

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta aplikovaných věd  
Katedra mechaniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
Simulace střely florbalovou holí

Vypracoval:

Dmytro Korch

Vedoucí:

Ing. Jan Krystek, Ph.D.

# SEM VLOŽ ZADÁNÍ

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

V Plzni dne:

Podpis:

## Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem rozložení tuhosti podél florbalové hole při zvolené ohybové tuhosti (*flexu*) tak, aby výsledná rychlost míčku po jeho vystřelení byla co nejvyšší. Díky tomu lze ověřit, zda-li určité technologie používané na florbalových holích jsou užitečné, či nikoliv. Pro vykonání stanovených cílů této práce bylo použito konečnoprvkového systému *Abaqus* a výpočetního programu *Matlab*. Pomocí programovacího jazyka *Python* byly vytvořeny parametrické skripty pro opakovatelné sestavení modelů certifikační ohybové zkoušky (verifikované experimentem) a simulace příklepové střely florbalovou holí. Díky této práci bylo zjištěno, že změna rozložení tuhosti podél hole při zachování její ohybové tuhosti (*flexu*) má nezanedbatelný vliv na výslednou rychlost míčku po jeho vystřelení.

**Klíčová slova:** florbal, florbalová hůl, střela, kompozit, ohybová zkouška, experiment, metoda konečných prvků, tuhost.



# Abstract

This work focuses on design of stiffness distribution along the floorball stick with specific flex value for a purpose maximize velocity of a ball after his shot. Thanks to that can be verified if some applied technologies on floorball sticks are useful or not. To achieve the stated targets were used finite element system Abaqus and computer program Matlab. With the use of programming language Python were created parametrical scripts for repeatable startup of computational models of certificated bending test (verified by experiment) and simulation of floorball shot. In this work was found that modification of stiffness distribution along the floorball stick with specific flex value have significant effect on velocity of a ball after his shot.

**Key words:** floorball, floorball stick, shot, composite, bending test, experiment, finite element method, stiffness.

## Poděkování

Rád bych zde v první řadě poděkoval Ing. Janu Krystkovi, Ph.D., vedoucímu práce, který mi umožnil pracovat na tématu, jež je mým dlouholetým koníčkem a vášní, za ochotu, vstřícnost a čas který mi věnoval během nespočetně mnoha konzultací, za příjemné pracovní prostředí a užitečné rady v průběhu psaní této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině včetně mojí milé polovičky za psychickou a finanční podporu během celého mého studia, které by bez nich zhaslo dříve než plamen svíčky v aerodynamickém tunelu.

V neposlední řadě děkuji svým florbalovým spoluhráčům a především kamarádům z FBŠ Plzeň, Forsee a univerzitního týmu Tvoje máma, kteří byli ochotní mi poskytnou svoje vyřazené florbalové hole pro účely této práce. Děkuji jim za jejich nadšení a zájem, který mi během mého studia vždy vháněl vítr do plachet a doufám, že tato práce bude prospěšná všem florbalovým nadšencům.

# Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>   | <b>12</b> |
| <b>2</b> | <b>Florbal</b>  | <b>14</b> |
| 2.1      | Historie . . . . .  | 14        |
| 2.2      | Popularita . . . . .  | 14        |
| <b>3</b> | <b>Florbalová hůl</b>   | <b>16</b> |
| 3.1      | Části hole . . . . .  | 16        |
| 3.2      | Rozměry hole . . . . .  | 17        |
| 3.3      | Materiál hole . . . . .                                       | 17        |
| 3.4      | Technika střeley . . . . .                                    | 18        |
| 3.4.1    | Střela tahem . . . . .  | 19        |
| 3.4.2    | Střela příklepem . . . . .                                    | 19        |
| 3.5      | Typy holí a jejich technologie . . . . .                      | 20        |
| 3.5.1    | Rovný tvar tyče . . . . .                                     | 21        |
| 3.5.2    | Zakřivený tvar tyče . . . . .                                 | 22        |
| 3.6      | Experimentální stanovení ohybové tuhosti . . . . .            | 24        |
| 3.6.1    | Ověření korektního provedení certifikační zkoušky . . . . .   | 25        |
| 3.7      | Důležité parametry hole . . . . .                             | 28        |
| <b>4</b> | <b>Numerický model</b>  | <b>29</b> |
| 4.1      | Model ohybové certifikační zkoušky . . . . .                  | 29        |
| 4.1.1    | Validace modelu experimentem . . . . .                        | 30        |
| 4.1.2    | Vliv skladby vláken a počtu vrstev na průhyb modelu . . . . . | 31        |
| 4.2      | Model pro simulaci střeley . . . . .                          | 33        |
| 4.2.1    | Tyč . . . . .   | 36        |
| 4.2.2    | Čepel . . . . .   | 39        |
| 4.2.3    | Sestava . . . . .   | 41        |
| <b>5</b> | <b>Výsledky</b>   | <b>42</b> |
| <b>6</b> | <b>Závěr</b>  | <b>44</b> |

