzniku popálenin. Nejčastější mechanická zranění jsou tržné rány kůže, způsobené rotující

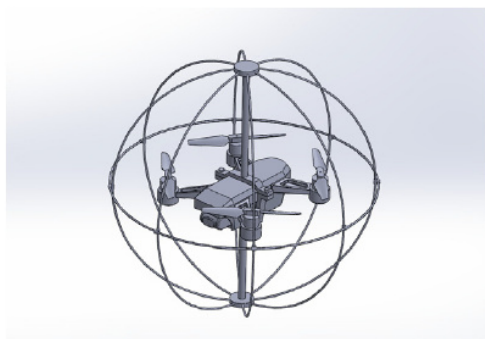
vrtulí, a tupá poranění hlavy. Nejběžněji pak vznikají řezné rány na ruku, či pažích. Avšak mohou vznikat i vážnější zranění, v podobě amputace prstů, či zlomenin. [8, 20–22]

Studiem odhadnutí rizik zranění hlavy a krku, která vzniknou jako následek nárazu vrtulového UAV do člověka, se zabývali například na polytechnické státní univerzitě Virginia Polytechnic Institute and State University, ve Spojených státech amerických. Během svého experimentu využili tři UAVs s různými hmotnostmi, v rozsahu 1,2 kg až 11 kg, a různým počtem ramen. Zkoumali následky, které vzniknou, jak při nárazu během letu, tak při pouhém pádu UAV. Pro testování byla využita 50-percentilní figurína Hybrid III. Při testování nárazu za letu zrychlovala UAVs na vzdálenosti 40 m, aby nejpozději při nárazu do hlavy figuríny dosáhla své maximální rychlosti. Při testech pádu byla UAVs shazována na figurínu z výšky 5,5 m. Pro zaznamenání testů byla využita vysokorychlostní kamera. Ze záznamů bylo možné určit chování UAVs po nárazech do figuríny. Na hlavě figuríny a v jejím těžišti bylo rozmístěno několik akcelerometrů, z jejichž naměřených dat se určilo lineární a úhlové zrychlení kolem těžiště hlavy. Na krk byl umístěn siloměr pro změření působících sil a momentů. Bylo vypořádováno, že s rostoucí hmotností se zvyšuje závažnost důsledků nárazu UAV. Také bylo zjištěno, že při testech nárazu při pádu UAV byla na figurínu přenášena větší energie, a tedy byly vyhodnoceny jako rizikovější než náraz při letu UAV. Fraktura lebky byla vyhodnocena jako velmi nepravděpodobná, avšak bylo zhodnoceno, že při nárazu UAV do lidské hlavy může vzniknout otřes mozku. Jako limitace testování byla uvedena nízká hmotnost použitých UAVs a tuhost krku figuríny, která neodpovídala zcela tuhosti lidského krku. [21]



Obrázek 1.3: Fotografie zásahů hlavy figuríny vrtulovým UAV, převzato z [21]

V oblasti bezpečnosti se neprojektují pouze regulace, ale dochází k vývoji bezpečnostních prvků, které mají za úkol omezit následky v případě střetu UAV s cizím tělesem. Jako příklad lze uvést článek, ve kterém bylo navrženo protikolizní UAV vhodné pro použití v případě inspekčních činností letadel. Pro kontrolu některých částí letadel musí pracovníci využít zvedací plošinu a celkový čas, potřebný pro provedení úkonu, je kolem půl hodiny. Při využití UAV a zařízení, které zabrání případným srážkám s letadlem, se výrazně zkrátí inspekční doba za dodržení požadované míry bezpečnosti. Protikolizní zařízení je navrženo jako kulová síť upevněná na trupu UAV, konkrétně kvadrokoptéry, a slouží k zábraně styku rotujících vrtulí s vnějšími překážkami, zde s povrchem letadla. [20]



Obrázek 1.4: Návrh protikolizního UAV, převzato z [20]

## 1.2 Pravidla létání s UAVs

Jelikož provoz bezpilotních systémů s sebou nese jistá rizika a jejich využívání se stává čtenější, jsou pro zachování požadované bezpečnosti stanovena pravidla pro jejich provoz. S ohledem na vývoj UAVs dochází k modifikaci pravidel využívání UAVs ve veřejném prostoru. Tato pravidla jsou vytyčena pomocí předpisů, u kterých se mohou vyskytovat odlišnosti v závislosti na území, nad kterým jsou UAVs provozována. Následující pravidla létání se vztahují pouze k provozu v rámci území Evropské unie a vychází z prováděcího nařízení Komise (EU) 2019/947.

Podmínky pro provozování bezpilotních systémů nad územím Evropské unie jsou rozděleny do tří základních kategorií – otevřená, specifická a certifikovaná. Jednotlivé kategorie jsou vytvořeny na základě míry rizika, kterou jejich provoz představuje, a dalších kritérií. Členské státy musí zřídit systémy pro registraci provozovatelů a bezpilotních systémů, při jejichž provozu může vzniknout riziko pro bezpečnost. Tyto systémy jsou digitální. Za dozor a dodržování pravidel jsou zodpovědné příslušné zvolené úřady v členských státech Evropské unie. [2]





Mezi pravidla omezující provoz bezpilotních systémů nad územím Evropské unie patří například minimální požadovaný věk pro dálkově řídicí piloty. Dále je u stanovených případů vyžadována registrace provozovatele, či oprávnění k provozu, pro které je potřeba dodání dokumentu s posouzením rizik, která vzniknou při provozu bezpilotního systému, a navrženými opatřeními pro jejich zmírnění. Dalším limitujícím faktorem je hmotnost UAVs či možnost shazování materiálu. V závislosti na kategorii provozu jsou stanovena příslušná pravidla, která je nutné splňovat. [2]

### 1.3 Současný stav testování ochranných sítí

Ochranné sítě našly své využití v různých odvětvích. Využívají se jako prevence proti pádu z výšek, například ve stavebnictví, ohraničují hřiště a sportovní areály jako ochrana majetku a zdraví lidí pohybujících se v okolí, v zemědělství jako prevence proti ptactvu, či v místech, kde hrozí pád části hornin nebo skal. [23–27]

Jelikož ochranné sítě slouží pro rozmanitou škálu různých účelů, charakteristiky sítě jako materiál pro jejich výrobu, struktura či mechanické vlastnosti jsou voleny podle požadovaných výsledných vlastností sítě. Jako příklad materiálu využívaného pro výrobu ochranných sítí lze uvést drátěná nebo plastová lana. [25, 26]

Před použitím ochranné sítě dochází k jejímu testování a ověření, zda je síť vhodná pro účel uživatele. Ochranné sítě musí být navrženy tak, aby odolaly lokálnímu poškození v místech koncentrace napětí [27]. Testováním nylonových a polypropylenových ochranných sítí, sloužících pro zachycení člověka při pádu z výšky, se zabýval Paul McCann BEng. Během jeho testování bylo sestaveno speciální zařízení (viz obrázek 1.5) pro zavěšení sítě a možnost shazení závaží do sítě. Nejdříve byl změřen průhyb, a následně bylo provedeno shazování závaží, vždy dvanáctkrát na každou zkoumanou síť do sedmi základních poloh, které zahrnovaly všechny reprezentativní části sítě včetně středu sítě a jejích okrajů. Závaží bylo tvořeno figurínou, koulí nebo válcem, vždy o hmotnosti 100 kg. Po testování záchytných vlastností nových nepoškozených sítí byly testovány i účinky, které vzniknou shazením závaží do sítě, do které byly předem vytvořeny vady poškozením jejich vláken. Kromě nových sítí byly testovány i sítě, které se před testováním využívaly, a to nejméně po dobu 12 měsíců. Pro vyhodnocení odolnosti sítě při pádu závaží byla využita data z tahové zkoušky a ze siloměrů, které byly rozmístěny po celé síti. [28]



Obrázek 1.5: Speciální zařízení pro testování ochranných sítí, převzato z [28]

Rovněž byla provedena testování ochranných sítí pro zachycení objektů v místech, kde by jejich pád mohl ohrozit zdraví člověka. Testování ochranných sítí pro tento účel provedli A. Lloyd a P. Barry na universitě New Brunswick, v Kanadě. Provedli celkem dvanáct testů na čtyřech různých sítích. Sítě, které zkoumali, byly vyrobeny z nylonu, nebo z polyesteru a PVC. Testování spočívalo v upevnění sítě do ocelového rámu, a následně byla vystřelována běžná cihla využívaná ve stavebnictví do sítě různými rychlostmi. Autoři se zaměřovali na výpočet kinetické energie cihly v době dopadu do sítě. [27]

Kromě již zmíněných testování ochranných sítí bylo provedeno mnoho dalších. V kontextu využití bezpilotních systémů byl proveden návrh a testování odpalovacího zařízení (viz obrázek 1.6) a sítě, sloužící k vystřelení a zachycení UAV. Experiment byl proveden na státní univerzitě ve městě Buffalo, ve Spojených státech amerických. V rámci tohoto experimentu byla provedena simulace, a následně experiment v laboratorním prostředí. [29]



Obrázek 1.6: Vystřelovací zařízení pro zachycení UAV, převzato z [29]



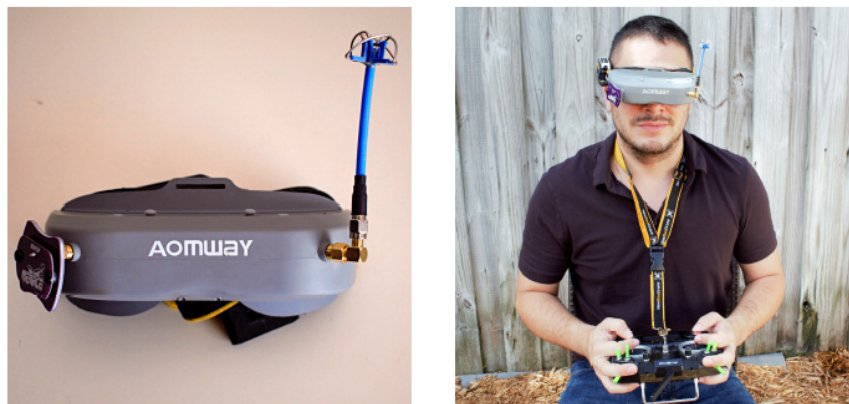
Dnes již existují i běžně dostupné zádržné sítě pro ohraničení prostoru, či k vytvoření bariéry proti UAVs. Tyto sítě jsou vyráběny z nylonu a polypropylenu, jejich cena je rozdílná a záleží na charakteristikách sítě jako je průměr vlákna nebo šířka ok sítě. Společnosti, které se zabývají prodejem těchto sítí jsou například NET WORLD SPORTS, SAFETYNETS365 nebo HAVERFORD. Informace o materiálu a ceně sítí byly získány z webových stránek jmenovaných společností [30–32]. Jak se tyto sítě testují se však nepodařilo dohledat. Účelem této bakalářské práce je navrhnout metodiku, jak otestovat, zda je zvolená síť adekvátní pro zachycení vrtulových UAVs při letu mimo letovou zónu. Navržená metodika je diskutována v kapitole 2 (Metody).

#### 1.4 Využití ochranných sítí ve spojitosti s provozováním vrtulových UAVs

Jak již bylo zmíněno ochranné sítě se využívají pro různé účely. Z pohledu této práce je důležité zaměřit se na využití ochranných sítí v souvislosti s provozem bezpilotních systémů. Konkrétně jejich využití primárně pro vrtulová UAVs. V tomto kontextu se ochranné sítě využívají pro zamezení průniku UAVs do nevhodných míst. Jako příklad lze uvést využití sítě k oplocení tratí sportu drone racing, zachycení UAV za letu, nebo je uživatel bezpilotního systému může využít pro vlastní účely. [29, 33]

##### **Drone racing**

U široké veřejnosti se bezpilotní systémy těší v poslední době velké oblibě. S tím je spojen vývoj sportu moderní doby nazývaný drone racing, který spočívá v dálkovém řízení UAV po předem stanovené závodní trati. Trate jsou vymezeny sekvencí bran a cílem je vyhnout se překážkám, a co nejrychleji proletět tuto závodní trať. I když jsou UAVs řízena trénovanými piloty, trati či jejich části mohou být ohraničeny ochrannými sítěmi z důvodu zamezení průletu mimo trať. Pro agilní let se využívají čtyřrotorová FPV UAVs (First Person View bezpilotní letadla) vybavena kamerou umístěnou v přední části, která snímá okolí v reálném čase. Kamerový obraz je následně pomocí speciálních brýlí promítnut pilotovi. Na obrázku 1.7 jsou zobrazeny speciální brýle pro FPV UAVs. Závody mohou probíhat i prostřednictvím simulátoru AirSim. Došlo i ke vzniku sportovních lig věnujících se tomuto sportu. Pořádají se i významné mezinárodní soutěže trénovaných pilotů s vysokými finančními výhrami. Jako příklad mezinárodních soutěží lze uvést The 2019 AlphaPilot Challenge nebo NeurIPS (2019) Game of Drones. [4, 33–35]



Obrázek 1.7: Speciální brýle využívané u FPV UAVs, převzato z [35]

### **Zařízení pro zachycení UAV během letu**

Přítomnost UAVs ve vzdušných prostorech, ve kterých jejich provoz není povolen, může způsobit různé komplikace. Převážně při neoprávněném výskytu UAV v prostorách letiště či letových tratí může dojít k ohrožení bezpečnosti letecké dopravy, nebo k jejímu dočasnému omezení. Využití bezpilotních systémů kromě zmíněných aplikací může být také zneužito pro získání důvěrných informací. Pro zamezení vniku UAV do těchto míst a předcházení vzniku obdobných situací bylo vyvinuto několik řešení, v rámci elektronických funkcí, například geofencing nebo spoofing. Geofencing je funkce vytvářející virtuální geografickou hranici, která ohraničuje oblast zájmu a slouží k udržení UAVs mimo tento prostor. Funkce spoofing funguje na principu vysílání falešných signálů, na základě nichž UAVs vyhodnotí svoji polohu nesprávně. Obě funkce využívají globální družicové polohové systémy (GNSS). Pro mechanické zachycení UAV jsou vyvíjena vystřelovací zařízení, která se upevňují na létající UAVs. Principem je vystřelení dostatečně lehké a pevné sítě, která nepodlehne poškození rotujících vrtulí zachycovaného UAV. Účelem není neoprávněné UAV zničit, ale pouze zachytit. Při dopadu sítě na cíl dojde k jeho omotání sítě. [29, 36–38]

### **Vlastní účely uživatele**

Jelikož provoz bezpilotních systémů je svázán pravidly a podmínkami pro jejich provoz, může uživatel bezpilotních systémů využít ochranné sítě pro ohraničení prostoru, ve kterém zamýšlí jejich provoz. Kupříkladu u konceptu provozu vzdělávacích míst pro vrtulová UAVs, který by do budoucna mohl zajistit místa pro bezpečný provoz bezpilotních systémů, výuku dětí a osvětu laické i letecké komunity. Prostor těchto míst by byl vymezen ochrannou sítí odpovídajících vlastností.



Síť by představovala šetrnější způsob ohraničení prostoru, který by se promítl ve snížení rizika vzniku poškození UAV při jeho nárazu do ohraničení. Tento koncept by vytvořil zjednodušené podmínky pro provoz bezpilotních systémů, a tím by podpořil mladé nadšence, ale i výuku a trénování praktických dovedností pilotů. Koncept provozu vzdělávacích míst pro vrtulová UAVs je uveden v následující kapitole.

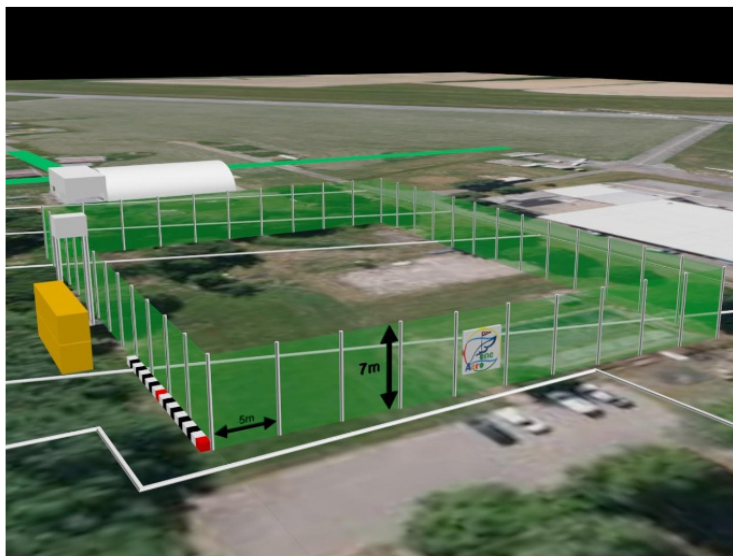
## 1.5 Koncept provozu vzdělávacích míst pro vrtulová UAVs

V letošním roce podal Ústav mechaniky a materiálů, fakulty dopravní ČVUT, projekt s účelem vyvinout dostatečné podklady pro realizaci tohoto konceptu. Koncept zahrnuje vytvoření geozóny se sníženými pravidly. Geozóny jsou části vzdušného prostoru, vymezené geografické zóny, zbudované za účelem omezit, nebo vyloučit provoz UAVs [39]. Uvažuje se vymezení dostatečně velké plochy v blízkosti letiště, popřípadě v místě plochy SLZ, která bude oplocena pomocí ochranných sítí o rozměrech  $7 \times 7$  m. Ve výšce horního konce sítí bude zřízena elektronická horizontální hranice zajištěna pomocí funkcí typu geocaging, které zajišťují, aby UAVs neopustila příslušnou geozónu. Velikost vymezené plochy bude závislá na parametrech UAVs, pro která se bude uvažovat provoz.

Za dodržování pravidel provozu bude zodpovědný provozovatel vzdělávacího místa, který bude muset zajistit splnění podmínek pro schválení provozu vzdělávacího místa příslušným úřadem. Příslušný úřad bude muset ověřit, že bezpečnost okolního leteckého provozu nebude tímto konceptem ohrožena a že vymezený prostor pro provoz bezpilotních systémů nebude zasahovat do ochranných pásem. Provozovatelem vzdělávacího místa může být i provozovatel letiště.

Výuka bude prováděna způsobilými osobami, které budou držitelem minimálně průkazu způsobilosti dálkově řídicího pilota A2. Dále musí provozovatel zajistit, že v ohraničeném prostoru bude prováděn pouze provoz bezpilotních systémů do předem stanovených rozměrů a hmotností, na které bude dimenzována příslušná ochranná síť. Provoz bezpilotních systémů bude povolen pouze za vizuálních referencí a ve chvíli, kdy se ve vymezeném prostoru nebude nacházet žádná osoba. Veškeré osoby, ať už zúčastňující se provozu, či ne, musí být během provozu v dostatečné vzdálenosti od ochranné sítě. Omezením pohybu osob v blízkosti ochranné sítě se předejde potenciálnímu ohrožení zdraví, či poškození majetku v případě ulomení části UAV a jejího průletu skrz oko sítě. Postupy výuky a odpovědnosti musí být předem stanoveny v provozním řádu. Provozní doba bude vymezena provozovatelem. Pro umožnění nočního provozu musí být zřízeno

osvětlení, které nebude vytvářet klamavá světla. Na obrázku 1.8 je zachycena plánovaná instalace konceptu vzdělávacích míst.



Obrázek 1.8: Vizualizace konceptu vzdělávacích míst pro vrtulová UAVs

Hlavním důvodem pro zřízení vzdělávacích míst je zřízení vhodných podmínek pro děti a osoby, které nesplňují požadavky předpisu, a také vytvoření vhodných podmínek pro trénink dálkově řídicích pilotů. Vše za dodržení požadované míry bezpečnosti. Nevýhodou bude omezená velikost prostoru, avšak koncept bude modulární a bude možné ho navrhnout podle konkrétních potřeb. Vždy tedy bude navržen tak, aby splňoval požadavky na předpokládaný provoz. S touto koncepcí vznikne prostředí ulehčující výuku a osvětu v oblasti bezpilotních systémů. Pro provoz, v rámci vzdělávacích míst na území EU, budou uvažována pravidla prováděcího nařízení Komise (EU) 2019/947 a budou uděleny následující výjimky.

- Všechna UAVs budou moci shazovat materiál.
- Provozovateli bude udělena výjimka, kdy učící se dálkově řídicí piloti nebudou muset být obeznámeni s uživatelskou příručkou, která byla poskytnuta výrobcem bezpilotního systému.
- Za předpokladu splnění podmínek na způsobilost osob vykonávajících výuku bude udělena výjimka vztážená k učícím se dálkově řídicím pilotům, kteří nebudou muset splňovat požadavky na způsobilost.
- Minimální věk pro dálkové řízení UAV bude snížen na 6 let.





- Hmotnostní omezení UAVs, jejichž provoz bude zamýšlen, bude stanoveno pouze na základě provozního řádu vzdělávacího centra, a vždy se bude odvíjet od zádržných schopností sítě.

Projekt pro vytvoření tohoto konceptu byl podán na Technologickou agenturu ČR, a pokud bude vybrán a získá dostatečné financování, bude zahájen v lednu roku 2024. Projekt je plánován na dobu dvou let, proto popis v této práci byl proveden pouze okrajově. Účelem této práce není tento koncept navrhnout či rozvinout, proto dále bude rozvíjeno pouze testování ochranných sítí.



## 2 Metody

### 2.1 Návrh metodiky

Pro návrh metodiky, která bude sloužit pro otestování ochranných sítí využitelných pro zachycení vrtulových UAVs při letu mimo letovou zónu ve vzduchu, je potřeba nejdříve zjistit základní mechanické vlastnosti zvolené sítě. Pro zjištění mechanických vlastností je zvolena statická zkouška tahem. V závislosti na konkrétní síti musí být zvolen adekvátní počet sad vzorků pro zahrnutí všech potenciálních míst s odlišnými vlastnostmi. V každé sadě pak musí být otestováno minimálně pět vzorků pro získání spolehlivých průměrových hodnot. Naměřená data z tahových zkoušek se následně využijí pro vyhodnocení, která část sítě disponuje nejvyšší pravděpodobností pro přetrhnutí. Zde je důležité také v jakých místech převládá poškození vzorků. Pro vyhodnocení dat a vykreslení diagramů tahových zkoušek může být využit libovolný vhodný softwarový nástroj, kupříkladu Matlab. Část sítě, která se vyhodnotí jako nejrizikovější pro přetrhnutí, bude zvolena pro následné laboratorní testování. Metodika nevyklučuje možnost testování více, či všech sad vzorků, v rámci laboratorních testů vlivu nárazu listu vrtule do části sítě. Vždy je třeba dodržet stejný postup.

Pro laboratorní testování musí být zvoleny příslušné vrtule pro UAVs, pro které se uvažuje provoz v prostoru ohraničeném ochrannou sítí. Vrtule se liší svými vlastnostmi jako je pevnost, tuhost, odpor, ostrost náběžné hrany a dalšími, nelze tedy obecně stanovit účinky vyvozené na síť pro skupinu zahrnující všechny existující vrtule pouze v závislosti na počtu jejich listů. Z toho důvodu je potřeba zahrnout do testování právě ty vrtule, které budou využívány v zamýšleném provozu. Pro testování se musí zvolit minimálně dvě hodnoty napnutí sítě, přičemž jedna hodnota musí představovat maximální hodnotu zamýšleného napnutí při využití sítě. Dvě hodnoty napnutí byly zvoleny, jelikož i při reálném využití sítě se hodnota napnutí v různých místech liší.

U každé vrtule musí být proveden minimálně jeden laboratorní test pro každou hodnotu napnutí, přičemž v rámci jednoho testu budou simulovány tři lineární posuny motoru s rotující vrtulí ke vzorku. Následně se provede tahová zkouška vzorků, které byly vystaveny kolizím, a porovnání naměřených dat s daty tahových zkoušek nepoškozených vzorků. Pro zjednodušení porovnání výsledků lze využít průměrovou křivku z tahových zkoušek nepoškozených vzorků, vždy však musí být tento průměr porovnáván se vzorky z totožné sady.





Laboratorní testy byly zvoleny, jelikož při nich byly simulovány mnohonásobně větší kolize, než k jakým dochází během reálného provozu. Proto výsledné poškození představuje výsledek, který by vznikl až při extrémních situacích. Protože tato metodika cílí převážně na testování sítí využitelných pro ohraničení prostoru pro provoz vrtulových UAVs, a tedy sítě budou velkých rozměrů, lze tvrdit, že takto několikanásobný náraz UAV do sítě v jednom konkrétním místě je velmi nepravděpodobný. V případě, že by vznikla tato velmi nepravděpodobná situace a síť by byla rotující vrtulí přetržena, vznikne poškození jednoho lanka, či spoje, avšak síť vzhledem k velikosti ok zůstane stále dostatečně kompaktní, aby zadržela UAV v požadovaném prostoru. Po nález takového poškození bude síť vyměněna.

Do metodiky je zahrnuto okrajově i testování zachycení vrtulového UAV v reálných podmínkách, za využití reálného UAV a kompletní ochranné sítě. V tomto případě jsou zkoumány účinky, které vzniknou při nárazu celého UAV do sítě. Opět za využití vrtulí, u kterých se předpokládá jejich využití během zamýšleného provozu. Do sítě je nalétáváno vrtulovým UAV různými rychlostmi pro možnost získání široké škály poškození. Náletů musí být provedeno minimálně 15 do stanovené výšece sítě o rozměrech  $2 \times 2$  m. Během reálného provozu se předpokládá, že bude docházet ke styku vrtulí UAV se sítí v různých místech. Tento rozměr výšece je zvolen pro vytvoření podmínek, při nichž bude existovat pravděpodobnost vzniku opakovaných nárazů do stejných míst. Při experimentu je sledováno, zda dojde k vytvoření detekovatelného poškození při relativním zachování podmínek, jako u reálného provozu. Pokud by docházelo ke zvětšení výšece, muselo by dojít i k odpovídajícímu zvětšení počtu náletů UAV. Následně jsou místa s vizuálním poškozením v prostoru výšece převedena do sad vzorků v závislosti na tom, kde se poškození bude nacházet. Se vzorky je provedena tahová zkouška za stejných podmínek jako u tahových zkoušek nepoškozených vzorků, a naměřená data jsou následně porovnána s výsledky tahových zkoušek nepoškozených vzorků, obdobně jako u laboratorních testů. Metodika předpokládá, že pokud na síti nebude detekovatelné vizuální poškození, mechanické vlastnosti sítě nebyly ovlivněny.

V závislosti na změně hodnoty maximálních zatěžovacích sil a účinků vzniklých na ochranné síti je zhodnoceno, zda je síť způsobilá pro daný účel, popřípadě, zdali je způsobilá, pokud by některé z testovaných vrtulí byly vyloučeny z provozu. Pro prevenci vzniku většího poškození sítě, které by již mohlo mít za následek únik UAV mimo ohraničený prostor, bude síť kontrolována pomocí vizuálních prohlídek. Během prohlídek budou uvažována poškození v podobě roztrženého lanka, či spoje sítě, nebo jejich částečného, avšak výrazného natržení. Předpokládá se, že poškození, která by mohla mít



za následek zvýšení rizika vzniku poškození takových rozměrů, které by umožnilo únik UAV, jsou vizuálně detekovatelná. Četnost prohlídek bude stanovena provozovatelem v závislosti na objemu provozu. Vizualní prohlídky budou prováděny oprávněnými povolanými osobami. Pro prohlídky může být využit UAV, který splňuje parametry zamýšleného provozu a který bude vybaven kamerou. Následně, pokud bude během prohlídky objeveno definované poškození sítě, bude síť vyměněna. Pokud síť nebude vyměněna z důvodu nálezu poškození po stanovenou dobu, bude vyměněna preventivně. Tato doba bude vycházet z výsledků naměřených dat a míry poškození, vytvořeného konkrétními vrtulemi na konkrétní síti. V případě, že by byla zvolena síť s oky srovnatelně velkými s rozměry používaných UAVs, musela by tato metodika být upravena, konkrétně pak postup prohlídek. Metodika nezahrnuje testování zádržné schopnosti sítě v případě jejich oprav, a tedy se nedoporučuje v případě poškození sítě opravovat. Shrnutí kroků metodiky je uvedeno v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Postup metodiky

	Jednotlivé kroky metodiky	Parametry
1	Tahová zkouška nepoškozených vzorků	Sada – minimálně 5 vzorků
2	Zkoušky vlivu nárazu listu vrtule do části sítě	Hodnota napnutí, vrtule
3	Tahová zkouška vzorků vystavených kolizím	-
4	Testování zachycení UAV v reálných podmínkách	Vrtule, 15 náletů, výše sítě $2 \times 2$ m
5	Tahová zkouška vzorků z reálného experimentu	-
6	Porovnání změn v mechanických vlastnostech sítě	-

Pro otestování navržené metodiky byla vybrána jedna konkrétní polypropylenová síť, která byla pořízena u společnosti POKORNÝ-SÍTĚ. Polypropylen je jeden z nejlehčích termoplastických polymerů [40], který se využívá primárně pro jeho dobré vlastnosti a lepší odolnost proti vyšším teplotám, jeho další výhodou jsou nízké pořizovací náklady [41, 42]. Při používání dochází k degradaci materiálu, která může vzniknout i jeho stárnutím, jemuž se nedá předcházet [28]. Kromě stárnutí a degradace materiálu jeho využíváním, podléhají polymery vysokým teplotám. „*S rostoucí teplotou se snižuje pevnost polymeru*“ [43]. Charakteristiky a odolnost polymeru se liší v závislosti na jeho druhu [44]. Avšak výrazné strukturální změny vznikají při vyšších teplotách než se běžně vyskytují v okolním prostředí [45]. Přesto účinky, které by vznikly při využívání sítě v teplotách v severních polohách, oproti účinkům vzniklým v teplotních podmínkách na jihu, nebyly v rámci práce zkoumány. Účinky stárnutí, ani případná dřívější degradace materiálu způsobená teplotou, nebyly do metodiky zahrnuty, a proto budou zmíněny v limitacích této práce. Průměr lanka



sítě byl 3 mm a rozměry oka 120 × 120 mm. Tato síť byla zvolena s ohledem na to, že je to běžně dostupná síť využívaná pro různé sportovní aktivity. Následující kapitoly detailněji rozebírají jednotlivé kroky metodiky a výsledky testované polypropylenové sítě. Zvolená síť je zobrazena na obrázku 2.7.

## 2.2 Test polypropylenové sítě

### 2.2.1 Tahová zkouška

Existují různé druhy namáhání, avšak obecně bylo stanoveno pět základních druhů, a to namáhání tahem, tlakem, krutem, smykem a ohybem. V reálných situacích dochází k zatěžování i více druhy namáhání najednou, jak je popsáno například v článku [46]. Pro zjištění mechanických vlastností sítě, které charakterizují odolnost materiálu proti vnějším silám, byla zvolena normalizovaná statická zkouška tahem. Během tahové zkoušky dochází k deformaci vzorku působením postupně se zvyšujícího tahového zatížení, zpravidla do přetrhnutí vzorku. Tahové zatížení je vyvozováno zatěžovacím strojem pomocí velmi pomalého pohybu příčnicku. Výstupem z tahové zkoušky je pracovní diagram zobrazující závislost zatěžovací síly  $F$ , primárně vyjádřené v kN, na prodloužení  $\Delta L$  uváděném v jednotkách mm. Síla  $F$  je snímána siloměrem a prodloužení  $\Delta L$  je získáno měřením pozice příčnicku [47]. V důsledku zvyšování tahové síly  $F$  vzniká prodloužení  $\Delta L$  původní délky vzorku  $L_0$  na okamžitou délku  $L$ , a současně dochází ke zmenšování původního průřezu  $S_0$  na okamžitý průřez  $S$ . Prodloužení lze vypočítat následujícím vzorcem. [48]

$$\Delta L = L - L_0 \quad (2.1)$$

Druhou možností grafického vyjádření tahové zkoušky je závislost mechanického napětí  $\sigma$ , uváděného v MPa, na relativním prodloužení  $\varepsilon$ . Tuto závislost získáme přepočtem síly  $F$  a prodloužení  $\Delta L$  pomocí následujících vzorců.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (2.2)$$

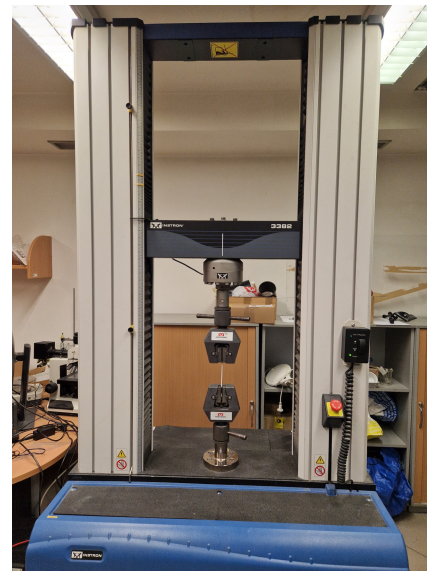
kde  $F$  je zatěžovací síla a  $S_0$  je původní průřez vzorku,  $\Delta L$  je prodloužení vzorku a  $L_0$  je jeho původní délka. Relativní prodloužení  $\varepsilon$  je bezrozměrná veličina.

Pomocí statických zkoušek lze pozorovat projevy působících vnějších sil z krátkodobého, či dlouhodobého hlediska. V případě testování sítě byly pozorovány účinky krátkodobého působení

vnějších sil. Na vzorky byla vyvíjena spojitá síla pohybujících se čelistí zatěžovacího stroje při konstantní rychlosti 20 mm/min. Délka jednotlivých testů se lišila v závislosti na druhu vzorku. Pokud během testu došlo k částečnému poškození vzorku, projevilo se v diagramu skokovou změnou velikosti působící síly  $F$  (dále v textu označení pouze síla a prodloužení). Tahová zkouška byla provedena za pokojové teploty pomocí uniaxiálního stroje Instron 3382, který je zobrazen na obrázku 2.1. Zatěžovací stroj ukládal data s frekvencí 10 Hz, neboli deset hodnot za sekundu.



(a) Detailní upevnění vzorku v čelistech

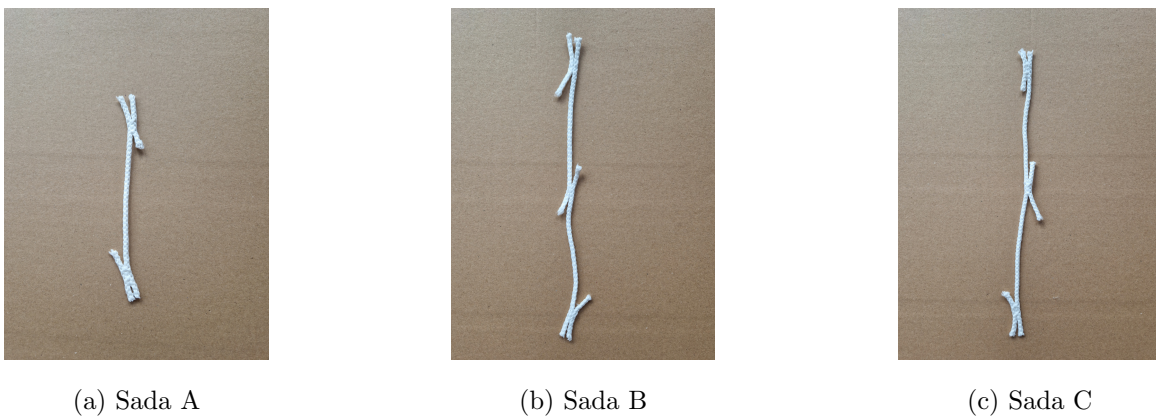


(b) Pohled na celý zatěžovací stroj Instron 3382

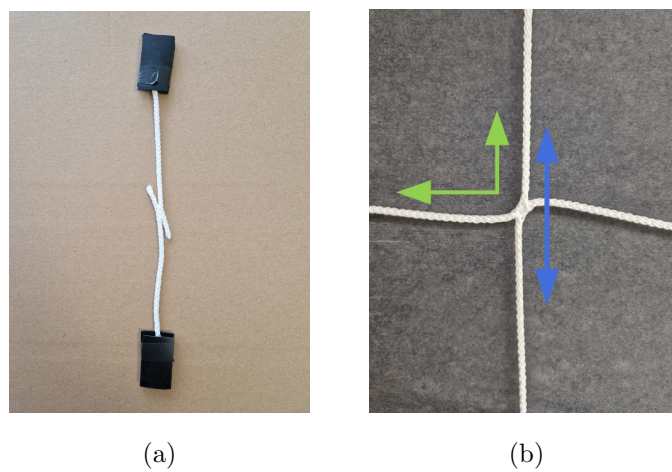
Obrázek 2.1: Zatěžovací stroj Instron 3382

Pro zjištění pevnosti v tahu byly vybrány tři reprezentativní sady vzorků různých částí sítě, které byly pro jednoduchost označeny jako sada A, sada B a sada C. Testovací vzorky sady A byly tvořeny pouze lankem sítě. Sada B a sada C byly tvořeny vzorky, u kterých se zjišťovala odolnost proti přetrhnutí u spoje sítě. Spoj sítě byl vždy tvořen dvěma navzájem propletenými lanky sítě, přičemž jedno lanko bylo do spoje přivedeno ve vertikálním smyslu orientace, a následně ze spoje bylo vedeno v horizontálním směru. Druhé lanko ve spoji bylo vedeno opačně, nejdříve ve směru horizontálním, a za spojem bylo taženo ve vertikálním směru. V případě vzorků sady B byl spoj namáhán vždy za jeden konec každého lanka umístěného v jedné ose. Vzorky sady C byly natahovány ve směru pouze jednoho z lanek. Pro zjištění mechanických vlastností byly využity vzorky z nové a nijak nepoškozené sítě.

Pro zajištění dostatečného upevnění vzorku a zamezení jeho předčasnému uvolnění z čelistí zatěžovacího stroje, byly vzorky tvořeny testovací částí, a navíc dvěma spoji, které sloužily k lepšímu upevnění. Při upevnění samotného vzorku do čelistí docházelo během provádění zkoušky k porušení vzorku v místě hrany čelisti, proto byly konce vzorků před vložením do čelistí umístěny mezi dva obdélníkové kusy gumy šířky 2 mm. Gumové obdélníky byly následně staženy lepící páskou pro lepší manipulaci se vzorky při upevňování do čelistí před provedením zkoušky. Při prvních zkouškách s takto upevněným vzorkem docházelo k jeho vyklouznutí, proto muselo dojít k velmi razantnímu utažení. Následující obrázky zachycují zástupce z každé sady (viz obrázek 2.2), upevnění konců vzorku mezi gumové obdélníky (viz obrázek 2.3a) a spoj sítě, kde je modrou šipkou znázorněn směr, ve kterém byly namáhány vzorky sady B, zelenou šipkou směr namáhání pro vzorky sady C (viz obrázek 2.3b).



Obrázek 2.2: Zástupce vzorků jednotlivých sad



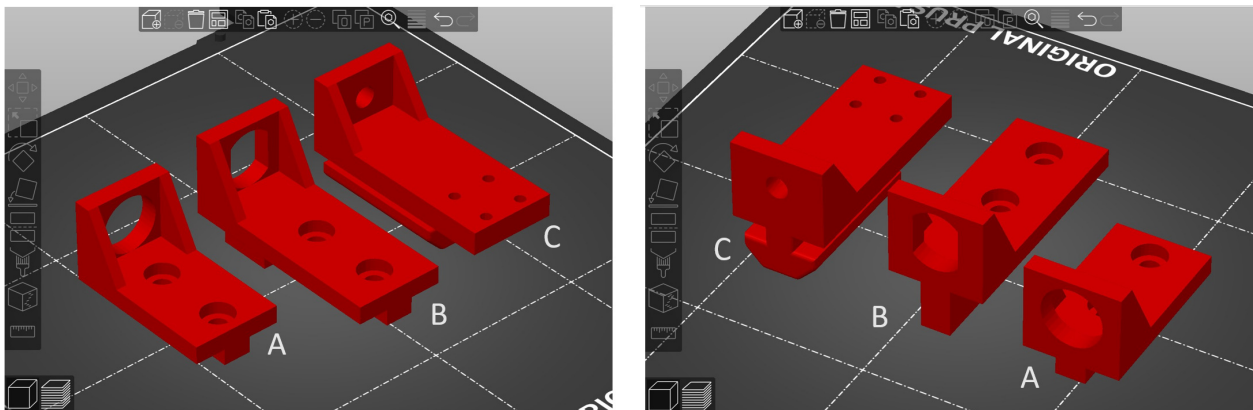
Obrázek 2.3: Upevnění vzorku v gumových obdélnících (a), spoj sítě (b)



### 2.2.2 Testy vlivu nárazu listu vrtule do části sítě

Po provedení tahové zkoušky následovala simulace kolize různých druhů dvoulistých a třílistých vrtulí se vzorky sítě. Pro simulaci nárazu vrtule do sítě bylo sestaveno experimentální zařízení umožňující roztočení vrtule a její následné posunutí tak, aby došlo ke kolizím se vzorkem sítě přímo v zatěžovacím stroji. Experimentální zařízení bylo sestaveno z kompresoru, pneumatického válce, motoru, baterií, přijímače, vysílače, regulátoru řízení a upevňovacích prvků.

Přímočarý pohyb motoru s vrtulí ke vzorku sítě byl zajištěn pomocí pneumatického dvojčinného válce s průměrem pístu 16 mm a zdvihem 150 mm. Nejprve byl pneumatický válec upevněn pomocí dvou na míru navržených upevňovacích prvků (s označením A a B na obrázku 2.4), vždy po jednom z každé strany válce, na hliníkový profil značky Aluteck. Design upevňovacích prvků byl navržen formou technického výkresu, a následně předán k vyhotovení. Pro výrobu upevňovacích prvků byla využita tiskárna PRUSA 3i MK3S+ a materiál červený PLA, také od výrobce PRUSA. Následně byl pneumatický válec připojen na kompresor KOM-24 značky Lumag. Na opačné straně pneumatického válce byla pístová tyč upevněna pomocí matice na třetí upevňovací prvek (s označením C na obrázku 2.4), sloužící jako kluzné ložisko nesoucí motor s vrtulí při zdvihu pneumatického válce. Na tomto upevňovacím prvku byl upevněn motor GR2306 značky GEPRC s 2 750 kV a odporem 33 mΩ. Motor byl upevněn pomocí čtyř šroubů ve spodní části. Obrázek 2.4 zachycuje návrh podoby upevňovacích prvků ve 3D programu.



Obrázek 2.4: Upevňovací prvky

Zdroj pro motor tvořily dvě baterie, které přímo napájely regulátor řízení. Byly zvoleny olovněné akumulátory značky Westinghouse s jmenovitým napětím 6 V. Pro dosažení jmenovitého napětí



v rozsahu, ve kterém zvolený motor pracoval, byly baterie zapojeny sériově. Tento typ zdroje byl použit z důvodu nižších pořizovacích nákladů.

Motor byl ovládán pomocí regulátoru řízení značky Graupner Ultra control 30A, který reguloval proud vcházející do motoru, a pomocí něhož byly upravovány otáčky. Do regulátoru vedl rádiový přijímač, který byl napájen externě pomocí jedné 6 V baterie. Přijímač s regulátorem byl propojen dvěma vodiči, jimiž bylo určováno, kolik energie bylo přivedeno do motoru. V regulátoru je umístěna součástka KRYSTAL, která měla stejnou frekvenci jako vysílač. Pomocí vstupů vysílače byly regulovány otáčky motoru. Takto připravené zařízení bylo v závislosti na zapojení využito pro levotočivé i pravotočivé vrtule.

V rámci laboratorních testů byly testovány účinky kolize vrtulí, které se běžně využívají pro závodní, nebo vlastnoručně sestavené UAVs. Bylo uvažováno 9 různých vrtulí, mezi kterými převažovaly třílisté vrtule a dvě ze zvolených vrtulí byly dvoulisté. Vrtule a jejich charakteristiky jsou zaznamenány v tabulce 2.2, kde velikost vrtulí je uváděna v palcích.

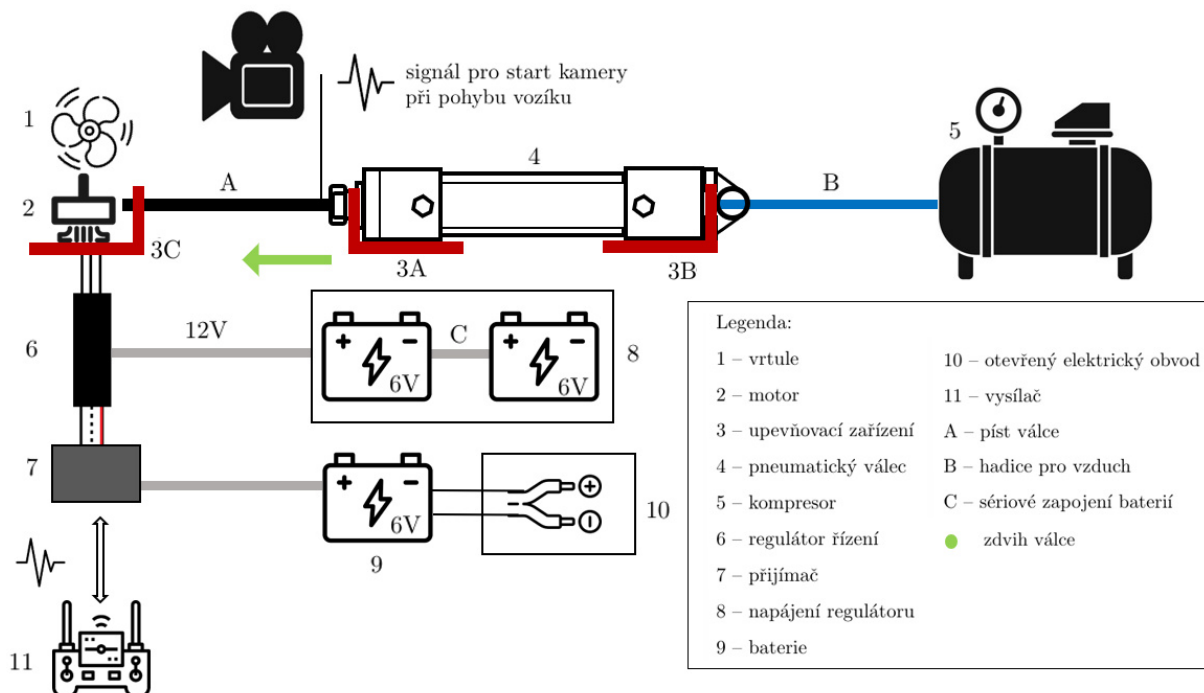
Tabulka 2.2: Typy vrtulí, jimiž byly prováděny laboratorní testy

	Značka	Označení	Velikost	Počet listů	Materiál
1	Dalprop	New cyclone V2 5143.5	5	3	Polykarbonát
2	GEPRC	GEP – P3042-3	3	3	Polykarbonát
3	GEPRC	GEP – 5043-3	5	3	Polykarbonát
4	Dalprop	Cyclone 7056C PRO	7	3	Polykarbonát
5	EMAX	Avan scimitar 50303	5	3	Polykarbonát
6	EMAX	Avan scimitar 40283	4	3	Polykarbonát
7	Dalprop	5045 V2 Bullnose	5	2	Polykarbonát, skelné vlákno
8	Stablecam	1DJ1152	5	3	Plast
9	GemFan	5045 GRP	5	2	Nylon

Hliníkový profil byl následně upevněn pomocí šroubů na již sestavenou konstrukci z hliníkových profilů, do výšky vzorku umístěného v čelistech zatěžovacího stroje. Zjednodušené schéma experimentálního zařízení je zachyceno na obrázku 2.5. Kromě experimentálního zařízení bylo na konstrukci upevněno i osvětlení sestávající se ze světél s vysokou intenzitou. Byla použita dvě světla GS Vitec multiled QT, u kterých je možné měnit intenzitu světla pomocí řídicího panelu multi Led G8. Testy probíhaly v místnosti bez oken za vypnutých zářivek, které blikají s určitou

frekvencí, která by mohla negativně ovlivnit záznam z vysokorychlostní kamery. Při testech byla využita pouze multiled světla s intenzitou 100 %.