## Seznam použitých symbolů

|                   |                      |   |
|-------------------|----------------------|---|
| $F_z$             | [N]                  | Zatěžující síla pro experimentální stanovení hodnoty ohybové tuhosti ( <i>flexu</i> ) florbalové hole dle IFF [1] |
| $l_A, l_B$        | [mm]                 | Vzdálenost podpor pro certifikační ohybovou zkoušku typu A, B dle IFF [1]   |
| $v_A, v_B$        | [mm]                 | Hodnota průhybu ( <i>flexu</i> ) hole pro pevnostní kritérium typu A, B dle IFF [1]                               |
| $d_p$             | [mm]                 | Hodnota průměru podpor dle IFF [1]  |
| $l_u$             | [mm]                 | Délka tyče vzorové florbalové hole <i>Unihoc</i>  |
| $d_1, d_2$        | [mm]                 | Vnitřní průměr vzorové florbalové hole <i>Unihoc</i> v místě čepele (1) a horního úchopu hole (2)                 |
| $t_v$             | [mm]                 | Zvolená hodnota tloušťky jedné vrstvy kompozitního materiálu florbalové hole                                      |
| $t_c$             | [mm]                 | Hodnota celkové tloušťky kompozitního materiálu florbalové hole   |
| $f_t$             | [-]                  | Koeficient tření pro model střely   |
| $t_{\text{real}}$ | [s]                  | Reálný čas simulace pro model střely  |
| $E_{\text{ef}}$   | [Pa]                 | Efektivní modul pružnosti zhomogenizovaného materiálu tyče  |
| $m$               | [kg]                 | Hmotnost  |
| $\rho$            | [kg/m <sup>3</sup> ] | Hustota   |
| $V$               | [m <sup>3</sup> ]    | Objem   |
| $t_{\text{sim}}$  | [s]                  | Konečný čas simulace pro model střely   |
| $\nu$             | [-]                  | Poissonovo číslo (stejné pro všechny díly soustavy modelu střely)   |
| $n, q, c$         | [-]                  | Pomocné parametry modelu střely   |
| $r_m$             | [mm]                 | Poloměr florbalového míčku  |
| $t_m$             | [mm]                 | Tloušťka stěny florbalového míčku   |
| $E_j$             | [Pa]                 | Nastavitelná hodnota modulu pružnosti jednotlivých sekcí tyče, kde index $j = 1, 2, 3, \dots, 10$                 |
| $v_i$             | [km/h]               | Výsledná rychlost klíčových návrhů rozložení tuhosti podél hole, kde index $i = 0, 1, 2, 3$                       |