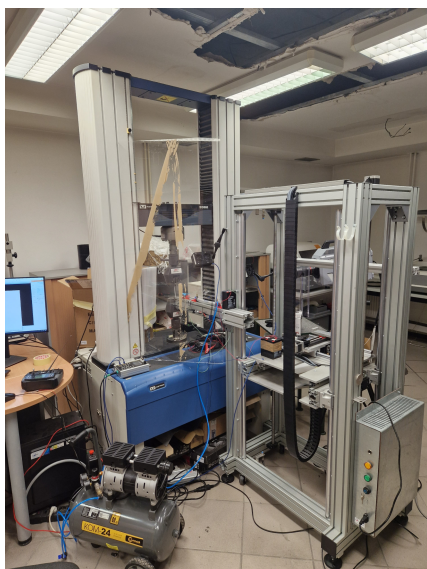
Vysokorychlostní snímkování bylo zajištěno kamerou Photron SA-Z. Pro spuštění snímkování byla využita funkce TTL trigger, která funguje na základě vytvoření pulzu [49]. Pulz byl na kameru přiveden pomocí otevřeného elektrického obvodu, který byl zcela nezávislý na zbylém zařízení. Trigger kamery byl spuštěn ve chvíli, kdy byl kompresorem do pneumatického válce vpuštěn vzduch a pístová tyč posunula motor ke vzorku. V ten okamžik došlo k dotyku obou konců otevřeného obvodu a na kameru byl přiveden spouštěcí signál TTL. Následně kamera pořídila záznam s frekvencí 20 000 snímků/s v rozlišení 1 024 × 1 024 pixelů. Obrázek 2.5 zobrazuje kromě zjednodušeného schématu experimentálního zařízení také obvod pro TTL trigger kamery.



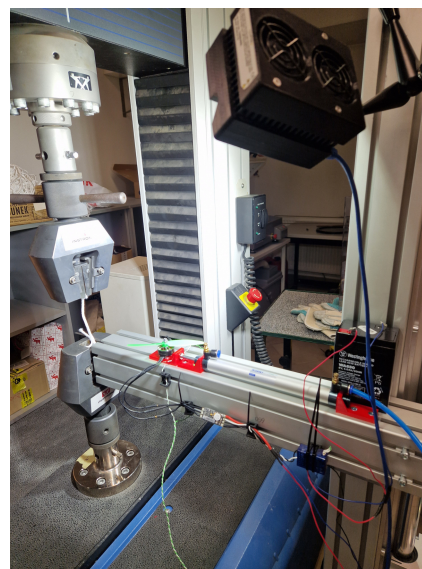
Obrázek 2.5: Zjednodušené schéma testovacího zařízení

Z důvodu bezpečnosti bylo stanoviště operátora opatřeno štítem. Kamera byla postavena při většině testů na pravou stranu hliníkové konstrukce. Před objektiv kamery byl z preventivních důvodů umístěn druhý štít, aby letícími fragmenty vrtulí nedošlo k poškození optiky kamery. Experimentální zařízení a laboratoř, ve které probíhalo testování, jsou zachyceny na obrázku 2.6.





(a) Celková situace



(b) Experimentální zařízení

Obrázek 2.6: Fotografie laboratoře

Laboratorní testy byly prováděny ve dvou fázích. Nejdříve při napnutí vzorku sítě na 2 N, následně při napnutí vzorku sítě na 20 N. Dvě různé hodnoty napnutí byly zvoleny, aby bylo možné posoudit, jak se liší účinky, které vzniknou v závislosti na různém napnutí sítě. Za předpokladu, že testovací zařízení bylo zcela nachystáno a na motoru byla připevněna zvolená vrtule, se jedna část testu skládala z přípravy kamery na snímkování v programu Photron v připojeném počítači, následného roztočení vrtule na plné otáčky a vpuštění vzduchu kompresoru do pneumatického válce, který provedl zdvih pístové tyče, a tím posunul motor s rotující vrtulí ke vzorku. Během zdvihu pístové tyče došlo k dotyku dvou konců otevřeného obvodu pro TTL trigger a kamera začala v daný okamžik snímkovat. Mnohonásobná kolize vrtule se vzorkem trvala až do zastavení vrtule z důvodu odporu napnutého vzorku sítě. Pro vzorky sítě byla takto simulovaná kolize provedena třikrát, a následně byly vzorky sítě opět vystaveny tahové zkoušce. Získaná data jsou prezentována v kapitole 3 (Výsledky) a porovnání dat z tahové zkoušky nepoškozených vzorků a vzorků, na kterých byly simulovány kolize, je řešeno v kapitole 4 (Diskuze).

### 2.2.3 Testování zachycení dronu v reálných podmínkách

Kromě laboratorních testů kolizí rotující vrtule se vzorkem sítě byl proveden experiment, při kterém bylo nalétáváno reálným vrtulovým dronem do kompletní ochranné sítě. Experiment probíhal v tělocvičně o velikosti 30,1 × 11,4 m. Nejprve byla natažena síť o rozměrech 7 × 7 m. Tento rozměr



sítě byl zvolen, aby korespondoval s vhodnými rozměry sítě pro koncept vzdělávacích míst pro vrtulová UAVs (viz kapitola 1.5). Síť byla napnuta mezi dva volejbalové sloupky. Přímé upevnění na jeden volejbalový sloupek bylo provedeno pomocí karabin, umístěných vždy v každém pátém oku sítě po jejím obvodu, a tedy ve vzdálenosti 60 cm od sebe. Karabiny byly upevněny na volejbalový sloupek pomocí stahovacích pásek. Na opačné straně obvodu sítě byl počet karabin zvýšen pro zajištění rovnoměrného napnutí sítě. Karabiny byly rozmístěny tak, aby se nacházela vždy jedna karabina v každém druhém oku, tedy po 24 cm. Karabinami dále bylo protaženo lano, a pomocí lana, upevněného na druhém volejbalovém sloupku, napnuta síť. Na horní straně sítě bylo protaženo lano skrze karabiny a napnuto po obou stranách na volejbalové sloupky. Takto napnutá síť byla zavěšena do výšky volejbalových sloupků, která činila 2,6 m. Spodní strana sítě byla řešena stejným způsobem jako horní strana, byly využity karabiny a lano pro napnutí. Jelikož síť byla napnuta pouze do výšky 2,6 m, karabiny byly rozmístěny v řadě ok sítě v této vzdálenosti od horního okraje. Zbytek sítě byl ponechán volně na podlaze, a síť tedy v konečném důsledku disponovala rozměry  $7 \times 2,6$  m. Karabiny na horní a dolní straně sítě byly rozmístěny po stejných vzdálenostech jako na straně s přímým upevněním. Tímto postupem bylo dosaženo rovnoměrného napnutí sítě o předpokládaném vypnutí, jako při zamýšlené instalaci celého rozměru  $7 \times 7$  m.

Dále bylo rozmístěno osvětlení a kamery. Osvětlení bylo využito stejné jako u laboratorních testů a bylo připevněno pomocí stahovacích pásek na badmintonové mobilní sloupky. Mezi osvětlení byla umístěna vysokorychlostní kamera, která byla využita také i během laboratorních testů. Na vysokorychlostní kameře byl dále umístěn fotoaparát Canon PowerShot G7 X Mark II pro zachycení celkové situace. Na pravé stěně tělocvičny, těsně před sítí, bylo rozmístěno 7 značek ve vzdálenostech po 42 cm. Pomocí značek byla následně vypočtena rychlost letu dronu  $v_d$ . Pro možnost výpočtu rychlosti letu  $v_d$  byl použit druhý fotoaparát Canon EOS 80D, umístěný kolmo na pravý okraj sítě směrem ke značkám ve výšce trajektorie letu. Na obrázku 2.7 je zachycena celková situace při experimentu a na obrázku 2.8 jsou zachyceny značky pro výpočet rychlosti.



Obrázek 2.7: Celková situace – reálný experiment



Obrázek 2.8: Značky pro výpočet rychlosti letu dronu  $v_d$

Pro lepší rozlišení nalétávajícího dronu vysokorychlostní kamerou na tmavém pozadí byl za síť umístěn bílý banner. Před sítí byly umístěny dvě matrace jako prevence proti destrukci dronu při odrazu od sítě. Doprostřed sítě byla umístěna značka vymezující předpokládané místo styku se sítí. Samotný experiment spočíval v přímém náletu dronu do sítě v okolí značky, a sledování míry poškození sítě. Celý experiment včetně příprav probíhal 4 hodiny. Byla použita kvadrokoptéra tvořená karbonovým rámem ZMR250 se čtyřmi střídavými motory MT2204 s 2 300 kV. Pro řízení



motorů byl využit regulátor řízení Esc bheli s trvalým proudem 20 A. Informace shrnující charakteristiky použitého dronu jsou zobrazeny v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Parametry použité kvadroptéry

Motor	4 x MT2204 (2 300 kV)
Regulátor	Esc bheli 20 A
Řídící jednotka	CC3D
Přijímač	Frsky
Rám	Karbon - ZMR250
Baterie	3/4S
Tah	4 kg
Hmotnost bez baterie	420 g



### 3 Výsledky

#### 3.1 Test polypropylenové sítě

##### 3.1.1 Výsledky tahové zkoušky

###### Sada A

Sada A obsahovala sedm stejných vzorků, jejichž testovací část byla tvořena samostatným lankem sítě o délce 12 cm (viz kapitola 2.2.1). Avšak, jak už bylo zmíněno, kromě testovací části tvořily vzorek dva spoje na okrajích vzorku, a tedy celková původní délka vzorků sady A byla 16 cm. Při tahové zkoušce se maximální síly pohybovaly mezi 0,71 kN a 0,85 kN, přičemž pět vzorků bylo při dosažení maximální síly poškozeno a zkouška byla ukončena. Vzorky 6 a 7 byly po dosažení maximálních sil pouze částečně poškozeny a zkoušky dále pokračovaly, avšak následný růst sil již nepřesáhl maximální hodnotu. Celková prodloužení nabývala hodnot mezi 23,31 % a 27,46 %.



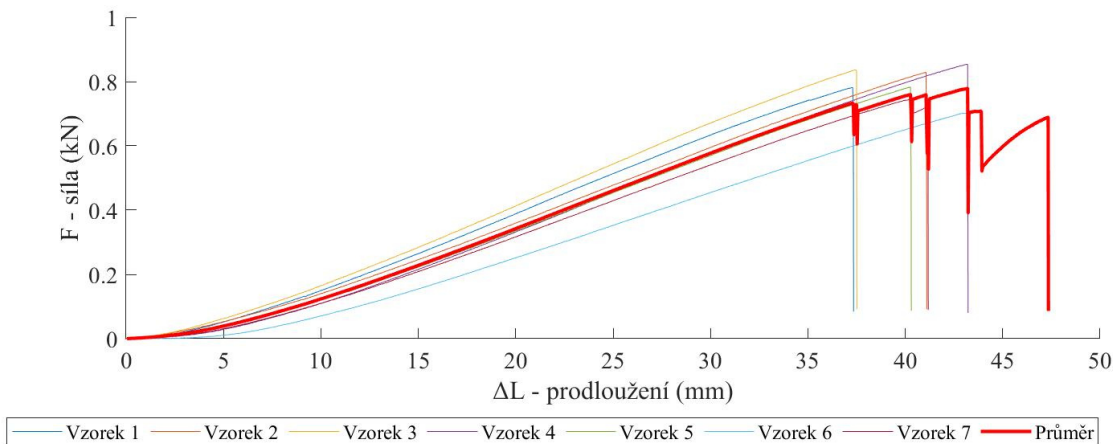
Obrázek 3.1: Vzorky po provedené tahové zkoušce – sada A

Prodloužení se obecně udává v procentech vůči původní délce  $L_0$  vzorku, a proto jsou tak uvedeny i hodnoty v následujících tabulkách. Hodnoty maximálních sil a prodloužení při dosažení maximální síly pro vzorky sady A zobrazuje tabulka 3.1.

Tabulka 3.1: Maximální dosažená síla a odpovídající prodloužení vzorků – sada A

Vzorek	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
Vzorek 1	23,31	0,78
Vzorek 2	25,67	0,83
Vzorek 3	23,42	0,84
Vzorek 4	27,00	0,85
Vzorek 5	25,17	0,78
Vzorek 6	27,46	0,71
Vzorek 7	25,11	0,74

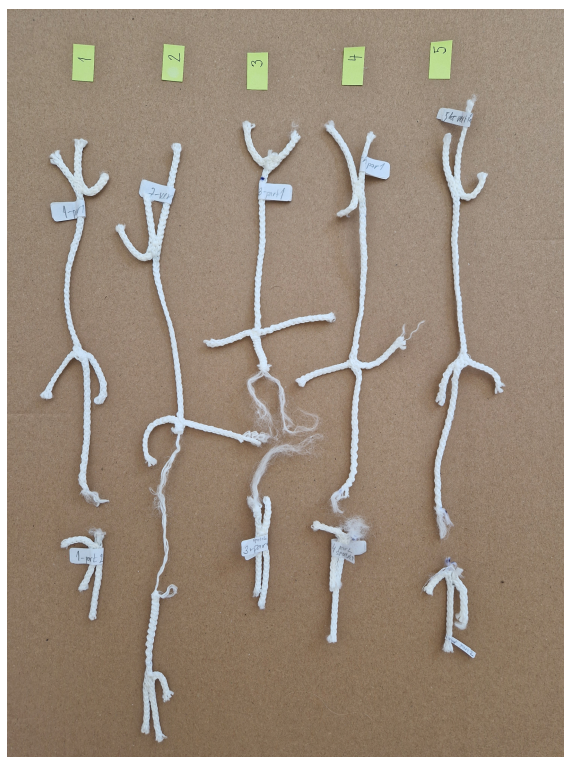
Data z jednotlivých tahových zkoušek byla vyhodnocena pomocí softwarového nástroje Matlab, pro který byl napsán kód vykreslující grafické znázornění závislosti působící síly  $F$  na prodloužení  $\Delta L$  u jednotlivých vzorků a jejich průměr. Na obrázku 3.2 je zobrazen graf, vykreslený pomocí zmíněného kódu, pro vzorky sady A. Křivka průměrných hodnot jednotlivých vzorků byla využita pod názvem průměrová křivka při vyhodnocování laboratorních testů v kapitole 3.1.2 a při vyhodnocování reálného experimentu v kapitole 3.1.3. V rámci kódu byly průměrné hodnoty síly a prodloužení zaznamenány do souboru, který byl následně použit pro další vyhodnocování výsledků v softwarovém nástroji Matlab. Kód je uveden v Příloha 1.



Obrázek 3.2: Tahová zkouška vzorků s vyznačeným průměrem – sada A

## Sada B

Sada B a sada C byly tvořeny každá pěti vzorky a byla zkoumána odolnost vzorků proti přetrhnutí ve spojích sítě, a to ve dvou různých směrech (viz kapitola 2.2.1). Původní délka vzorků sady B a sady C byla 28 cm. Vzorky sady B byly ve většině případů zcela přetrhnuty, pouze vzorek 2 nebyl zcela přetržen (viz obrázek 3.3). Maximální síly se u jednotlivých vzorků pohybovaly mezi 0,76 kN a 0,85 kN, po dosažení maximální síly došlo u čtyř vzorků k ukončení zkoušky, jelikož působící síla klesla pod prahovou hodnotu. U vzorku 1 zkouška po dosažení maximální síly pokračovala, avšak následný růst nepřekonal maximální sílu. Celková prodloužení vzorků se pohybovala od 28,49 % do 32,30 %. V tabulce 3.2 jsou zaznamenány dosažené hodnoty maximálních sil a odpovídající prodloužení vzorků pro vzorky sady B.

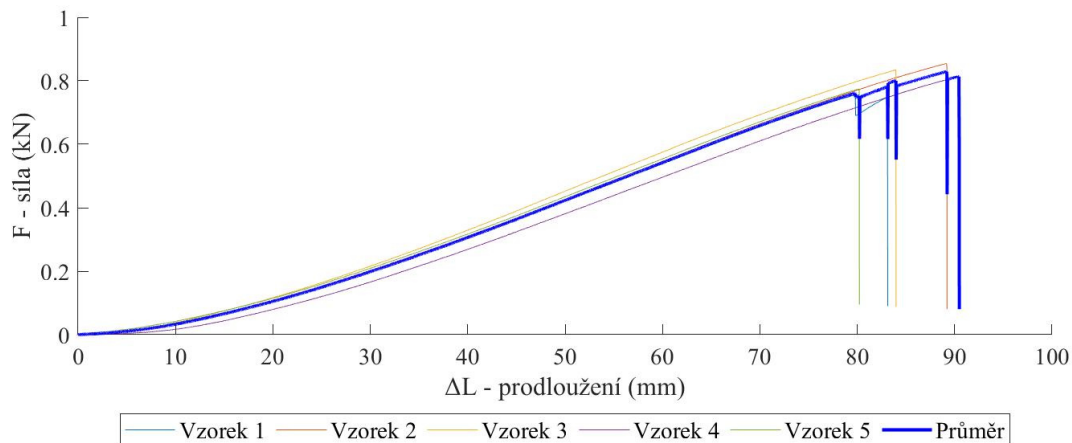


Obrázek 3.3: Vzorky po provedené tahové zkoušce – sada B

Tabulka 3.2: Maximální dosažená síla a odpovídající prodloužení vzorků – sada B

Vzorek	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
Vzorek 1	28,49	0,76
Vzorek 2	31,83	0,85
Vzorek 3	29,99	0,83
Vzorek 4	28,62	0,77
Vzorek 5	32,30	0,81

Pomocí stejného kódu (viz Příloha 1), jako u sady A, byl v softwarovém nástroji Matlab vytvořen graf tahových zkoušek vzorků sady B a jejich průměru. Graf je zachycen na obrázku 3.4.

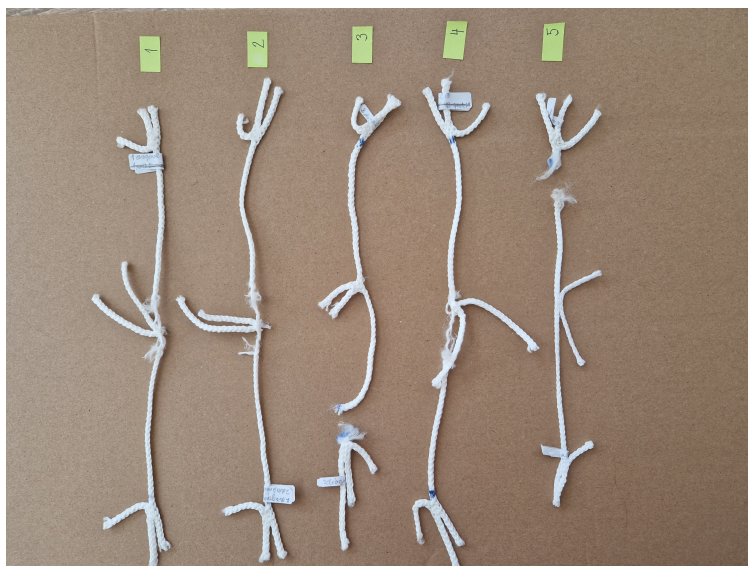


Obrázek 3.4: Tahová zkouška vzorků s vyznačeným průměrem – sada B

### Sada C

U sady C došlo k úplnému přetržení po provedených tahových zkouškách pouze u dvou vzorků, a to konkrétně u vzorků 3 a 5 (viz obrázek 3.5). U těchto dvou vzorků došlo k ukončení zkoušky v okamžiku dosažení maximální síly. Zbylé tři vzorky po provedených zkouškách tvořily jeden celek. Maximální síly se pohybovaly mezi 0,55 kN a 0,76 kN. Vzorky 3 a 5 vykazovaly nejvyšší hodnoty dosažených maximálních sil. Prodloužení se v okamžiku maximálních sil pohybovala od 22,06 % do 33,64 %. Hodnoty dosažených maximálních sil a prodloužení v okamžiku dosažení maximálních sil jsou uvedeny v tabulce 3.3.