## Seznam obrázků

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.1  | Přehled částí florbalové hole . . . . .  | 16 |
| 3.2  | Požadavky na rozměry florbalové hole podle [1] . . . . .   | 17 |
| 3.3  | Příčně izotropní materiál s rovinou izotropie $x_2 x_3$ . . . . .  | 18 |
| 3.4  | Technika střely tahem dle [6] . . . . .  | 19 |
| 3.5  | Technika střely příklepem dle [2] . . . . .  | 20 |
| 3.6  | Přehled tvarů rukojetí <i>Oval</i> a <i>Hockey</i> v porovnání s běžným tvarem   | 22 |
| 3.7  | Zvýrazení oblasti technologie KickZone . . . . .   | 23 |
| 3.8  | Florbalová hůl s technologií <i>KickZone</i> v kombinaci s <i>X-Shaft</i> . . . . .  | 23 |
| 3.9  | Zvýrazení oblasti technologie Curve . . . . .  | 24 |
| 3.10 | Certifikační zkouška po určení <i>flexu</i> florbalové hole typu A podle [1]   | 25 |
| 3.11 | Snímek porušení <i>shaftu</i> zelené florbalové hole Salming . . . . .   | 26 |
| 3.12 | Místo lomu zelené florbalové hole Salming . . . . .  | 26 |
| 3.13 | Průběh průhybu zelené hole Salming v závislosti na zatěžující síle .   | 26 |
| 3.14 | Snímek porušení <i>shaftu</i> červené florbalové hole Salming . . . . .  | 27 |
| 3.15 | Červená hůl Salming při průhybu 60 mm . . . . .  | 27 |
| 3.16 | Průběh průhybu červené hole Salming v závislosti na zatěžující síle  | 27 |
| 4.1  | Zatěžující osamělá síla a okrajové podmínky kompozitové trubky<br>s detailními snímky řezu v místě jejich zadání . . . . . | 30 |
| 4.2  | Vstupní parametry modelu ve skriptu . . . . .  | 31 |
| 4.3  | Konečnoprvkový model testovací trubky . . . . .  | 31 |
| 4.4  | Mikroskopické snímky kompozitního materiálu porušených florba-<br>lových holí . . . . .                                    | 33 |
| 4.5  | Postup získávání souřadnic bodů držadla florbalové hole pro nade-<br>finování pohybu střely . . . . .                      | 34 |
| 4.6  | Trajektorie bodu úchopu hole spodní rukou hráče a polohy tyče ve<br>21 zvolených časových krocích . . . . .                | 35 |
| 4.7  | Porovnání žlutých trajektorií pro získání reálného času simulace . .   | 36 |
| 4.8  | Rozdělení <i>shaftu</i> florbalové hole na jednotlivé sekce vyjma držadla .  | 36 |
| 4.9  | Okrajové podmínky tyče florbalové hole pro simulaci střely . . . . .   | 38 |
| 4.10 | Konečnoprvková síť tyče florbalové hole pro simulaci střely . . . . .  | 39 |
| 4.11 | Geometrie modelu čepele vycházející ze <i>Salming Quest Endurance</i> .  | 39 |
| 4.12 | Okrajová podmínka v perspektivě vyobrazené čepele připojené k tyči   | 40 |
| 4.13 | Konečnoprvková síť čepele florbalové hole pro simulaci střely . . . .  | 40 |
| 4.14 | Model pro simulaci příklepové střely florbalovou holí . . . . .  | 41 |



## Seznam tabulek

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Deset nejoblíbenějších sportů v České republice podle [8] . . . . .                                       | 15 |
| 3.1 | Důležité parametry hole podle [4] . . . . .   | 28 |
| 4.1 | Vliv skladby vláken a počtu vrstev na průhyb hole . . . . .   | 32 |
| 5.1 | Klíčové návrhy rozložení tuhosti podél hole při zachování <i>flexu</i> tyče<br>dle regulací IFF . . . . . | 42 |

# 1 | Úvod

Slon je větší, kůň je hbitější, motýl je na první pohled mnohem krásnější. Vlastností, kterou člověk převyšuje všechny ostatní tvory na Zemi, je schopnost myslet. Díky této lidské přednosti lze dnes vynalézat a tvořit věci, které si dříve lidé neuměli ani představit. Rozvíjí se mnoho oborů a otevírají nové možnosti v oblastech jako je stavitelství, cestování, komunikace, ale i zábava.

Svou tvořivost člověk využívá nejen, aby si ulehčoval život, ale aby si také zkrátil čas. Proto dnes existuje spousta druhů sportovních a deskových her, u kterých lze stěží dohledat jejich počátek, neboť se intuitivně hrají už po staletí. Jedním z takových sportů je bezpochyby lední hokej, který je typický zejména pro severské země. Hokej je dnes nejen zábavným a velmi rozšířeným sportem, ale také dal podnět k vzniku novým sportům. Jednou z jeho posledních úspěšných odrůd je florbal.

Florbal je halový kolektivní sport, který hrají dvě družstva proti sobě s pěti hráči v poli a jedním brankářem v bráně. Hraje se s dutým umělohmotným míčkem tzv. florbalákem o velikosti jablka a hráči smejí k jeho přemísťování neomezeně používat nohy a hlavně florbalovou hůl tzv. florbalku. Brankář se snaží zachytit pouze svým vlastním tělem co nejvíce míčků, aby neprolétly do brány a vyhrává to družstvo, které vstřelí soupeři více branek.