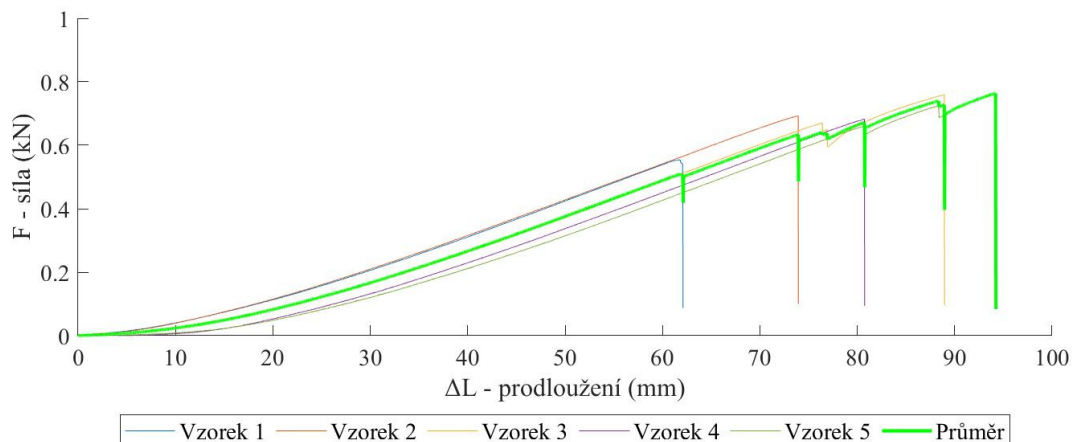


Obrázek 3.5: Vzorky po provedené tahové zkoušce – sada C

Tabulka 3.3: Maximální dosažená síla a odpovídající prodloužení vzorků – sada C

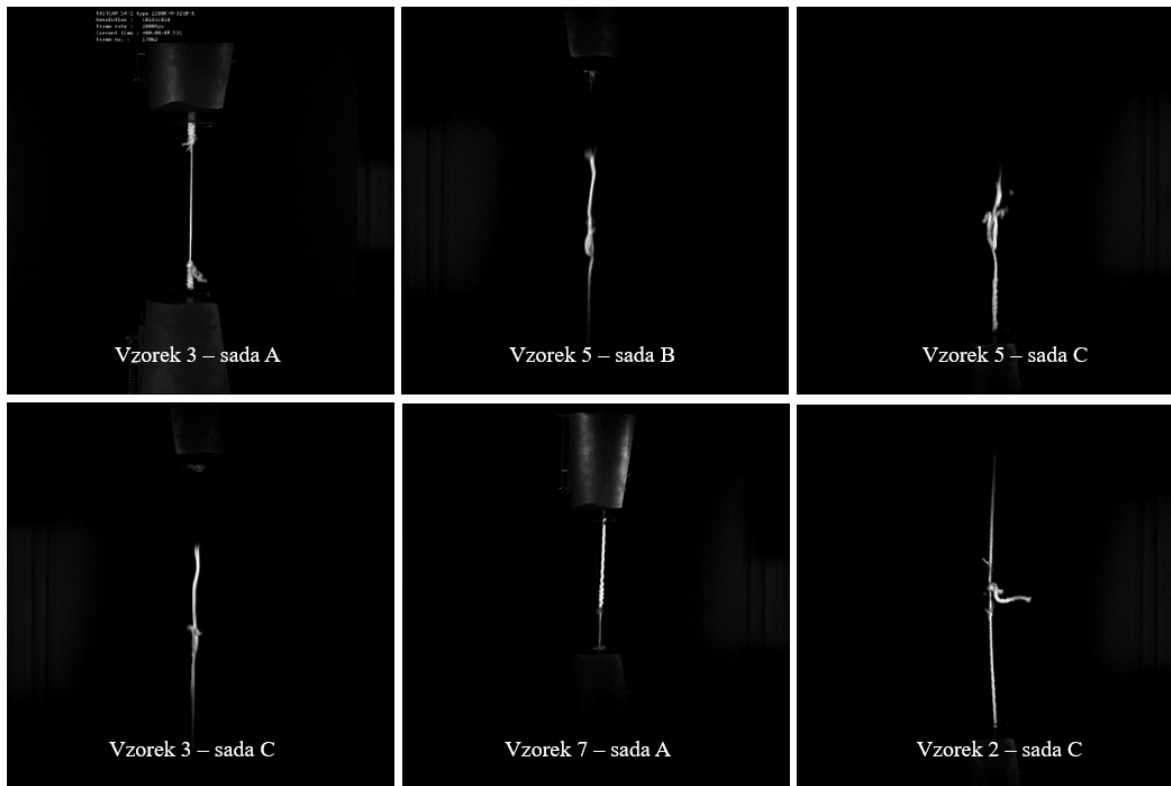
Vzorek	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
Vzorek 1	22,06	0,55
Vzorek 2	26,38	0,69
Vzorek 3	31,76	0,76
Vzorek 4	28,82	0,68
Vzorek 5	33,64	0,76

Za využití stejného kódu (viz Příloha 1), jako u předešlých dvou sad vzorků, byla vykreslena naměřená data do grafu, který je zobrazen na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Tahová zkouška vzorků s vyznačeným průměrem – sada C

Pro snímkování tahové zkoušky byla použita stejná vysokorychlostní kamera jako u zkoušek vlivu nárazu listu vrtule do části sítě. Fotografie na obrázku 3.7 zobrazují snímky z tahových zkoušek pořízené vysokorychlostní kamerou v momentě přetržení.



Obrázek 3.7: Fotografie vzorků v momentě přetržení



### 3.1.2 Výsledky testů vlivu nárazu listu vrtule do části sítě

Po provedení tahových zkoušek následovalo testování účinků rotující vrtule na vzorek sítě. Jelikož během tahových zkoušek docházelo ve většině případů k poškození sítě mimo její spoj, byly pro další testování zvoleny pouze vzorky sady A. U těch bylo testováno samotné lanko sítě a celková délka vzorků byla 16 cm.

Pro každou z vybraných vrtulí (označení vrtulí vychází z tabulky 2.2) byly testy prováděny při napnutí na 2 N nebo na 20 N. Každý test se skládal ze tří lineárních posunů motoru s rotující vrtulí ke vzorku, kde došlo k několikanásobné kolizi listu vrtule se vzorkem. Ta probíhala až do zastavení vrtule. U některých vzorků byl proveden menší počet kolizí vrtule se vzorkem sítě, a to z důvodu velkého poškození vrtule, vzorku nebo v jednom případě i poškození upevňovacího prvku C. Podrobnější informace o průběhu testů jednotlivých vrtulí jsou uvedeny později v této kapitole. Kolize byly provedeny vždy pomocí dvoulisté nebo třílisté vrtule rotující při maximálních otáčkách motoru, které činily 550 otáček/s. Maximální otáčky motoru byly vypočteny pomocí kV motoru a hodnoty napětí.

Rychlost lineárního posunu motoru  $v$  s rotující vrtulí směrem ke vzorku sítě byla vypočtena pomocí vzorce

$$v = \frac{s}{t}, \quad (3.1)$$

kde veličina  $s$  je dráha, která byla vyznačena na hliníkovém profilu pomocí dvou bílých značek označujících počátek a konec dráhy. Značky od sebe byly vzdáleny 4,2 cm. Veličina  $v$  je neznámá rychlost posunu motoru směrem ke vzorku, v této práci počítána v m/s. Veličina  $t$  je čas, který byl zjištěn z dat vysokorychlostní kamery.

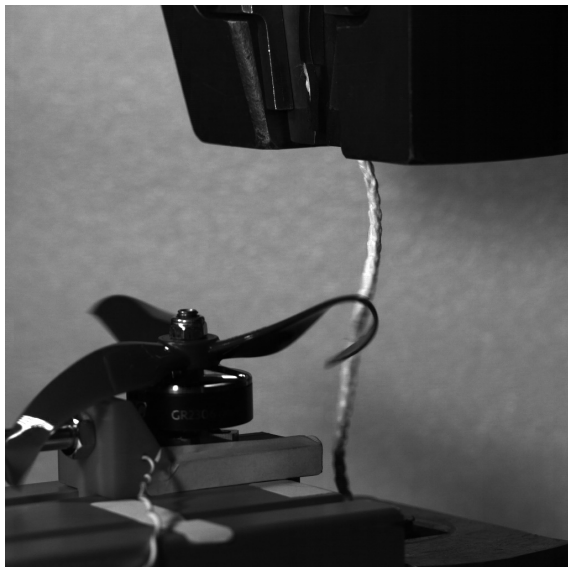
Rychlost byla spočítána pro první tři lineární posuny a z těchto hodnot byl vytvořen průměr, který činil 1,74 m/s. Pro ostatní lineární posuny se předpokládalo, že rychlost byla stejná. Tento pohyb byl zajištěn stlačeným vzduchem z kompresoru, u kterého byl vždy před simulací kolizí nastaven tlak na 0,4 MPa. Po provedení jednoho posunu motoru docházelo v průměru k 35 nárazům u vrtulí, které podléhaly výrazné destrukci během testu. U ostatních vrtulí během jednoho posunu docházelo průměrně k 50 nárazům do vzorků sítě. Celkový počet nárazů vrtule do vzorku v rámci jednoho testu závisel na počtu provedených lineárních posunů motoru ke vzorku.

Po každém provedeném testu byla se vzorkem provedena tahová zkouška, aby bylo možné porovnat, jak kolize ovlivnily mechanické vlastnosti sítě. Tahové zkoušky byly provedeny za stejných podmínek jako u nepoškozených vzorků (viz kapitola 2.2.1). Z naměřených dat byl získán pracovní diagram pomocí kódu v softwarovém nástroji Matlab. Využitý kód je přiložen v Příloha 2.

První testy byly prováděny bez přidaného pozadí, vrtule však byly špatně viditelné, a proto byl za zatěžovací stroj umístěn plát bílého polystyrenu. Z tohoto důvodu se fotografie pořízené vysokorychlostní kamerou mohou lišit v barevnosti pozadí. Avšak podmínky testů byly jinak neměnné.

### Vrtule 1

U vrtulí s označením 1 bylo provedeno testování při napnutí vzorku na 2 N, a následně na 20 N. V obou případech byly provedeny tři lineární posuny motoru s vrtulí ke vzorku. Vrtule během kolizí vykazovaly značnou pružnost. Byly využity dvě vrtule, každá na jeden test, a u žádné nedošlo k ulomení listu. Po ukončených testech se na jejich náběžných hranách vyskytovala pouze drobná poškození (viz obrázek 3.10b). Oba vzorky sítě po provedených testech vykazovaly pouze drobné roztřepení v místě, kde docházelo ke styku s vrtulí. Fotografie na obrázku 3.8 zachycují pružnost vrtulí během jednotlivých testů.



(a) Průběh testu – 2 N

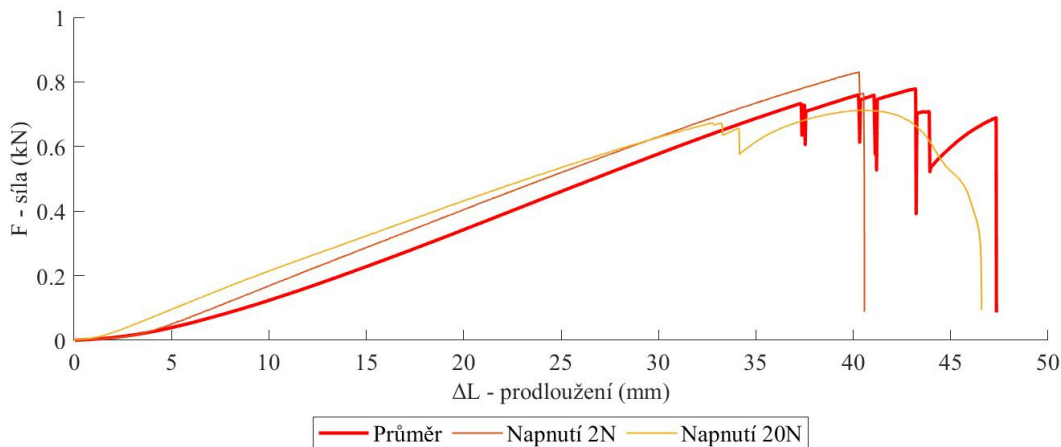


(b) Průběh testu – 20 N

Obrázek 3.8: Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 1



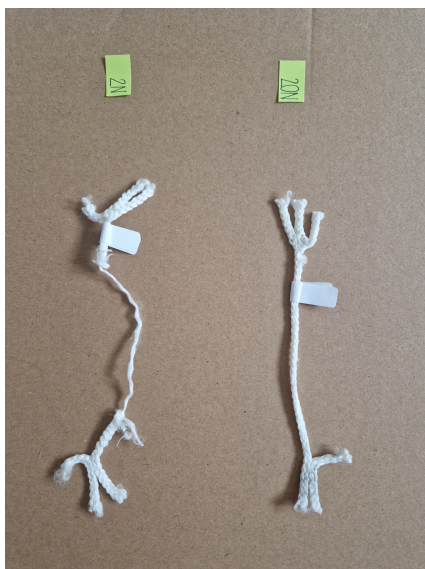
Tahová zkouška napnutého vzorku na 2 N proběhla za téměř lineárního růstu zatěžovací síly až došlo k částečnému přetrhnutí, které bylo následované jedním drobným růstem. Tahová zkouška u vzorku napnutého na 20 N zpočátku probíhala standardně, následně však došlo k uvolnění vzorku z čelistí a koncová část výsledné křivky není zcela vypovídající. Jelikož však k uvolnění vzorku došlo při hodnotách síly srovnatelně velkých s průměrovou křivkou nepoškozených vzorků, test nebyl z dat vyloučen. Hodnota maximální síly však není uvedena, protože křivka slouží pouze pro další demonstraci účinků kolizí na mechanické vlastnosti sítě. Vzorek nebyl během tahové zkoušky přetrhnut a další tahová zkouška nebyla provedena. Obrázek 3.9 zachycuje pracovní diagram pro vzorky, které byly vystavovány kolizím s vrtulí 1. Tabulka 3.4 zobrazuje hodnoty z tahových zkoušek.



Obrázek 3.9: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 1 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N

Tabulka 3.4: Hodnoty vzorku – vrtule 1

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
2 N	25,19	0,83
20 N	-	-



(a) Vzorky po kolizích, po tahové zkoušce



(b) Vrtule 1 po provedeném testu

Obrázek 3.10: Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 1 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 1 po testování (b)

## Vrtule 2

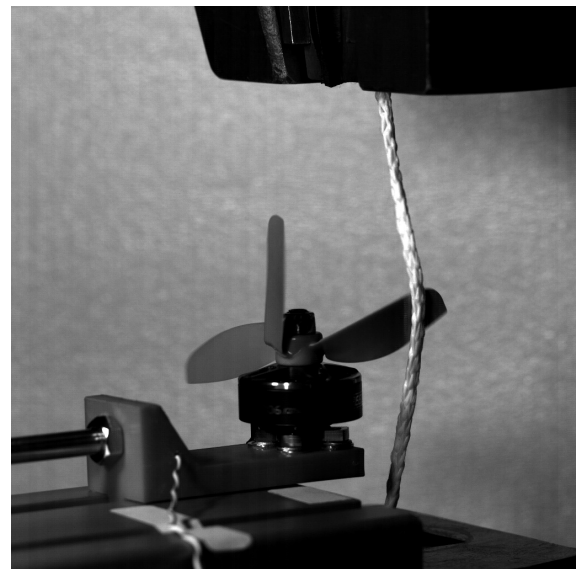
Vrtule 2 se v průběhu testů jeví jako velmi náchylné na poškození (viz obrázek 3.11). Při každém testu byly využity 3 vrtule, jedna na jeden posun motoru ke vzorku sítě. Pokaždé došlo k ulomení jejich listů (viz obrázek 3.13b) a vrtule musela být na následující část testu vyměněna. Byl proveden test při napnutí na 2 N i při napnutí na 20 N. Jelikož vrtule byly během testů značně poškozeny, vzorky sítě nevykazovaly po testu žádná vizuální poškození.

Maximální síla byla pozorována větší u vzorku, který byl napnutý na 2 N, a také bylo pozorováno výrazně větší prodloužení. U vzorku napnutého na 20 N byla nejprve provedena tahová zkouška, na jejíž začátku došlo k vyklouznutí vzorku z čelistí zatěžovacího stroje. Následně byl vzorek do čelistí lépe upevněn a tahová zkouška byla provedena znovu. Na obrázku 3.12 je znázorněn graf tahové zkoušky. Křivka vzorku napnutého na 20 N byla vypočtena z dat druhé tahové zkoušky tohoto vzorku. Snížení hodnoty prodloužení u vzorku napnutého na 20 N může být ovlivněno provedením první nezdařené nekompletní tahové zkoušky. Hodnoty maximálních sil z tahových zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3.5.



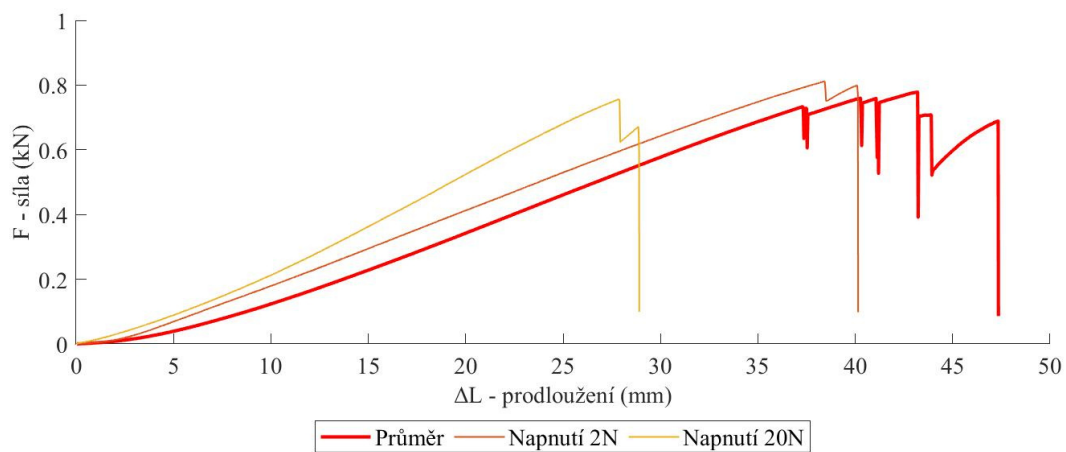


(a) Průběh testu – 2 N



(b) Průběh testu – 20 N

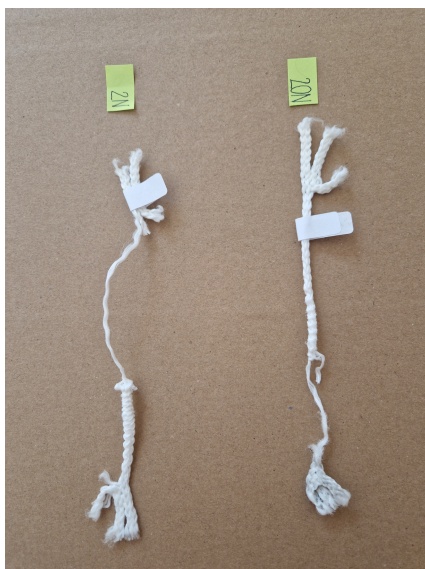
Obrázek 3.11: Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 2



Obrázek 3.12: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 2 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N

Tabulka 3.5: Hodnoty vzorků – vrtule 2

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
2 N	24,00	0,81
20 N	17,42	0,76



(a) Vzorok po kolizích, po tahové zkoušce



(b) Vrtule 2 po provedeném testu

Obrázek 3.13: Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 2 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 2 po testování (b)

### Vrtule 3

Pro vrtule 3 byl proveden jeden test při napnutí na 2 N a jeden test při napnutí na 20 N. V rámci obou testů byly provedeny tři lineární posuny motoru směrem ke vzorku. Vrtule byly využity dvě, vždy po jedné na jeden test. Byly velmi pružné (viz obrázek 3.14) a po sejmutí z motoru byly pouze mírně poškozeny na náběžných hranách (viz obrázek 3.16b). Vzorok sítě byly po testech výrazně roztřepeny v místě styku s vrtulí.

Průběh tahových zkoušek obou vzorků byl obdobný, při zatěžování došlo k jejich částečnému poškození, které se projevilo skokovým snížením síly. Hodnota maximální síly byla vyšší u vzorku napnutého na 2 N (viz tabulka 3.6). Graf tahových zkoušek je zobrazen na obrázku 3.15.

Tabulka 3.6: Hodnoty vzorků – vrtule 3

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
2 N	24,58	0,74
20 N	21,58	0,71



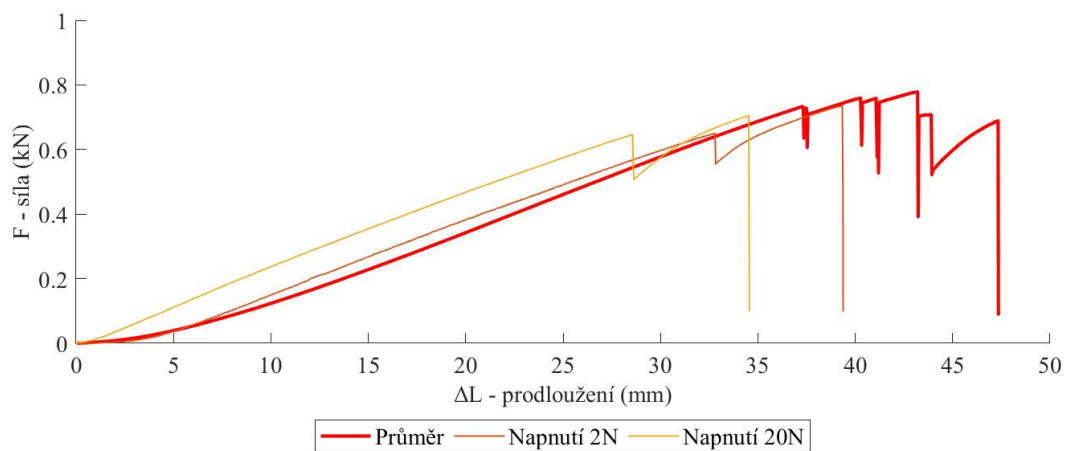


(a) Průběh testu – 2 N

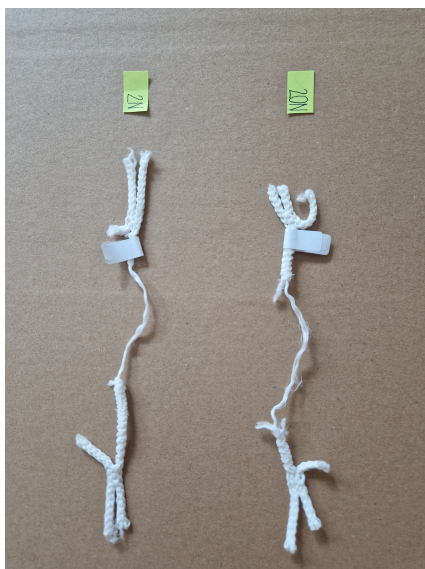


(b) Průběh testu – 20 N

Obrázek 3.14: Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 3



Obrázek 3.15: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 3 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N



(a) Vzorky po kolizích, po tahové zkoušce



(b) Vrtule 3 po provedeném testu

Obrázek 3.16: Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 3 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 3 po testování (b)

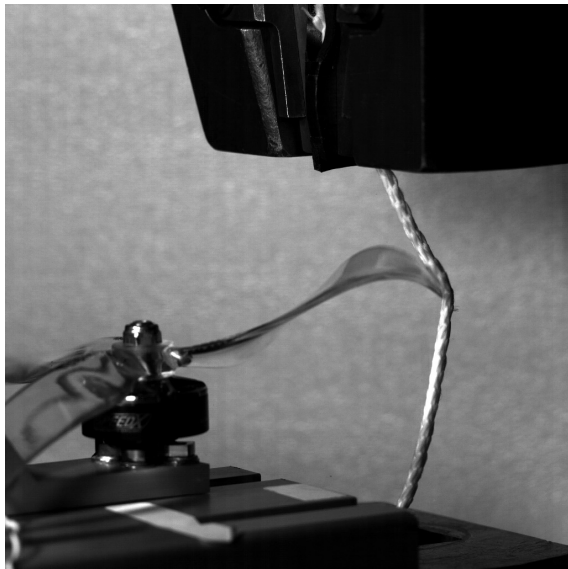
#### Vrtule 4

Pro vrtule 4 bylo provedeno po jednom testu při napnutí na 2 N a jednom při napnutí na 20 N. V obou případech se test skládal ze tří lineárních posunů motoru s rotující vrtulí ke vzorku. Vrtule byla použita vždy jedna na jeden celý test. Během testů se vrtule jevily jako velmi pružné a po sejmutí z motoru nevykazovaly příliš velké odchylky od původního stavu, pouze občasné malé deformace na náběžných hranách (viz obrázek 3.19b). Vzorky sítě po provedených testech nevykazovaly vizuální poškození. Na obrázku 3.17 je zachycena pružnost vrtule během jednotlivých testů.

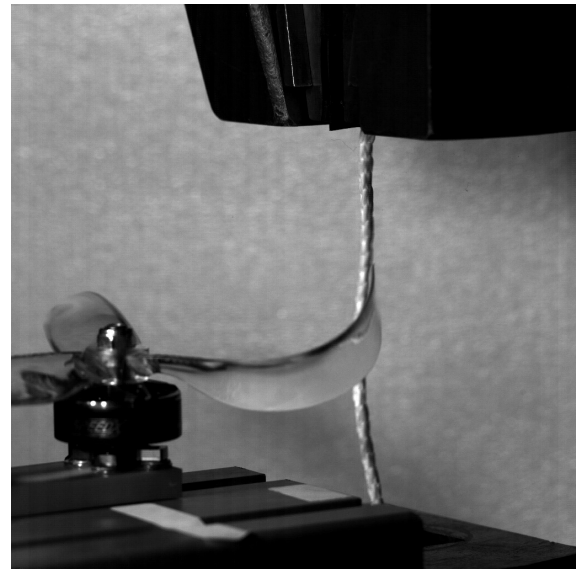
Po provedených testech kolizí vrtule se sítě byly provedeny tahové zkoušky. Při tahové zkoušce vzorku napnutého na 2 N došlo ke dvěma částečným poškozením před dosažením maximální síly. Vzorek napnutý na 20 N byl zatěžován rostoucí silou až do maximální hodnoty. Obrázek 3.18 zobrazuje diagram tahové zkoušky a hodnoty maximálních sil jsou uvedeny v tabulce 3.7.

Tabulka 3.7: Hodnoty vzorků – vrtule 4

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
2 N	23,90	0,77
20 N	22,79	0,80

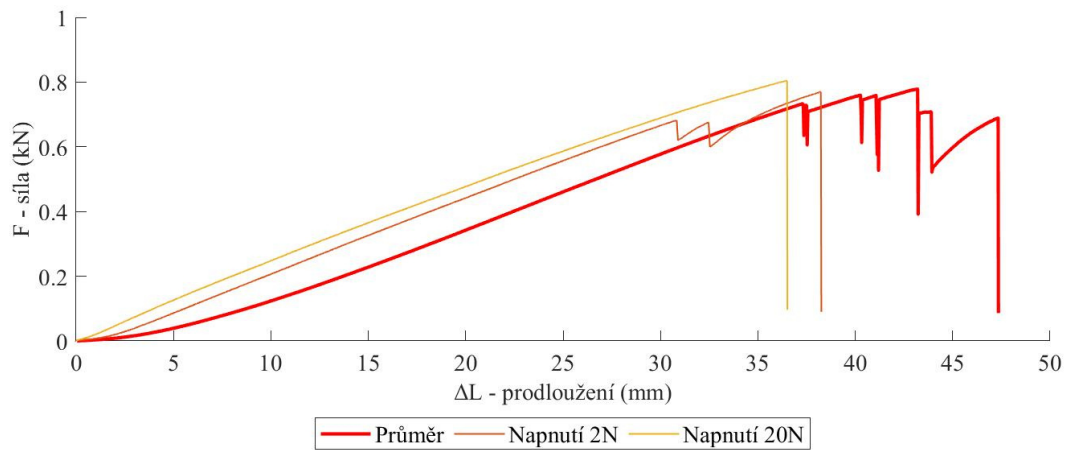


(a) Průběh testu – 2 N



(b) Průběh testu – 20 N

Obrázek 3.17: Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 4



Obrázek 3.18: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 4 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N



(a) Vzorky po kolizích, po tahové zkoušce



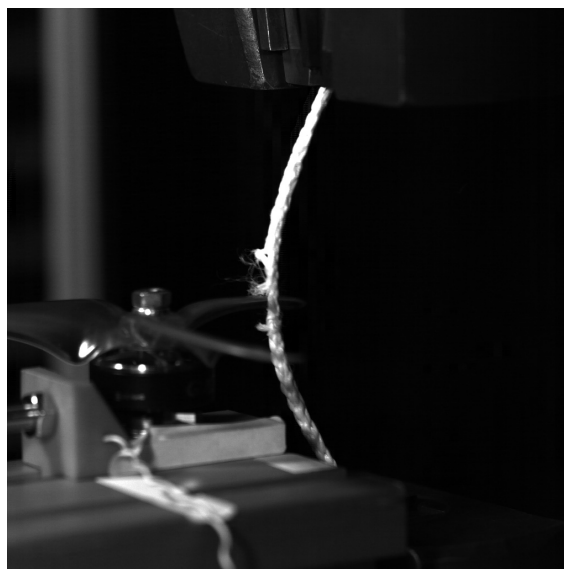
(b) Vrtule 4 po provedeném testu

Obrázek 3.19: Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 4 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 4 po testování (b)

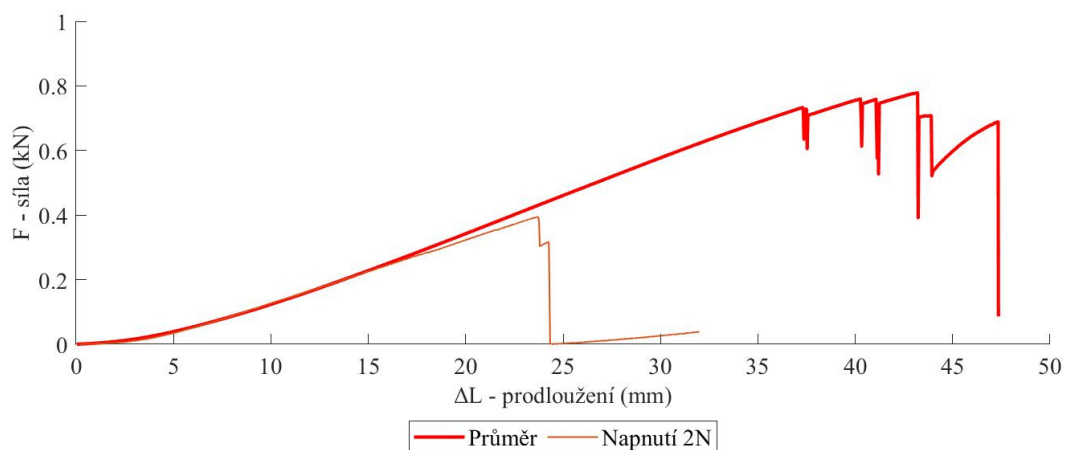
### Vrtule 5

V rámci testování vrtule 5 byl naměřen pouze jeden test při napnutí vzorku na 2 N. Vzorek sítě byl po prvním nasimulovaném lineárním posunu výrazně poškozen, proto byl hned vzápětí vystaven tahové zkoušce. U tahových zkoušek provedených po testování vrtulí 1, 2, 3 a 4 převažovaly nižší hodnoty zatěžovacích sil u vzorků vyššího napnutí, a jelikož vrtule 5 způsobila takto výrazné poškození již při napnutí na 2 N, test při napnutí na 20 N nebyl proveden. Vrtule byla po testu mírně poničena na náběžných hranách v místech styku se vzorkem sítě (viz obrázek 3.22b). Na obrázku 3.20 je znázorněn průběh testu a výrazné poškození vzorku.

Z důvodu výrazného již vizuálně detekovatelného poškození byla pevnost vzorku v tahu značně snížena. V okamžiku maximální síly byl vzorek poškozen, ale poškození nebylo dostatečné na ukončení testu. Síla opět mírně vzrostla a na vzorku bylo vytvořeno poškození, při kterém již mělo dojít k ukončení testu, jelikož se hodnota zatěžovací síly snížila pod prahovou hodnotu. Z důvodu chyby systému však nedošlo k ukončení zkoušky a zatěžovací stroj měřil data dále. Tyto hodnoty v rámci vyhodnocování výsledků nebyly uvažovány. Průběh závislosti zatěžovací síly na prodloužení je znázorněn na obrázku 3.21. Tabulka 3.8 zachycuje hodnotu maximální síly vzorku.



Obrázek 3.20: Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou – laboratorní test vrtule 5, napnutí na 2 N

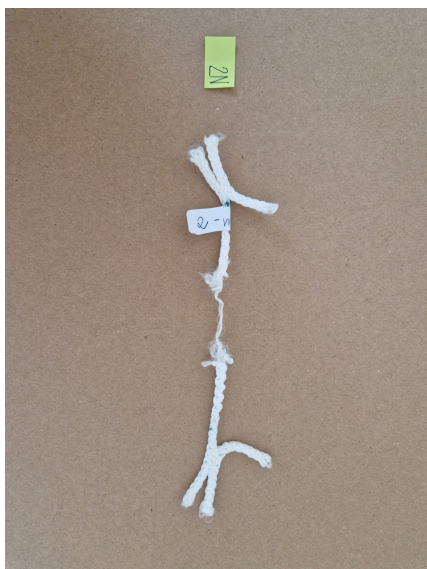


Obrázek 3.21: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivky vzorku, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 5 při napnutí na 2 N

Tabulka 3.8: Hodnoty vzorku – vrtule 5

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
2 N	14,83	0,39





(a) Vzorek po kolizích, po tahové zkoušce



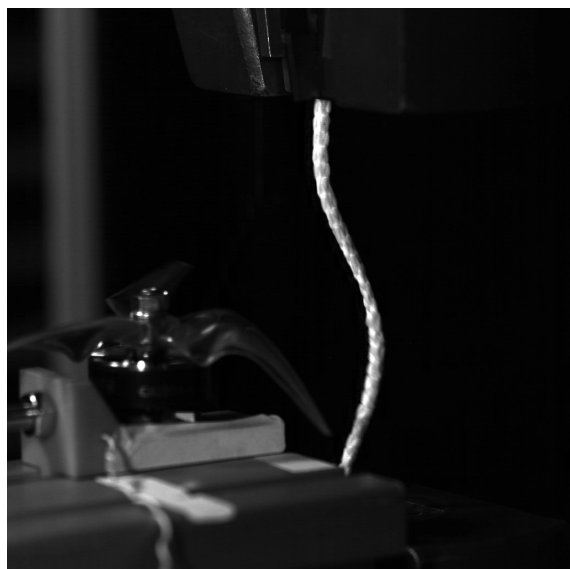
(b) Vrtule 5 po provedeném testu

Obrázek 3.22: Fotografie vzorku z testování kolizí s vrtulí 5 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 5 po testování (b)

### Vrtule 6

U vrtulí 6 byly provedeny dva testy. Jeden test při napnutí na 2 N, během kterého nedošlo k poškození ani vzorku a ani vrtule. Druhý test byl při napnutí na 20 N, v tomto případě bylo experimentální zařízení posunuto po hliníkovém profilu o 1 cm blíže ke vzorku pro možnost pozorování, jak se bude poškození lišit v případě, že dochází k částečnému namotání sítě až k šasi motoru. Na obrázku 3.23b je zřetelné, že v tomto případě došlo k výraznému poškození vzorku sítě, který byl téměř přetrhnut. Avšak při tomto testu došlo ke 136 nárazům, a tedy kolize během jednoho lineárního posunu motoru ke vzorku byla mnohonásobně vyšší než u ostatních. Vrtule byly využity dvě, jedna na každý test a po sejmutí z motoru vykazovaly pouze mírná poškození na náběžných hranách (viz obrázek 3.25b). U obou testů byl simulován pouze jeden posuv motoru s vrtulí směrem ke vzorku sítě.

V diagramu tahové zkoušky (viz obrázek 3.24) je zřetelné, že při testu s napnutím na 2 N nedošlo k ovlivnění mechanických vlastností sítě. Tahová zkouška vzorku napnutého na 20 N je znázorněna žlutou křivkou a její průběh se výrazně odlišuje od ostatních provedených tahových zkoušek, jelikož při testu kolizí byl vzorek téměř přetrhnut.

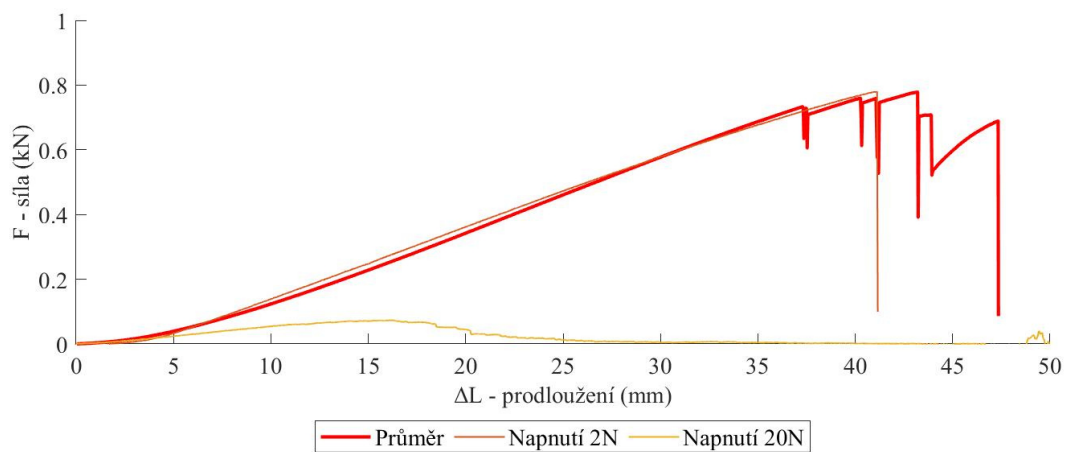


(a) Průběh testu – 2 N



(b) Průběh testu – 20 N

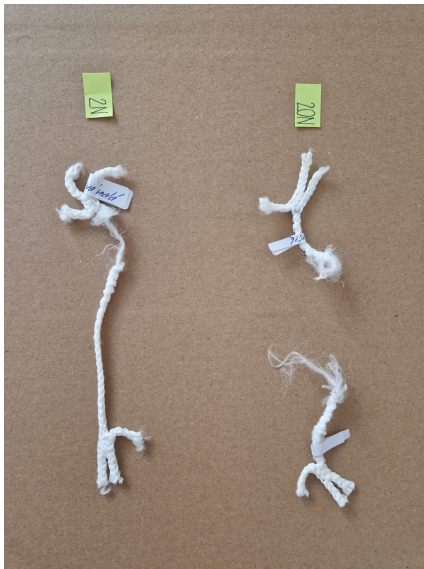
Obrázek 3.23: Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní testy vrtule 6



Obrázek 3.24: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků, u kterých byly simulovány kolize s vrtulí 6 v závislosti na napnutí 2 N a 20 N

Tabulka 3.9: Hodnoty vzorků – vrtule 6

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
2 N	25,70	0,78
20 N	9,81	0,07



(a) Vzorky po kolizích, po tahové zkoušce



(b) Vrtule 6 po provedeném testu

Obrázek 3.25: Fotografie vzorků z testování kolizí s vrtulí 6 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 6 po testování (b)

### Vrtule 7

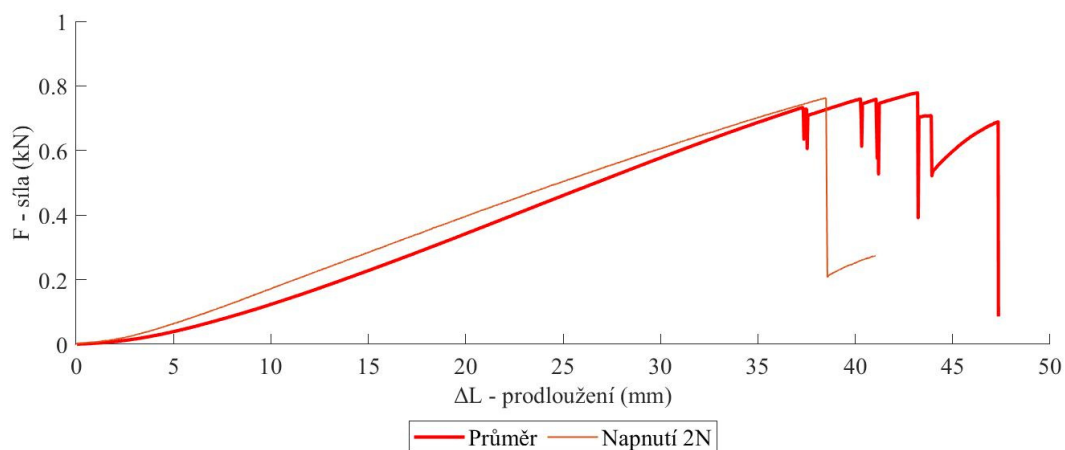
S vrtulí 7 byl nejprve proveden test s napnutím vzorku na 2 N. Následně bylo zjištěno, že byla využita špatná orientace rotace vrtule, tedy zasahovala vzorek odtokovou hranou. Data z tohoto testu nebyla do výsledků uvažována. Poté byl proveden druhý test s napnutím vzorku opět na 2 N. Během tohoto testu byl proveden pouze jeden lineární posun motoru s vrtulí směrem ke vzorku, při kterém došlo k ulomení konce jednoho listu vrtule (vrtule po testu je zobrazena na obrázku 3.28b) a na vzorku bylo patrné pouze mírné tržné poškození. Ulomená část listu vrtule nebyla nalezena. Test při napnutí na 20 N nebyl proveden, jelikož odolnost vrtule proti poškození již při napnutí na 2 N byla značně nízká a vrtule během kolizí neovlivnila mechanické vlastnosti sítě. Průběh testu při napnutí na 20 N by byl obdobný. Na obrázku 3.26 je zobrazena fotografie z testu těsně po rozlomení listu vrtule, černý objekt nad vrtulí je ulomený letící fragment listu vrtule.

Při tahové zkoušce vzorku se zatěžovací síla zvyšovala až do maximální hodnoty, při které došlo k poškození vzorku a ukončení zkoušky. Obrázek 3.27 znázorňuje pracovní diagram tahové zkoušky. Tabulka 3.10 uvádí hodnotu maximální síly vzorku při tahové zkoušce.





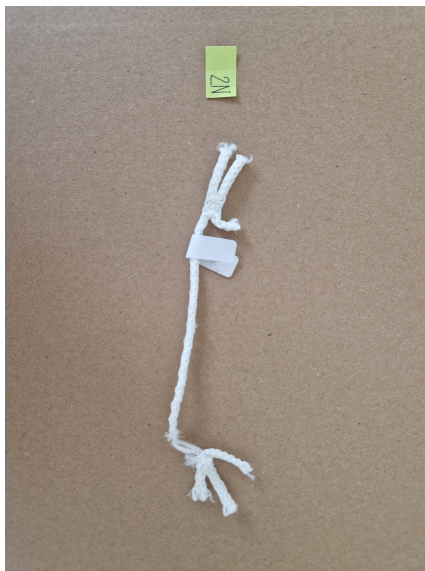
Obrázek 3.26: Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou – laboratorní test vrtule 7, napnutí na 2 N



Obrázek 3.27: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivky vzorku, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 7 při napnutí na 2 N

Tabulka 3.10: Hodnoty vzorku – vrtule 7

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
2 N	24,06	0,76



(a) Vzorek po kolizích, po tahové zkoušce



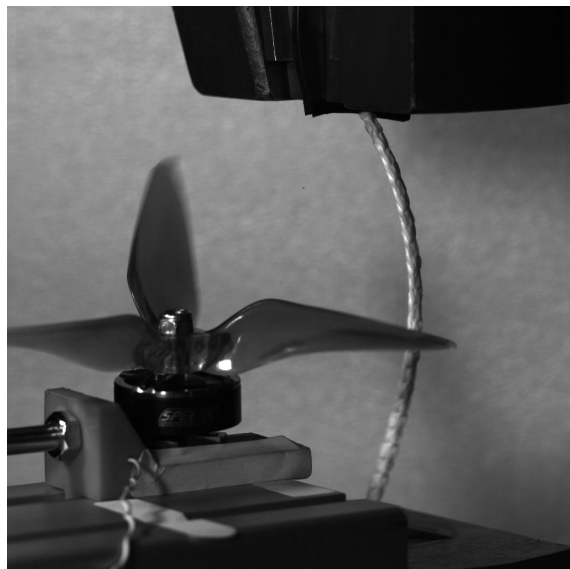
(b) Vrtule 7 po provedeném testu

Obrázek 3.28: Fotografie vzorku z testování kolizí s vrtulí 7 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 7 po testování (b)

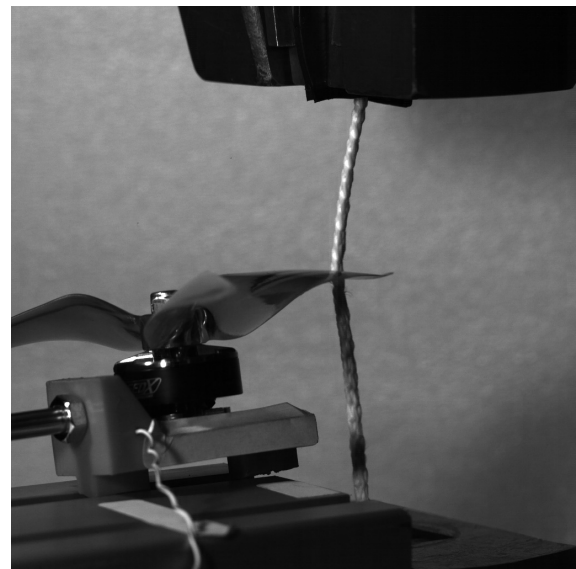
### Vrtule 8

V rámci testování kolizí s vrtulí 8 byl proveden nejdříve test pro napnutí vzorku na 20 N, během testu byl dvakrát nasimulován lineární posun motoru s vrtulí směrem ke vzorku, kdy po několikanásobné kolizi provedené po druhém posunu došlo k rozlomení upevňovacího prvku, na kterém byl upevněn motor (viz obrázek 3.29b). Vrtule 8 po provedeném testu nevykazovala známky vizuálního poškození a fotografie vrtule po provedeném testu je na obrázku 3.31b. U vzorku po provedeném testu nebylo detekováno vizuální poškození.

Po druhém lineárním posunu, kdy byl poškozen upevňovací prvek, byl vzorek vystaven tahové zkoušce. Maximální hodnota zatěžovací síly byla dosažena až po částečném poškození vzorku. Tato vrtule neovlivnila mechanické vlastnosti sítě ani při napnutí na 20 N, z toho důvodu nebyl následně test při napnutí vzorku na 2 N proveden. Podle již naměřených dat se předpokládalo, že kolize vrtule při nižší hodnotě napnutí mají menší vliv na mechanické vlastnosti vzorku sítě. Obrázek 3.30 zachycuje pracovní diagram tahové zkoušky. V tabulce 3.11 je uvedena hodnota maximální síly z tahové zkoušky vzorku.