Jak rychle tento mladý sport získává na popularitě, tak rychle sílí i soutěživost v něm. Hráči se předhánají v tom, kdo má lepší dovednosti, což svědčí o celkové kvalitě týmu. Ke zvýšení efektivity hráčských schopností se snaží přispět i výrobci florbalového vybavení právě díky různorodým zdokonalením hlavně u holí. Tato zdokonalení výrobci prezentují jako technologie, které jim přinášejí výhodu a prestiž v marketingovém boji proti konkurenčním florbalovým značkám. Cílem těchto technologií je například zvýšit efektivitu střely, snížit váhu hole nebo zlepšit kontrolu nad míčkem, ovšem jejich nevýhodou je prokázání žádoucích vlivů na hráčské vlastnosti.

Pro experimentální ověření, zda-li aplikované technologie na holi jsou užitečné, či nikoliv, je vždy třeba vyrobit testovací hůl. Taková výroba jednoho zkoumaného vzorku nemusí být vždy levná záležitost. Navíc v případě, kdy se bude zkoumat ohybová tuhost hole tzv. *flex* nebo mezní stavy materiálu, lze předpokládat, že testovacích výrobků bude zapotřebí více, což už pro firmu nemusí být ekonomicky přijatelné. Proto je dobré s využitím výpočtové techniky předejít zbytečně nadměrné produkci testovacích vzorků.

Abyste bylo možné efektivně zjišťovat mezní stavy materiálu jakéhokoliv výrobku,



optimalizovat jeho parametry pro zlepšení mechanických vlastností a snížit finanční náklady na výrobu a vývoj, tak se v praxi využívá výpočtových modelů pro numerickou simulaci reálných fyzikálních procesů a experimentů.

Předtím, než bylo třeba využívat výpočtových modelů, jednou ze zásad této práce bylo provést rešerši typů florbalových holí a rozbor jejich vlastností. Toto bylo podrobně popsáno v třetí kapitole se stručným a výstižným uvedením do světa florbalu, kterým se zabývá kapitola předtím.

Další zásadou pro vypracování této práce bylo vytvořit numerický model certifikační ohybové zkoušky florbalové hole a validovat jej pomocí experimentu. Tomuto je důkladně věnována pozornost v podkapitole 4.1, kde díky vytvořenému modelu byla navíc provedena analýza vlivu skladby vláken a počtu vrstev kompozitního materiálu hole na její výsledný průhyb (*flex*), jak si lze prohlédnout v tab. 4.1.

Klíčovým cílem této práce bylo navrhnout tuhosti jednotlivých částí florbalové hole tak, aby střela s ní byla co nejefektivnější. Celý proces, jak se došlo k výslednému modelu pro simulaci střely detailně líčí podkapitola 4.2. Významné návrhy rozložení tuhosti podél hole jsou uvedeny v tab. 5.1 páté kapitoly, kde je zeleně vyznačený řádek s nejlepším výsledkem tuhostní konfigurace při zvoleném *flexu*.

Poslední kapitola je shrnutím dosažených poznatků, výsledků a závěrů z nich plynoucích celé této bakalářské práce, které dle mého názoru zaujmou každého florbalového nadšence.

## 2 | Florbal

V úvodu byl stručně popsán princip hry. Pro úplnost představy o florbalu, nejen jako o sportu, ale i jako o kultuře, která se kolem něj vytvořila, bude v této kapitole nastíněno jeho pozadí.

### 2.1 Historie

Florbal má své kořeny po celém světě, kde se hráli sporty jemu podobné. Jeho kolébkou je však Severní Amerika, kde v roce 1958 byla vytvořena první plastová hokejka a vznikla tak hra, která pochopitelně neměla nic společného s florbalem, ale děti a mládež bavila natolik, že se pro ně dokonce pořádaly soutěže.

Umělohmotné hokejky vzali jako první v Evropě do rukou švédští studenti univerzit. V první polovině 70. let se zejména na švédských univerzitách hrálo spoustu her s plastovým míčkem a pukem, kde si svojí cestu razila také hra, která tehdy ještě neměla ani jednotný název, ale dala základ současnému florbalu. Pokud Severní Amerika byla jeho kolébkou, tak ve Švédsku se florbal poprvé postavil na vlastní nohy, kde v polovině 70. let dostal jednotnou podobu s názvem *Innebandy*. Je tedy pochopitelné, že Švédsko se považuje za místo vzniku soudobého florbalu.