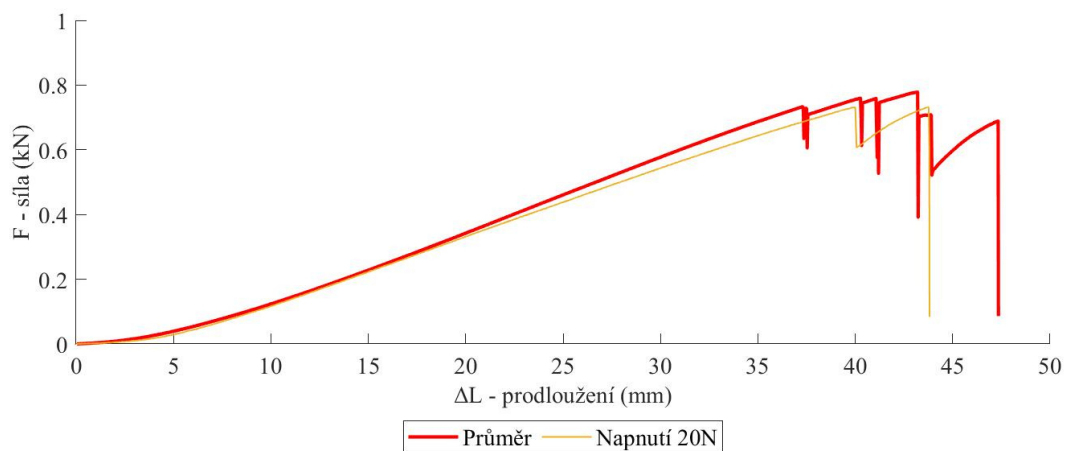


(a) Průběh testu – 20 N



(b) Poškození upevňovacího prvku A

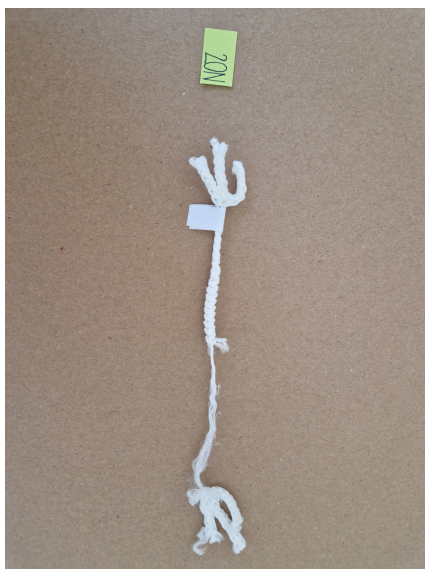
Obrázek 3.29: Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – laboratorní test vrtule 8, napnutí na 20 N



Obrázek 3.30: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivky vzorku, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 8 při napnutí 20 N

Tabulka 3.11: Hodnoty vzorku – vrtule 8

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
20 N	27,36	0,73



(a) Vzorek po kolizích, po tahové zkoušce



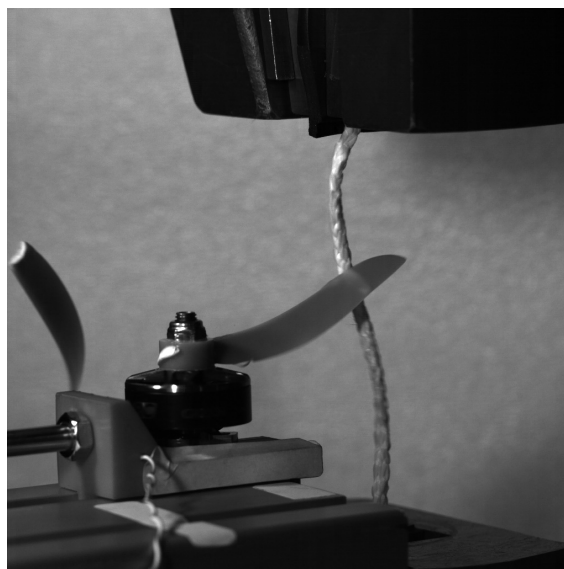
(b) Vrtule 8 po provedeném testu

Obrázek 3.31: Fotografie vzorku z testování kolizí s vrtulí 8 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 8 po testování (b)

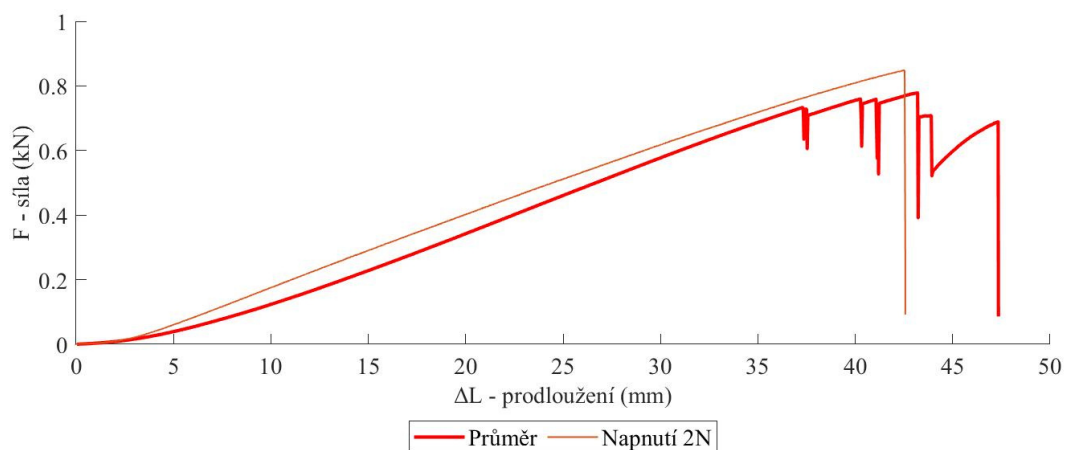
### Vrtule 9

Při testování využívajícím vrtuli 9 došlo k podobné situaci jako u vrtule 7. Byl proveden test při napnutí vzorku na 2 N, během něhož byly provedeny dva lineární posuny motoru směrem ke vzorku. V průběhu testování byly využity dvě dvojlisté vrtule, které se vždy po jednom posunu zničily a byly vyměněny (viz obrázek 3.34b). Za velmi krátký čas se ulomil jeden list vrtule a u druhého listu byl patrný počínající lom. Vzorky sítě nevykazovaly vizuální poškození. Test pro napnutí vzorku na 20 N nebyl proveden, protože se předpokládalo, že by se vrtule při větší hodnotě napnutí opět rozlomila a na segment sítě by nevytvořila výrazné účinky. Obrázek 3.32 zachycuje ulomený letící list vrtule.

Během tahové zkoušky nevykazoval vzorek žádnou indikaci změn mechanických vlastností. Hodnota zatěžovací síly se po celou dobu tahové zkoušky vyskytovala nad průměrovou křivkou segmentu sítě bez předchozích kolizí. Průběh tahové zkoušky je zobrazen na obrázku 3.33 a hodnota maximální síly je uvedena v tabulce 3.12.



Obrázek 3.32: Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou – laboratorní test vrtule 9, napnutí na 2 N

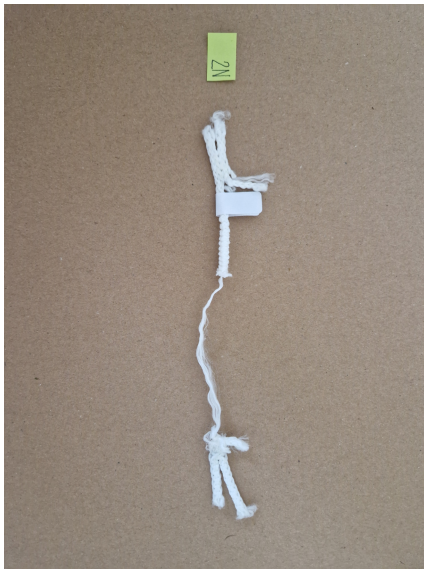


Obrázek 3.33: Graf průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivky vzorku, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 9 při napnutí na 2 N

Tabulka 3.12: Hodnoty vzorku – vrtule 9

Napnutí	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
2 N	26,58	0,85





(a) Vzorek po kolizích, po tahové zkoušce

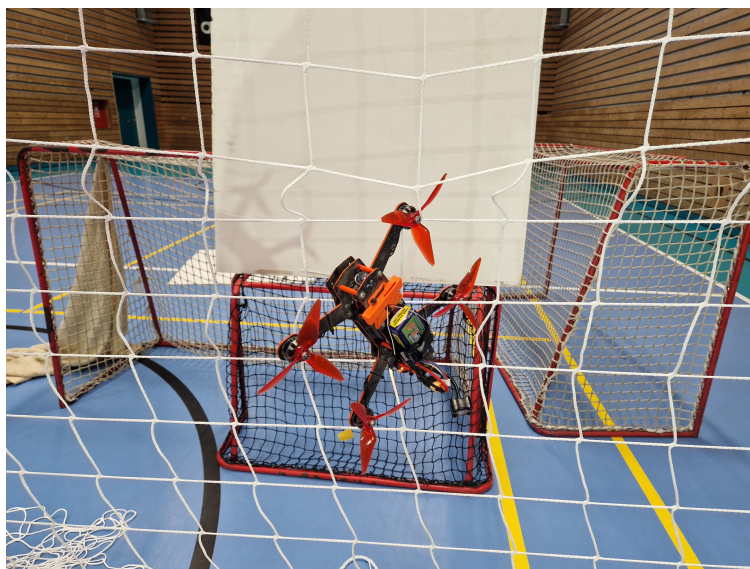


(b) Vrtule 9 po provedeném testu

Obrázek 3.34: Fotografie vzorku z testování kolizí s vrtulí 9 (po tahové zkoušce)(a), vrtule 9 po testování (b)

### 3.1.3 Výsledky testování zachycení dronu v reálných podmínkách

V rámci testování zachycení vrtulového dronu byl využit celý dron a celá kompaktní síť. Experiment byl prováděn jedním typem dronu a spočíval v několikanásobném nárazu dronu do jedné sítě. Do sítě bylo provedeno celkem 17 náletů. Let dronu byl prováděn pro dráze délky 15 m, aby bylo možné získat dostatečně velkou rychlost. K nárazům docházelo za různých rychlostí a byly využity čtyři typy vrtulí. Různé rychlosti a vrtule byly zvoleny pro zvýšení pravděpodobnosti zachycení možného poškození ochranné sítě. Byly zvoleny dva typy třílistých vrtulí a dva typy dvoulistých vrtulí, které byly využity také během laboratorních testů. Stejně typy vrtulí byly zvoleny z důvodu možnosti lepšího porovnání změny mechanických vlastností sítě po kolizích, a to jak při reálné situaci, tak při simulaci v laboratoři. Vrtule a jejich označení vychází z tabulky 2.2. Obrázek 3.35 zachycuje dron, který byl v rámci testování využit, a jeho zachycení v síti.



Obrázek 3.35: Celý dron využitý pro reálné testování zachycený v testované síti

Pro jednotlivé nálety byly voleny různé rychlosti, které byly po ukončení experimentu vypočteny z dat pořízených fotoaparátem Canon PowerShot G7 X Mark II. Z dat byla pro každý nálet vypočtena rychlost  $v_d$  pomocí vzdálenosti části letu  $s_d$  a času  $t_d$  potřebného k překonání této vzdálenosti. Vzdálenost  $s_d$  byla vyčtena z řady rozmístěných značek na stěně tělocvičny. Čas  $t_d$  byl zjištěn pomocí počtu snímků na překonané vzdálenosti a snímkovací frekvence fotoaparátu, která činila 25 snímků/s. Rychlost  $v_d$  byla následně vypočtena ze vzorce  $v_d = \frac{s_d}{t_d}$ . V ojedinělých případech letěl dron zcela mimo rovinu značek a nebylo možné dopočítat hodnotu rychlosti. Hodnoty rychlosti jednotlivých náletů, stejně jako typ vrtule a poloha dronu po styku se sítí, jsou uvedeny v tabulce 3.13.



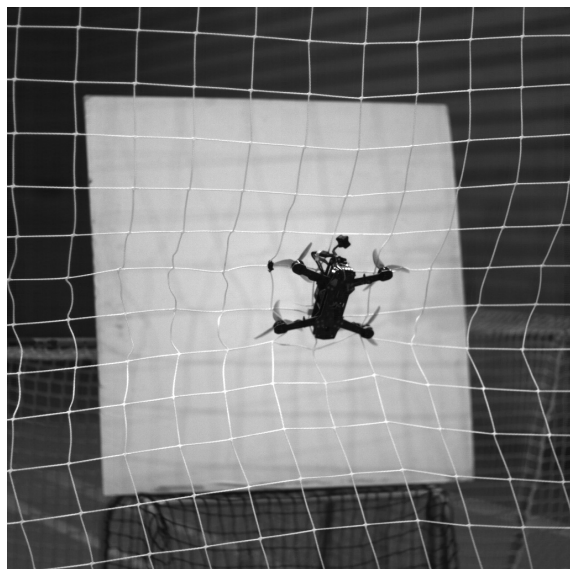


Tabulka 3.13: Parametry jednotlivých náletů dronu

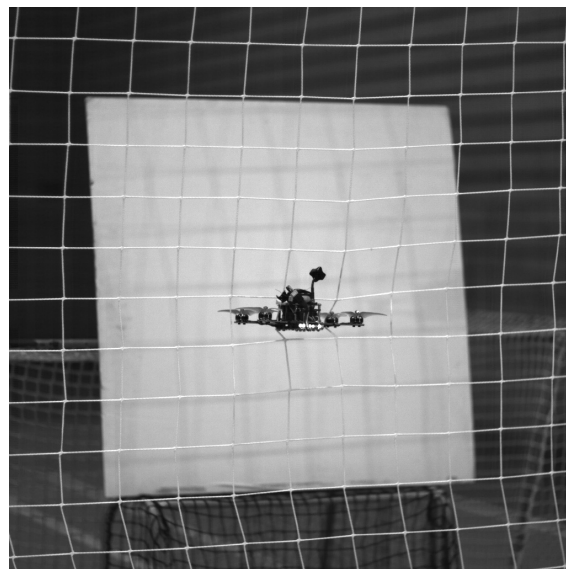
Test	Rychlost $v_d$ (m/s)	Označení vrtule	Poloha dronu po testu
1	-	8	v síti
2	-	8	na zemi
3	21,00	8	v síti
4	15,75	8	v síti
5	21,00	8	v síti
6	-	8	v síti
7	21,00	5	v síti
8	14,00	5	v síti
9	21,00	5	v síti
10	19,30	5	v síti
11	21,00	5	na zemi
12	26,25	5	v síti
13	-	9	v síti
14	13,13	7	v síti
15	21,00	7	v síti
16	2,33	8	na zemi
17	21,30	8	v síti

Jako první typ vrtulí byly zvoleny pětipalcové třílisté vrtule s označením 8. Po nárazu se ve většině případů dron zamotal do sítě a u jednoho náletu se od sítě odrazil a spadl na zem. Zachycení do sítě bylo způsobeno namotáním sítě až k šasi motoru jedné, či více vrtulí. Po provedení šesti kolizí byly vrtule vyměněny za další typ pětipalcových třílistých vrtulí s označením 5. Nárazů tímto typem vrtulí bylo vykonáno taktéž šest. Průběh testů byl obdobný jako u typu vrtule 8. Oba typy třílistých vrtulí po nárazech zůstaly nepoškozeny, a vykazovaly pouze mírné pokřivení na náběžných hranách. Také síť byla vizuálně ohledána a viditelné poškození vykazovala pouze v jednom místě mezi spoji sítě, a spoje kolem tohoto poškození se jevíly uvolněné. Následně byly vrtule vyměněny za pětipalcové dvoulisté vrtule s označením 9. Tímto typem byl experiment proveden pouze jednou, při styku vrtulí se sítí došlo k rozlomení vrtulí. Na síti nebyly zanechány žádné vizuální změny. Jako poslední typ vrtule byl využit typ 7, opět typ dvoulisté vrtule. Touto konfigurací byla kolize provedena dvakrát, a v obou případech došlo k rozlomení předních vrtulí. Následně byly provedeny další dva nálety s vrtulemi s označením 8, kdy jednou se dron zachytil v síti a jednou spadl na zem.

V okamžiku styku dronu se sítí docházelo k průhybu sítě střídavě na obě strany. Fotografie pořízené vysokorychlostní kamerou jsou zachyceny na obrázku 3.36.



(a) Test 10



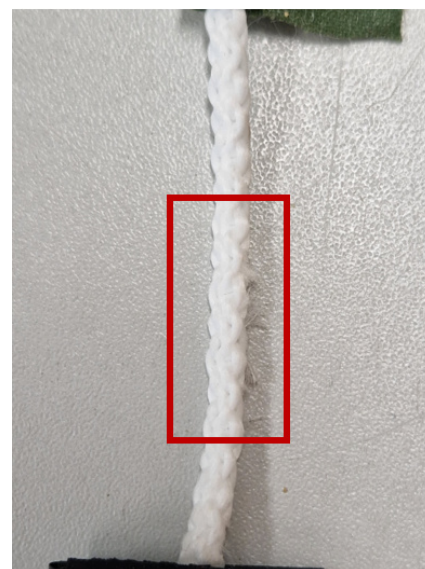
(b) Test 11

Obrázek 3.36: Snímky pořízené vysokorychlostní kamerou – reálný experiment

Po ukončení testování zachycení dronu v reálných podmínkách byla síť ohledána a byla vyznačena výseč  $2 \times 2$  m, ve které docházelo ke kontaktu s dronem. Výseč sítě byla důkladně ohledána, a místa s vizuálním poškozením byla označena. Následně byly tyto části odděleny od sítě a převedeny do podoby vzorků. V závislosti na místě poškození měly vzorky podobu vzorku sady A, sady B nebo sady C. S připravenými vzorky byla provedena tahová zkouška, za stejných podmínek jako u vzorků nepoškozené sítě a u vzorků z laboratorních testů. Z tahové zkoušky byly získány tři grafy, pro jejichž vykreslení byl využit kód z Příloha 3. Tento kód využívá soubor průměrových hodnot nepoškozených vzorků získaných z kódu uvedeného v Příloha 1. Fotografie na obrázku 3.37 zobrazují poškození způsobené během experimentu a část výseče sítě s vyznačenými místy poškození, černá značka označuje střed sítě jako u experimentu.



(a) Síť s vyznačenými poškozeními



(b) Poškození sítě - detail

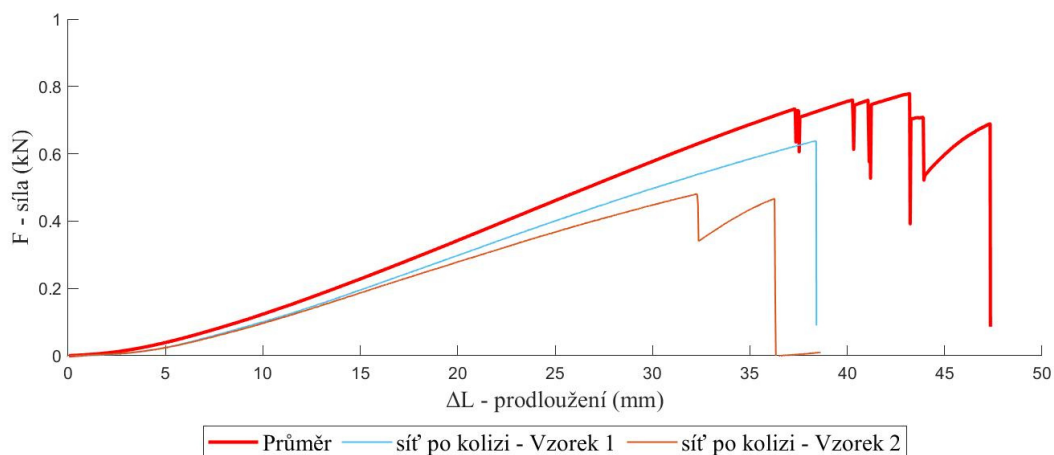
Obrázek 3.37: Vizuální poškození sítě způsobené nálety dronu

### Sada A

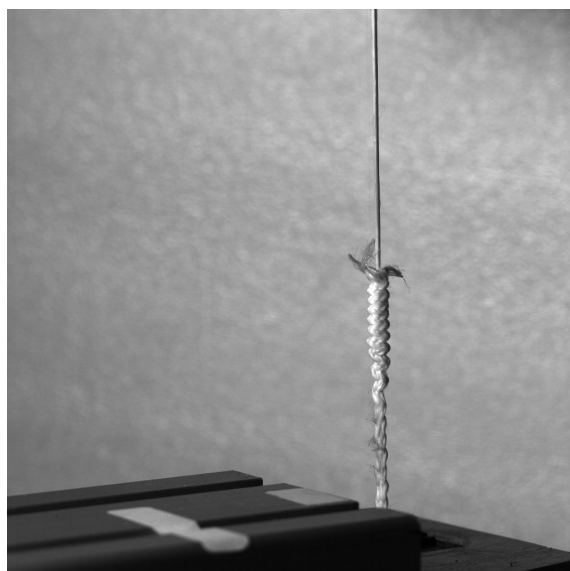
Vizuální poškození bylo patrné na dvou místech lanka sítě, a tedy vzorky sady A byly dva. Maximální síly se mezi vzorky výrazně lišily (viz tabulka 3.14). U vzorku 2 došlo během tahové zkoušky k chybě systému zatěžovacího stroje. Zkouška nebyla ukončena, i když hodnota síly klesla již pod prahovou hodnotu pro ukončení zkoušky. Graf tahové zkoušky je zobrazen na obrázku 3.38. Obrázek 3.39 zachycuje fotografie vzorků po tahové zkoušce.

Tabulka 3.14: Hodnoty maximálních zatěžovacích sil vzorků vystavených testování v reálných podmínkách a hodnota maximální síly ze vzorků sady A

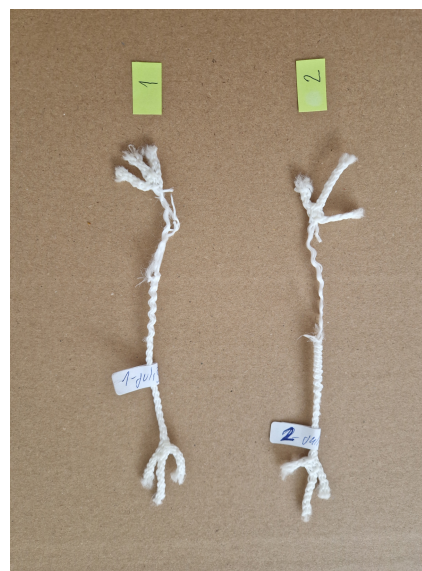
Vzorek	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
Vzorek 1	23,98	0,64
Vzorek 2	20,17	0,48
Sada A	27,00	0,85



Obrázek 3.38: Porovnání průměrové křivky nepoškozených vzorků sady A a křivek vzorků z reálného experimentu



(a) Vzorek 2 – snímek vysokorychlostní kamera



(b) Vzorky – sada A

Obrázek 3.39: Snímky vzorků po tahové zkoušce – reálný experiment sady A

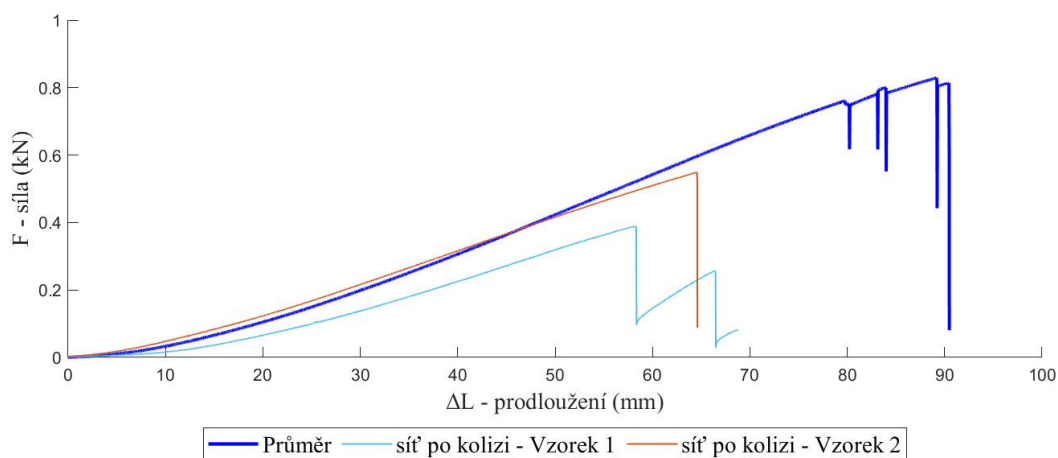
### Sada B

Ve dvou místech sítě bylo nalezeno poškození ve vertikálním směru orientace spoje sítě a tyto části byly otestovány jako vzorky sady B. Hodnoty maximálních sil jednotlivých vzorků se mezi sebou výrazně lišily (viz tabulka 3.15). U vzorku 1 během tahové zkoušky vznikla částečná poškození. Při druhém částečném poškození klesla hodnota síly pod prahovou hodnotu pro ukončení zkoušky,

avšak systém měření dat neukončil. Síla již nabyla velmi nízkých hodnot a vzorek byl výrazně poškozen (viz obrázek 3.41), existovala nízká pravděpodobnost, že by hodnota síly narostla do vyšších hodnot, a test byl zastaven. Na obrázku 3.40 je zobrazen graf tahové zkoušky s průměrovou křivkou nepoškozených vzorků sady B.

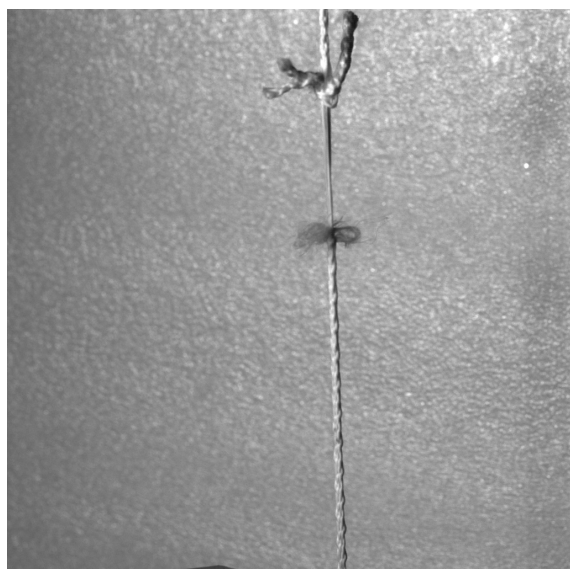
Tabulka 3.15: Hodnoty maximálních zatěžovacích sil vzorků vystavených testování v reálných podmínkách a hodnota maximální síly ze vzorků sady B

Vzorek	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
Vzorek 1	20,81	0,39
Vzorek 2	23,06	0,55
Sada B	31,83	0,85



Obrázek 3.40: Porovnání průměrové křivky nepoškozených vzorků sady B a křivek vzorků z reálného experimentu





(a) Vzorek 1 – snímek vysokorychlostní kamera



(b) Vzorky – sada B

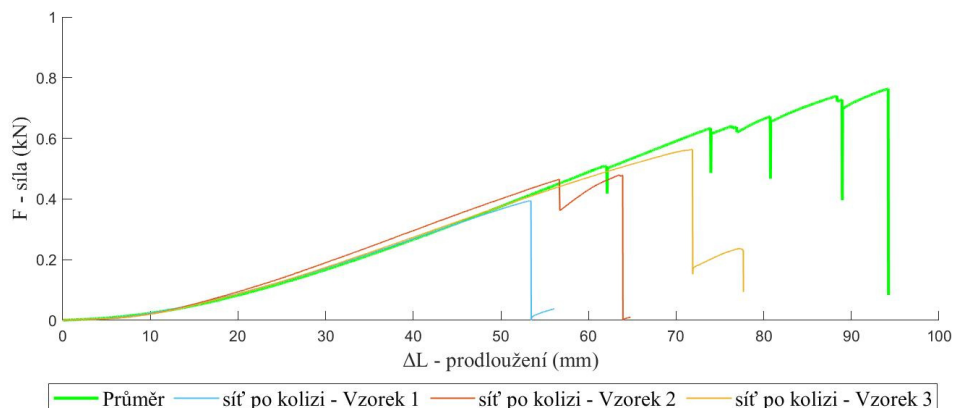
Obrázek 3.41: Snímky vzorků po tahové zkoušce – reálný experiment sada B

### Sada C

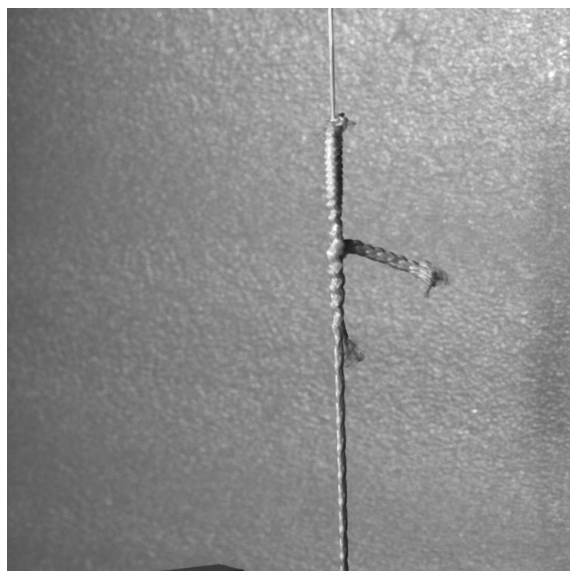
Poškození se vyskytovalo i ve spojích sítě ve směru, který byl využit u zatěžování vzorků sady C. Celkem byly vytvořeny tři vzorky. U vzorku 1 se uvažovaly pouze hodnoty do prvního propadu a u vzorků 2 a 3 pouze hodnoty do druhého propadu sil. Z důvodu chyby systému se zde dostala naměřená data do velmi nízkých hodnot, a zkouška nebyla ukončena po překročení prahové hodnoty pro ukončení zkoušky. Na obrázku 3.42 je zobrazen graf tahové zkoušky a průměrová křivka nepoškozených vzorků sady C. Tabulka 3.16 zachycuje hodnoty maximálních sil jednotlivých vzorků. Vzorky po tahové zkoušce zachycuje obrázek 3.43.

Tabulka 3.16: Hodnoty maximálních zatěžovacích sil vzorků vystavených testování v reálných podmínkách a hodnota maximální síly ze vzorků sady C

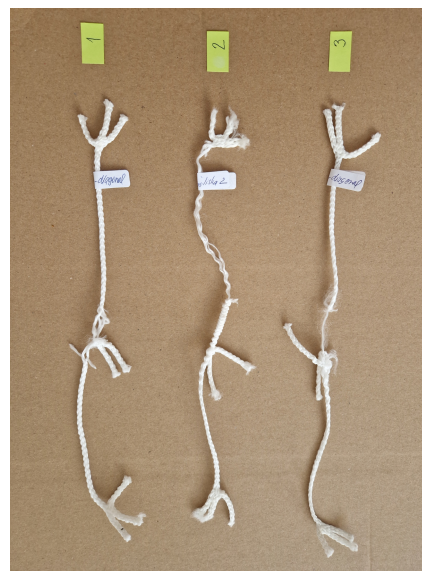
Vzorek	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
Vzorek 1	19,04	0,39
Vzorek 2	22,69	0,48
Vzorek 3	25,64	0,56
Sada C	33,64	0,76



Obrázek 3.42: Porovnání průměrové křivky nepoškozených vzorků sady C a křivek vzorků z reálného experimentu



(a) Vzorek 2 – snímek vysokorychlostní kamera



(b) Vzorky – sada C

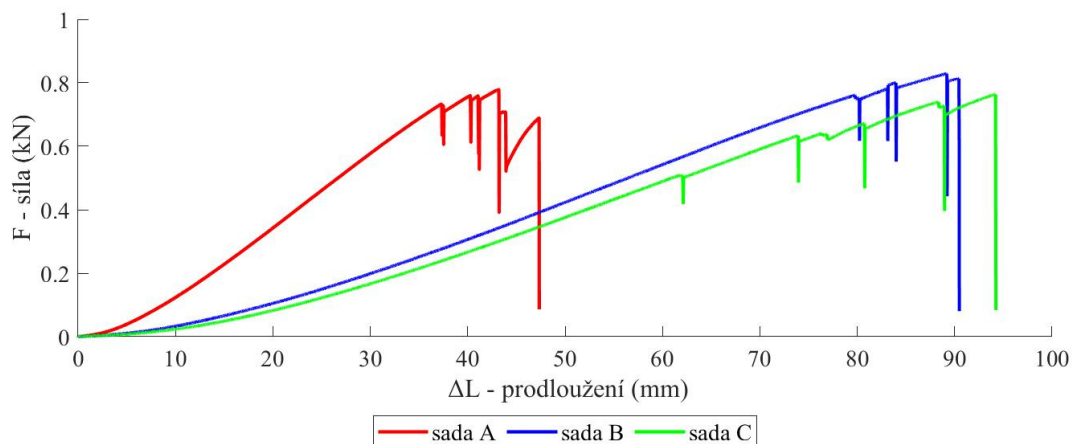
Obrázek 3.43: Snímky vzorků po tahové zkoušce – reálný experiment sada C



## 4 Diskuze výsledků

Navržená metodika byla otestována na konkrétní polypropylenové síti a následující odstavce prezentují zhodnocení získaných dat.

Pro zjištění mechanických vlastností byly zvoleny tři různé části sítě, které byly převedeny do vzorků s názvy sada A, sada B a sada C. Testovalo se samotné lanko sítě a její spoj ve dvou různých směrech. Pro srovnání mechanických vlastností ochranné sítě v různých zkoumaných místech byl napsán kód pomocí softwarového nástroje Matlab, který vykreslil průměrové křivky tahových zkoušek jednotlivých sad do jednoho diagramu. Kód je k dispozici v Příloha 4, pro vykreslení průměrových křivek byl využit soubor hodnot vytvořený kódem v Příloha 1. Z diagramu lze vyčíst, že průměrná hodnota zatěžovacích sil byla u všech tří sad velmi podobná. Vzorky sady A nabývaly hodnot svých maximálních sil na téměř polovičním posunutí v porovnání se sadami B a C. Maximální hodnoty posunutí vykazovaly vzorky sady C, u nichž docházelo k poškození při nejnižších hodnotách zatěžovací síly, a tedy v tomto směru spoje byla síť nejvíce pružná. Obrázek 4.1 zobrazuje diagram průměrových křivek závislosti síly na posunutí a tabulka 4.1 zachycuje maximální hodnoty zatěžovacích sil, které vykazovaly vzorky v rámci jednotlivých sad.



Obrázek 4.1: Průměrové křivky tahových zkoušek vzorků sady A, sady B a sady C



Tabulka 4.1: Hodnoty maximálních zatěžovacích sil vzorků jednotlivých sad

Sada	Prodloužení $\Delta L$ (%)	Maximální síla $F$ (kN)
Sada A	27,00	0,85
Sada B	31,83	0,85
Sada C	33,64	0,76

Při zkoumání odolnosti proti přetrhnutí u spoje sítě (sada B a sada C) bylo po provedení tahové zkoušky zjištěno, že k poškození vzorku docházelo v místě lanka sítě, a ne v jejím spoji. Pouze ve třech případech u vzorků sady C došlo k poškození spoje. Nejnáchylnější částí pro poškození bylo tedy vyhodnoceno samotné lanko sítě, které bylo vybráno pro následné testování.

U laboratorních testů byly simulovány mnohonásobné kolize různých vrtulí s lankem sítě. Pro jednotlivé vrtule byl proveden jeden nebo dva testy s hodnotou napnutí vzorku na 2 N nebo na 20 N. U kolizí s vrtulemi s označením 1, 2, 3, 4, 6, 7 a 9 při napnutí vzorku na 2 N nebyly pozorovány výrazné změny mechanických vlastností. Hodnoty zatěžovacích sil se vyskytovaly v maximálních hodnotách průměrové křivky nepoškozených vzorků. Pro vrtuli 8 nebyl tento test naměřen a na vzorku u vrtule 5 bylo vrtulí během kolizí vytvořeno výrazné poškození, které ovlivnilo mechanické vlastnosti sítě. Avšak během reálného provozu nebude síť vystavena tolika kolizím v jeden okamžik na jednom místě a nepředpokládá se, že by došlo až k takto výraznému poškození. U vzorků vystavených kolizím při napnutí na 20 N bylo obecně pozorováno snížení hodnot maximálních zatěžovacích sil oproti napnutí na 2 N. Avšak k výrazným změnám mechanických vlastností sítě došlo pouze u jednoho vzorku, a to konkrétně u vrtule 6 a napnutí na 20 N.

Po každém laboratorním testu byla provedena tahová zkouška. Po provedených tahových zkouškách byl zcela přetržen pouze jeden vzorek, a to vzorek napnutý na 20 N, u kterého byly simulovány kolize s vrtulí 6. U tohoto vzorku však bylo celé experimentální zařízení posunuto o 1 cm blíže ke vzorku a docházelo k částečnému namotávání sítě až k šasi motoru. U tohoto vzorku byl počet nárazů výrazně vyšší než u ostatních. Ostatní vzorky byly po tahové zkoušce přetrhnuty pouze zčásti.

U testování zachycení dronu v reálných podmínkách bylo poškození sítě způsobeno primárně namotáváním sítě k šasi motoru, samotné nárazy nezpůsobovaly ani vizuální poškození, a proto v případech, kdy došlo k odrazu dronu od sítě nebyly pozorovány žádné vizuální změny na síti. U všech vzorků, které byly odebrány ze sítě, vystavené kolizím s reálným dronem, došlo ke snížení



hodnot maximálních sil. U sady A se hodnoty síly pohybovaly v obou případech pod průměrovou křivkou (viz obrázek 3.38). U sady B a sady C se nejprve jeden ze vzorků vyskytoval nad průměrovou křivkou, následně se však dostal pod tuto křivku a testy byly ukončeny v nižších hodnotách síly, než je průměrná hodnota nespóškozených vzorků (viz obrázky 3.40 a 3.42). Největší rozdíl maximálních sil byl pozorován u vzorků sady B.

Jak u laboratorních testů, tak i během testování účinků kolizí v reálných podmínkách, byly simulovány situace, které měly výraznější účinky na mechanické vlastnosti sítě, než jaké by vznikaly při běžném využití sítě. Vznik takových situací je při reálném využití sítě, například pro koncept vzdělávacích míst (viz kapitola 1.5), velmi nepravděpodobný. Z naměřených výsledků konkrétní sítě lze vyvodit, že ani při několikanásobné kolizi nevzniklo poškození, které by mělo za následek kompletní přetržení části sítě. Ke kompletnímu přetržení vzorků sítě nedocházelo ani při většině tahových zkoušek. Během používání sítě při reálném využití budou probíhat vizuální prohlídky, čímž bude zajištěno, že nedojde k poškození sítě takových rozměrů, které by umožnily únik UAV mimo ohraničený prostor.

Metodika předpokládá, že pokud na síti není vizuálně detekovatelné poškození, nedochází ke změně mechanických vlastností sítě. Tento předpoklad byl ověřen v rámci testování polypropylenové sítě. Dále bylo pozorováno, že kolize způsobené vybranými dvoulistými vrtulemi neměly žádný vliv na mechanické vlastnosti sítě, nýbrž po velmi krátkém čase docházelo k destrukci vrtulí, a to jak u laboratorního testování, tak při testování v reálných podmínkách. Také bylo pozorováno, že u vzorků sady A, které byly vystaveny kolizím s reálným dronem, došlo k výraznějšímu snížení maximálních sil než při testech v laboratoři. Tento fakt je způsoben tím, že docházelo k namotávání sítě až k šasi motorů. Samotné nárazy vrtulí nezpůsobovaly při reálném testování žádná poškození. V rámci této práce byly však sledovány primárně účinky vzniklé kolizí rotující vrtule se sítí, a účinky vzniklé následným namotáním sítě až k šasi motoru byly zhodnoceny pouze okrajově v rámci testování v reálných podmínkách, a tato skutečnost bude uvedena v limitacích práce. Avšak při reálném experimentu bylo opět simulováno několik kolizí cílených do konkrétního místa. I v případě, že by tato situace vznikla při reálném provozu, segment sítě nebyl přetrhnut a síť by byla dostatečně způsobilá pro zadržení UAVs v požadovaném prostoru.

Na základě provedeného testování se tato konkrétní polypropylenová síť jeví jako schopná odolávat poškozením vzniklým v důsledku nárazu vrtulového UAV, a je možné ji využít



pro provoz bezpilotních systémů, jejichž UAV budou vybavena otestovanými vrtulemi. A také za předpokladu, že síť bude napnuta na otestované hodnoty napnutí. V závislosti na objemu provozu s přihlédnutím na vznik mimořádných situací, ke kterým může dojít z důvodu externích podmínek (například počasí), bude navržena délka doby, po jejíž uplynutí bude síť vyměněna preventivně. Navržená metodika se podle jejího otestování na konkrétní síti jeví jako dostačující pro zmíněné využití k ohraničení prostoru pro provoz vrtulových UAVs, i přes její limitace.



## 5 Závěr

Hlavním cílem práce byl návrh univerzální metodiky pro testování ochranných sítí, využitelných pro zachycení vrtulových UAVs. Navržená metodika představuje postup pro zjištění mechanických vlastností sítě a jejich následné porovnání s mechanickými vlastnostmi vzorků vystavených kolizím s rotující vrtulí, nebo kolizím s celým UAV. Kolize jsou nejdříve simulovány v laboratoři, za využití experimentálního zařízení sestávajícího se z vrtule, motoru a potřebného vybavení pro jeho pohon. Tento způsob testování byl zvolen pro možnost simulace extrémních situací, které by běžně v praxi nastaly pouze zřídka, ale které nelze zcela vyloučit. Následně jsou prováděny kolize celým dronem na kompletní síti.

Pro otestování metodiky byla uvažována jedna konkrétní polypropylenová síť s průměrem lanka 3 mm, u níž byly provedeny všechny kroky metodiky. Pomocí tahové zkoušky byly nejprve zjištěny mechanické vlastnosti v různých místech sítě. Byly zvoleny tři sady vzorků, ze kterých bylo vyhodnoceno, jaká část sítě disponovala nejvyšší pravděpodobností pro přetržení. U zvolené sítě se jednalo o sadu A, která testovala samotné lanko sítě. Poté byly provedeny laboratorní testy, pro jejichž testování byly zvoleny právě vzorky sady A.

V rámci laboratorních testů bylo testováno devět různých dvoulistých a třílistých vrtulí, a byly pozorovány účinky vyvolané jejich mnohonásobnou kolizí se sítí, v závislosti na dvou různých hodnotách napnutí sítě. Při nižší hodnotě napnutí nebyly pozorovány změny v mechanických vlastnostech sítě. Obecně bylo zjištěno, že při vyšší hodnotě napnutí vznikaly větší změny v mechanických vlastnostech sítě. I při simulaci mnohonásobných kolizí v jedné části sítě, byla síť schopna odolat úplnému přetržení lanka. I kdyby při reálném využití sítě došlo k poškození takové velikosti, že by jedno lanko bylo přetrženo, síť bude stále schopna udržet UAV ve vyhrazeném prostoru. Případný vznik i takto extrémních situací bude ošetřen pomocí vizuálních prohlídek, při nichž bude kontrolován stav sítě a poškození detekovatelná pouhým okem. Metodika předpokládala, že poškození, která nejsou viditelná okem, nezpůsobují změny v mechanických vlastnostech. Tento předpoklad byl u testování polypropylenové sítě ověřen. V případě nálezu výrazného poškození sítě, či přetržení již jednoho lanka sítě bude síť vyměněna.

Dále bylo provedeno testování zachycení vrtulového dronu v reálných podmínkách. Byly prováděny nálety celého dronu do sítě a docházelo k jeho odrazu od sítě, či namotání do sítě. V případech, kdy došlo k jeho odrazu, nebyla pozorována žádná vizuální poškození sítě. Příčinou vzniku poškození



bylo až namotávání sítě k šasi motoru jedné, či více vrtulí. Bylo provedeno sedmnáct náletů, během nichž převládalo namotávání do sítě, avšak ani po ukončení testování nebyla síť v žádném místě testované části přetržena. Po některých náletech vznikala poškození pouze ve formě mírného roztřepení, či uvolnění spoje.

Během testování metodiky však byly objeveny její limity. U laboratorních testů byla pozorována limitace v rychlosti zdvihu pneumatického válce, který nebyl schopen na takto krátké vzdálenosti vyvinout dostatečně vysokou rychlost, aby bylo možné otestovat i nejvyšší možné rychlosti letu závodních UAVs. Dalším aspektem, který nebyl zahrnut do testování, je hmotnost UAV. Tato metodika se zaměřuje pouze na účinky, které vzniknou při styku rotující vrtule s ochrannou sítí bez ohledu na hmotnost UAV. Během práce také nebyla uvažována degradace materiálu sítě z důvodu stárnutí, či nebyly dostatečně zkoumány účinky namotání sítě k šasi motoru jedné, či více vrtulí. Uvedené limity mohou sloužit jako poznatky pro vývoj dalších metodik, zabývajících se testováním ochranných sítí s účelem zachycovat vrtulová UAVs.

Navržená metodika cílí primárně na vyvíjející se koncept vzdělávacích míst, určených pro vzdělávání v oblasti bezpilotních systémů, kde bude vymezen prostor právě pomocí ochranných sítí. Pro provoz zde bude stanoven provozní řád a pravidla. Sítě budou využity pouze jako mechanická zábrana v případě, že by hrozil neúmyslný únik UAV z tohoto prostoru. Do sítě se tedy nebude úmyslně narážet a délka její životnosti bude záviset primárně na objemu provozu daného vzdělávacího místa a množství situací, při kterých dojde k neúmyslnému styku UAV se sítí.

Výhodou této metodiky jsou nízké náklady laboratorních testů, protože pro jejich provedení není vyžadováno celé UAV, které bylo nahrazeno experimentálním zařízením. S tím je spojena další výhoda, představující nízkou náročnost na velikost prostoru pro laboratorní testování. Jelikož lineární pohyb směrem ke vzorku sítě je proveden pneumatickým válcem, není potřeba velkých vzdáleností pro zajištění bezpečné vzdálenosti osob od letícího UAV a vzdálenosti pro jeho rozlet. Pozitivní přínos tkví i v relativně nízké časové náročnosti, potřebné pro instalaci vybavení laboratorních testů. U testování v reálných podmínkách již nejsou zmíněné výhody tak markantní, jelikož je třeba dostatečně velký prostor pro napnutí sítě a je třeba mít celé kompletní UAV.

Tato metodika se jeví jako zcela dostačující pro otestování ochranných zachytných sítí v kontextu vrtulových UAVs. Zkoumaná polypropylenová síť byla zhodnocena jako způsobilá pro zachycování UAVs, využívajících některé z výše otestovaných vrtulí, a při napnutí na testované hodnoty.





Avšak pouze za předpokladu provádění pravidelných vizuálních kontrol stavu sítě, následovaných její výměnou v případě poškození, jež by mohlo umožnit únik UAV mimo vyhrazený prostor.



## Reference

- [1] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139 ze dne 4. července 2018 o společných pravidlech v oblasti civilního letectví a o zřízení Agentury Evropské unie pro bezpečnost letectví. *Úřední věstník Evroské unie*, L212:1–122, 08 2018.
- [2] Prováděcí nařízení Komise (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel. *Úřední věstník Evroské unie*, L152:45–71, 06 2019.
- [3] Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2020/1058 ze dne 27. dubna 2020, kterým se mění nařízení v přenesené pravomoci (EU) 2019/945, pokud jde o zavedení dvou nových tříd bezpilotních systémů. *Úřední věstník Evroské unie*, L232:1–27, 07 2020.
- [4] Drew Hanover, Antonio Loquercio, Leonard Bauersfeld, Angel Romero, Robert Pěnička, Yunlong Song, Giovanni Cioffi, Elia Kaufmann, and Davide Scaramuzza. Autonomous Drone Racing: A Survey. *ArXiv*, abs/2301.01755:1–20, 01 2023.
- [5] Verma, Anand Kishor and Pradhan, Neeraj Kumar and Nehra, Rajesh and Prateek. Challenge and Advantage of Materials in Design and Fabrication of Composite UAV. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 455, 12 2018.
- [6] M. Hassanalian and A. Abdelkefi. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91:99–131, 2017.
- [7] Sharma, Manjula and Gupta, Akshita and Gupta, Sachin Kumar and Alsamhi, Saeed Hamood and Shvetsov, Alexey V. Survey on Unmanned Aerial Vehicle for Mars Exploration: Deployment Use Case. *Drones*, 06, 2022.
- [8] Zdeněk Svatý, Tomáš Mičunek, Michal Frydrýn, Luboš Nouzovský, Pavel Vrtal. A System to Support the Safe Commercial Operation of Unmanned Aerial Vehicles in Shared Airspace of the Czech Republic - Evaluating the Impact of Collisions between Unmanned Aircraft Systems and Humans: A Study on Crash Testing. Impact study 1, Czech Technical University in Prague, Prague, 02 2023. Available from: <https://owncloud.cesnet.cz/index.php/s/eDAz7io4k1sW5j4>.
- [9] ElFaham, Mohamed M. and Mostafa, Ayman M. and Nasr, G.M. Unmanned aerial vehicle (UAV) manufacturing materials: Synthesis, spectroscopic characterization and dynamic mechanical analysis (DMA). *Journal of Molecular Structure*, 1201, 2020.



- [10] Piotr Kardasz, Jacek Dnoskocz, Mateusz Hejduk, Pawel Wiejkut, and Hubert Zarzycki. Drones and Possibilities of Their Using. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 6, 01 2016.
- [11] Alka Sawale, D. Archana, and C. Seshank. Design and Analysis of Propeller. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 455, 12 2018.
- [12] Shubham Yadav, Monika Sharma, and Abhishek Borad. Thrust Efficiency of Drones (quad copter) with Different Propellers and Their Payload Capacity. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 4(2):18–23, 04 2017.
- [13] M.N.K. Othman, Z.M Razlan, Z.A. Wahid, Shahrman A.B., I. Zunaidi, Wan Khairunizam, N.Z. Noriman. Experimental study of UAV propeller Thrust generation for various Propeller Blade-Span and the relation with mouth-ring. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 557, 06 2019.
- [14] Wan Salim, Wan Saiful-Islam and bin Aminuddin, Ahyatuddin. Aerodynamic Analysis of Propeller for Heavy Lifting Drone Applications Using Blade Element Momentum Analysis. *Progress in Aerospace and Aviation Technology*, 2(2):24–32, 2022.
- [15] Tammaso Bresciani. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter. Master's Thesis, Lund University - department of Automatic Control, Lund, Sweden, 10 2008.
- [16] Marcelo De Lellis Costa de Oliveira. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Aircraft. Master's Thesis, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic, 06 2011.
- [17] Hyunsoo Yang, Yongseok Lee, Sang-Yun Jeon, and Dongjun Lee. Multi-rotor drone tutorial: systems, mechanics, control and state estimation. *Intelligent Service Robotics*, 10:79–93, 03 2017.
- [18] Rachel Swatman. [www.guinnessworldrecords.com - Video: Giant multicopter drone that could lift weight of a human adult flies into record books](https://www.guinnessworldrecords.com/news/2016/1/video-giant-multicopter-drone-that-could-lift-weight-of-a-human-adult-flies-into-record-books) [online], 2016. Available from: <https://www.guinnessworldrecords.com/news/2016/1/video-giant-multicopter-drone-that-could-lift-weight-of-a-human-adult-flies-into-413032>.
- [19] Jan Krmela, Alzbeta Bakosova, and Sylvain Krmelova, Vladimira Sadjiep. Drone propeller blade material optimization using modern computational method. 05 2021.



- [20] Guicong Li, Hongfu Zuo, and Juan Xu. Research on the Influence of UAV Anti-collision Device on Aerodynamic shape. *Journal of Physics: Conference Series*, 2477, 04 2023.
- [21] Eamon T. Campolettano, Megan L. Bland, Ryan A. Gellner, David W. Sproule, Bethany Rowson, Abigail M. Tyson, Stefan M. Duma, and Steven Rowson. Ranges of Injury Risk Associated with Impact from Unmanned Aircraft Systems. *Annals of Biomedical Engineering*, 45(12):2733–2741, 09 2017.
- [22] Nitish Bansal, Saurabh Aggarwal, and Punit Tiwari. A case report of drone injury and its relevance in India. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 19:183–186, 2021.
- [23] Chia-Fen Chi, Tin-Chang Chang, and Hsin-I Ting. Accident patterns and prevention measures for fatal occupational falls in the construction industry. *Applied Ergonomics*, 36(4):391–400, 2005. Ergonomics in Building and Construction.
- [24] David F. Tavella. Duty of Care to Spectators at Sporting Events: A Unified Theory. *Florida A&M University Law Review*, 5(2):181–196, 2010.
- [25] S. Castellano, G. Scarascia Mugnozza, G. Russo, D. Briassoulis, A. Mistriotis, S. Hemming, D. Waaijenberg. Plastic Nets in Agriculture: A General Review of Types and Applications. *Applied Engineering in Agriculture*, 24(6):799–808, 2008.
- [26] Thomas C. Badger, Marc Fish, Steve Lowell, Tony Allen. Use of Ring Nets for Slope Protection for Rockfall: End-of-Construction Report. Research Report WA-RD 729.1, Washington State Department of Transportation, Tumwater, Washington, 06 2009.
- [27] A.Lloyd, P.Barry. Performance of Safety Netting under Low Velocity Impact Loading. In *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021. CSCE 2021*, Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE, volume 241), pages 421–431, Singapore, 04 2022. Department of Civil Engineering and Ballistics and Mechanical Test Lab, University of New Brunswick, Springer Singapore.
- [28] Paul McCann BEng. Evaluation of safety nets by experiment. Research Report RR835, Health and Safety Executive, Buxton, Derbyshire, 05 2011.
- [29] Derek Yu, Andrea Judasz, Minghui Zheng, and Eleonora Botta. Design and Testing of a Net-Launch Device for Drone Capture. AIAA SciTech Forum, 01 2022.



- [30] LTD,Haverford Brands PTY. [www.haverford.com.au](http://www.haverford.com.au) - Drone and UAV barrier net [online]. Available from: <https://haverford.com.au/collections/drone-and-uav-barrier-net>.
- [31] Rehm Webdesign and konstruktiv GmbH. [www.safetynet365.com](http://www.safetynet365.com) - Safety Nets for Drones, UAVs, Model Aerodromes & Flying Areas [online], 2009. Available from: <https://safetynet365.com/Safety-Nets-for-Aeromodelling-Drones:::281.html>.
- [32] [www.networldsports.co.uk](http://www.networldsports.co.uk) - Drone Netting & Enclosures [online]. Available from: <https://www.networldsports.co.uk/industrial-equipment/drone-uav-netting.html>.
- [33] Hyungpil Moon, Jose Martinez-Carranza, Titus Cieslewski, Matthias Faessler, Davide Falanga, Alessandro Simovic, Davide Scaramuzza, Shuo Li, Michael Ozo, Christophe De Wagter, Guido Croon, Sunyou Hwang, Sunggoo Jung, Hyunchul Shim, Haeryang Kim, Minhyuk Park, Tsz-Chiu Au, and Si Jung Kim. Challenges and implemented technologies used in autonomous drone racing. *Intelligent Service Robotics*, 12:137–148, 04 2019.
- [34] Jeffrey Delmerico, Titus Cieslewski, Henri Rebecq, Matthias Faessler, and Davide Scaramuzza. Are We Ready for Autonomous Drone Racing? The UZH-FPV Drone Racing Dataset. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 6713–6719, Montreal, 05 2019.
- [35] Dante Tezza, Denis Laesker, and Marvin Andujar. The Learning Experience of Becoming a FPV Drone Pilot. *HRI '21 Companion*, pages 239–241, New York, NY, USA, 03 2021. Association for Computing Machinery.
- [36] Yingzi Chen, Zhiqing Li, Longchuan Li, Shugen Ma, Fuchun Zhang, and Chao Fan. An anti-drone device based on capture technology. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2(3), 2022.
- [37] Ahmed Alamouri, Astrid Lampert, and Markus Gerke. Impact of Drone Regulations on Drone Use in Geospatial Applications and Research: Focus on Visual Range Conditions, Geofencing and Privacy Considerations. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 2023.
- [38] Zhang Renyu, Seow Chee Kiat, Wen Kai, and Zhang Heng. Spoofing Attack of Drone. In *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pages 1239–1246, 2018.



- [39] ICAO. *Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (UTM) – A Common Framework with Core Principles for Global Harmonization*. International Civil Aviation Organization, Montreal, Quebec, Canada, 4 edition, 2023.
- [40] Christopher Blair Crawford and Brian Quinn. *Microplastic Pollutants*. Elsevier Science, 2016.
- [41] Lee Tin Sin and Bee Soo Tuen. *Plastics and Sustainability - Practical Approaches*. Elsevier, 2023.
- [42] R.W.Sarsby. *Geosynthetics in Civil Engineering*. Woodhead Publishing, 2007.
- [43] Korolev, Alexander and Mishnev, Maxim and Zherebtsov, Dmitry and Vatin, Nikolai Ivanovich and Karelina, Maria. Polymers under Load and Heating Deformability: Modelling and Predicting. *polymers*, 13, 01 2021.
- [44] Luca Desidery and Michele Lanotte. *Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads*, chapter 1 - Polymers and plastics: Types, properties, and manufacturing, pages 3–28. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, 2022.
- [45] D.W.Van Krevelen and K.Te Nijenhuis. *Properties of Polymers*. Elsevier Science, 4 edition, 2009.
- [46] Benjamin M. Davies, Oliver Mowforth, Aref-Ali Gharooni, Lindsay Tetreault, Aria Nouri, Rana S. Dhillon, Josef Bednarik, Allan R. Martin, Adam Young, Hitoshi Takahashi, Timothy F. Boerger, Virginia FJ Newcombe, Carl Moritz Zipser, Patrick Freund, Paul Aarne Koljonen, Ricardo Rodrigues-Pinto, Vafa Rahimi-Movaghar, Jefferson R. Wilson, Shekar N Kurpad, Mark R. N. Kotter, Michael G. Fehlings, Brian K Kwon, James S. Harrop, James D. Guest, and Armin Curt. A New Framework for Investigating the Biological Basis of Degenerative Cervical Myelopathy [AO Spine RECODE-DCM Research Priority Number 5]: Mechanical Stress, Vulnerability and Time. *Global Spine Journal*, 12:78S–96S, 02 2022.
- [47] Luděk Ptáček a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2003.
- [48] Václav Machek. *Kovové materiály 2 - Vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha, 2014.
- [49] PHOTRON LIMITED, Tokyo. *FASTCAM SA-Z Hardware manual*, 12 2013.



## Přílohy

### Seznam příloh

Příloha 1 – Matlab kód – křivky tahových zkoušek a jejich průměr . . . . .	89
Příloha 2 – Matlab kód – průměrová křivka a křivky vzorků z laboratorních testů . . . . .	91
Příloha 3 – Matlab kód – průměrová křivka a křivky vzorků z reálného experimentu . . . . .	92
Příloha 4 – Matlab kód – průměrové křivky sada A, sada B a sada C . . . . .	93



## Příloha 1

Matlab kód – křivky tahových zkoušek a jejich průměr

```
%uzavření všech oken
clc
clear
close all

%popisky grafu
OsX = "ΔL - prodloužení (mm)"
OsY = "F - síla (kN)"

D = dir("*.txt")           %načtení dat
D = struct2table(D)       %převod dat do tabulky
D.name = string(D.name)  %změna datového typu
ShortName = extractBefore(D.name, ".txt") %zkrácení názvů
FIG = figure()           %vytvoření prázdného obrázku

hold on
for i = 1:height(D)
    T = readtable(D.name(i));           %načtení dat z textových souborů
    T.Var4 = [];                       %odstranění sloupce s názvem Var4
    T.Var5 = [];                       %odstranění sloupce s názvem Var5

    prodlouzeni{i}=table2array(T(:,2)); %postupně uloží data do jedné proměnné prodlouzeni jako cell array
    sila{i}=table2array(T(:,3));       %postupně uloží data do jedné proměnné sila jako cell array

    plot(table2array(T(:,2)),table2array(T(:,3))) %vykreslení křivek
end

for k = 1:height(D)
    delka(:,k)=length(prodlouzeni{1,k}) %zjištění délky vektorů (prodloužení)
end

max=max(delka) %zjištění nejdelšího vektoru z měření

for l = 1:height(D)
    prodlouzeni{1,l}(end+1:max)=nan %doplnění všech vektorů na stejnou maximální délku přidáním NaN hodnot
    sila{1,l}(end+1:max)=nan %doplnění všech vektorů na stejnou maximální délku přidáním NaN hodnot
end

for h = 1:height(D)
    prodlouzeni_matice(:,h)=prodlouzeni{1,h}; %převod cell array na matici dat
    sila_matice(:,h)=sila{1,h}; %převod cell array na matici dat
end

%transpozice, průměr, transpozice zpět
prodlouzeni_matice_T=transpose(prodlouzeni_matice);
sila_matice_T=transpose(sila_matice);
prumer_prodlouzeni=nanmean(prodlouzeni_matice_T,1);
prumer_sila=nanmean(sila_matice_T,1);
prumer_prodlouzeni=transpose(prumer_prodlouzeni);
prumer_sila=transpose(prumer_sila);

plot(prumer_prodlouzeni,prumer_sila,"LineWidth",2,"Color","b") % vykreslení průměru

%nastavení parametrů pro osy grafu
xlabel(OsX,"FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
ylabel(OsY,"FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
ylim([0,1])
xlim([0,50])

%uložení hodnot prodloužení a síly pro další kódy
save("variables.mat","prumer_prodlouzeni","prumer_sila")
```



```
%vytvoření názvů do legendy
for i =1:height(D)
    legendarynames(i) = strjoin(["Vzorek " string(i)], "");
end
legendarynames = [legendarynames "Průměr"]

%vytvoření širokoúhlého obrázku
PozF = FIG.Position;
PozF(3) = 1000
FIG.Position = PozF

%nastavení legendy
lgd = legend(legendarynames,"Location","southoutside",FontSize=14,FontName="Times New Roman")
set(gca,"FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
lgd.NumColumns=height(D)+1

%uložení obrázku
saveas(FIG,strjoin(["graf_prumer_a_krivky_neponicene" ".jpg"], ""))
savefig(FIG,strjoin(["graf_prumer_a_krivky_neponicene" ".fig"], ""))
```



## Příloha 2

Matlab kód – průměrová křivka a křivky vzorků z laboratorních testů

```
%uzavření všech oken
clc
clear
close all

%popisky grafu
OsX = "ΔL - prodloužení (mm)"
OsY = "F - síla (kN)"

dirnum = 2 %načtení složky - sada A
DataFolder = pwd; %uložení cesty
DIR = dir(); %načtení dat
DIR = struct2table(DIR); %převod dat do tabulky
DIR = DIR(DIR.isdir == 1,:); %odstranění všech souborů kromě složek
DIR(1:2,:) = []; %odstranění prvních dvou řádků
DIR.name = string(DIR.name); %změna datového typu

barvy = ["r" "b" "g"] %nastavení barev pro vykreslení průměru (v závislosti na sadě)
FIG = figure() %vytvoření prázdného obrázku

hold on
cd(DIR.name(dirnum)) %změna directory
load variables.mat %načtení hodnot z kódu viz příloha 2
plot(prumer_prodlouzeni,prumer_sila,"LineWidth",2,"Color",barvy(1)) %vykreslení průměru

%změna složky na vzorky vystavené kolizím s vrtulí
cd("C:\Users\HP\OneDrive\Plocha\bakalarska_prace\MATLAB_BP\laboratorni_testy_prumer_a_vrtule\vrtule_8_oranzova_zdenek_velka")
dataD = dir("*.txt") %načtení dat
dataD = struct2table(dataD) %převod dat do tabulky
dataD.name = string(dataD.name) %změna datového typu

for i = 1:height(dataD)
    T = readtable(dataD.name(i)); %načtení dat z textových souborů
    plot(table2array(T(:,2)),table2array(T(:,3)),"LineWidth",1) %vykreslení křivek
end

%vytvoření názvů pro legendu, nastavení legendy
legendarynames = ["Průměr" "Napnutí 2N" "Napnutí 20N"]

lgd = legend(legendarynames,"Location","southoutside",FontSize=14,FontName="Times New Roman")
set(gca,"FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
lgd.NumColumns=height(dataD)+1

    cd(DataFolder) %návrat do původní složky

%vytvoření širokoúhlého obrázku
PozF = FIG.Position;
PozF(3) = 1000
FIG.Position = PozF

%nastavení parametrů pro osy grafu
xlabel(OsX,"FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
ylabel(OsY,"FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
ylim([0,1])
xlim([0,50])

%uložení obrázku
saveas(FIG,strjoin(["laboratorni_testy" DIR.name(dirnum) ".jpg"],""))
savefig(FIG,strjoin(["laboratorni_testy" DIR.name(dirnum) ".fig"],""))
```



## Příloha 3

Matlab kód – průměrová křivka a křivky vzorků z reálného experimentu

```
%zavření všech oken
clc
clear
close all

%popisky grafu
OsX = "ΔL - prodloužení (mm)"
OsY = "F - síla (kN)"

dirnum = 1 %načtení složky, volitelně 1,2,3 - sada A, sada B nebo sada C
DataFolder = pwd; %uložení cesty

%nastavení složky vzorků z reálného experimentu
trhaneFolder =
"C:\Users\HP\OneDrive\Plocha\bakalarska_prace\MATLAB_BP\juliska_experiment_vzorky_prumer\juliska_tahovka";

DIR = dir(); %načtení dat
DIR = struct2table(DIR); %převod dat do tabulky
DIR = DIR(DIR.isdir == 1,:); %odstranění všech souborů kromě složek
DIR(1:2,:) = []; %odstranění prvních dvou řádků
DIR.name = string(DIR.name); %změna datového typu

barvy = ["r" "b" "g"] %nastavení barev
FIG = figure() %vytvoření prázdného obrázku
hold on
cd(DIR.name(dirnum)) %změna directory
load variables.mat %načtení hodnot prodloužení a síly z kódu viz příloha 3
plot(prumer_prodlouzeni,prumer_sila,"LineWidth",2,"Color",barvy(3)) %vykreslení průměru nepoškozených vzorků

cd(trhaneFolder) %změna složky na složku s daty z reálného experimentu
cd(DIR.name(dirnum)) %změna directory
dataD = dir("*.txt") %tabulka souborů končících .txt
dataD = struct2table(dataD) %převod do tabulky
dataD.name = string(dataD.name) %změna datového typu
b.FaceColor = ["#4DBEEE" "#D95319" "#EDB120"] %nastavení barev
h = 1
for i = 1:height(dataD)
    T = readtable(dataD.name(i)); %načtení tabulky - data z textových souborů
    %vykreslení křivek
    plot(table2array(T(:,2)),table2array(T(:,3)),"LineWidth",1,"Color",b.FaceColor(h))
    %vytvoření názvů do legendy
    legendarynames(i) = strjoin(["síť po kolizi - Vzorek " string(i)], "");
    h=h+1
end

%nastavení názvů do legendy, nastavení legendy
legendarynames = ["Průměr" legendarynames]
lgd = legend(legendarynames,"Location","southoutside",FontSize=14,FontName="Times New Roman")
lgd.NumColumns=height(dataD)+1

cd(DataFolder) %návrát do původní složky

%vytvoří širokoúhlý obrázek
PozF = FIG.Position;
PozF(3) = 1000
FIG.Position = PozF

%nastavení parametrů pro osy grafu
xlabel(OsX,"FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
ylabel(OsY,"FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
ylim([0,1])

%uložení obrázku
saveas(FIG,strjoin(["graf_prumer_trhane" DIR.name(dirnum) ".jpg"], ""))
savefig(FIG,strjoin(["graf_prumer_trhane" DIR.name(dirnum) ".fig"], ""))
```



## Příloha 4

Matlab kód – průměrové křivky sada A, sada B a sada C

```
%zavření všech oken
clc
clear
close all

%popisky grafu
OsX = " ΔL - prodloužení (mm)"
OsY = "F - síla (kN)"

ID = [3 1 2]           %seřazení složek (sady A, sady B a sady C)

DIR = dir();           %načtení dat
DIR = struct2table(DIR); %převod dat do tabulky
DIR = DIR(DIR.isdir == 1,:); %odstranění všech souborů kromě složek
DIR(1:2,:) = [];       %odstranění prvních dvou řádků
DIR.name = string(DIR.name); %změna datového typu
DIR(ID,:) = DIR        %seřazení podle ID
prodlouzeni = table(); %vytvoření prázdné tabulky
sila = table();        %vytvoření prázdné tabulky

barvy = ["r" "b" "g"] %nastavení barev
FIG = figure()         %vytvoření prázdného obrázku
hold on
for dirnum = 1:height(DIR)
    cd(DIR.name(dirnum)) %změna directory
    load variables.mat   %načtení hodnot prodloužení a síly
    plot(prumer_prodlouzeni,prumer_sila,"LineWidth",2,"Color",barvy(dirnum)) %vykreslení průměru

    cd ..\              %přechod do další složky
end

%vytvoření širokoúhlého obrázku
PozF = FIG.Position;
PozF(3) = 1000
FIG.Position = PozF

%nastavení parametrů pro osy grafu
xlabel(OsX, "FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
ylabel(OsY, "FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
ylim([0,1])
xlim([0,100])

%nastavení legendy
lgd = legend(["sada A" "sada B" "sada C"],"Location","southoutside",FontSize=14,FontName="Times New Roman")
set(gca, "FontSize",14,"FontName","Times New Roman")
lgd.NumColumns=height(DIR)

%uložení obrázku
saveas(FIG,strjoin(["graf_prumerove_krivky_dohromady" ".jpg"],""))
savefig(FIG,strjoin(["graf_prumerove_krivky_dohromady" ".fig"],""))
```