V první polovině 80. let se zakládaly mládežnické kluby a federace pro rozvoj hry tehdy známé jako *Innebandy*. V roce 1986 byla založena Mezinárodní florbalová federace (*International Florbal Federation – IFF*), jejíž členy byly Švédsko, Švýcarsko a Finsko. Od založení IFF je *Innebandy* oficiálním sportem a pro veřejnost dostal internacionální název florbal.

Netrvalo dlouho a v první polovině 90. let počet členských zemí IFF<sup>1</sup> vzrostl natolik, že už v roce 1994 se uspořádalo první Mistrovství Evropy mužů, kdy hned rok poté nasledovala ta samá soutěž pro ženy. Tento atraktivní sled mistrovství pokračuje i nadále s tím rozdílem, že evropský šampionát přerostl do světového měřítko a dle mého názoru je velmi sympatické, že od začátku vzniku florbalu se respektuje důležitost nejvyšších soutěží pro obě pohlaví stejně.

### 2.2 Popularita

Člověk, který se o florbal nezajímá, tak se s teží bude zajímat o jeho nárůst popularity. Ovšem někdo, kdo fandí florbalu v jeho rozletu, neboť tento sport ho samotného velmi baví, tak si myslím, že zcela jistě by potvrdil zvýšení oblíbenosti

---

<sup>1</sup>Česká republika se k IFF připojila v roce 1993.

této hry u dětí, mládeže i dospělých. Florbalu značně nahrává to, že ho může hrát téměř kdokoliv. Je to sport nejen pro lidi všech věkových kategorií, pohlaví, ale také pro hendikepované s různými druhy tělesného postižení.

Dle mého názoru popularita florbalu vychází především ze vzhledného designu holí, neboť je to první věc, která člověka na této hře zaujme. Florbalová hůl připomíná všem dobře známou hokejovou hůl, ale i neodborník určitě tuší, že je to něco trochu odlišného. Florbalové hole jsou dosti pestrobarevné, skládají se z několika částí a jejich zevnějšek trochu vzbuzuje dojem hračky, avšak ve srovnání s dřívějšími „hračkami“, novodobý design holí posunul florbal ve všech ohledech na vyšší úroveň.

Postupem času tento sport získal vlastní styl oblékání, hra se stala rychlejší, dynamičtější, rozvinula se taktika hry a přibyli i výrobci florbalového vybavení, kteří se zejména u holí předhánějí v různých inovacích a technologiích. Důvodem, proč je florbal v posledních letech tak populárním a úspěšným sportem, není pouze samotná hra a líbivý design florbalového vybavení. Velkou zásluhu na tom má i finanční nenáročnost tohoto sportu. Jediné, co reálně člověk potřebuje k tomu, aby mohl vyběhnout s kamarády za barák hrát florbal, je hůl a míček. Oficiální soutěže se mohou pořádat v klasické univerzální školní tělocvičně, což je pro Českou republiku velkou výhodou, neboť je zde skvělé zázemí prostorů pro halové sporty.

Pro lepší představu, jak moc tento sport nabyl na oblibě, si lze prohlédnout v tab. 2.1 podle [8]. Když srovnáme florbal s badmintonem, tak mezinárodní federace badmintonu byla založena v roce 1934, zatímco IFF v roce 1986. Přesto, že florbal je tedy o 52 let mladším oficiálním sportem než badminton, tak je dle tab. 2.1 oblíbenější hrou.

Tabulka 2.1: Deset nejoblíbenějších sportů v České republice podle [8]

| Pořadí | Název sportu |
|--------|--------------|
| 1.     | Fotbal       |
| 2.     | Hokej        |
| 3.     | Lyžování     |
| 4.     | Cyklistika   |
| 5.     | Plavání      |
| 6.     | Tenis        |
| 7.     | Běh          |
| 8.     | Florbal      |
| 9.     | Badminton    |
| 10.    | Volejbal     |

## 3 | Florbalová hůl

V úvodu již bylo zmíněno, že florbalová hůl je klíčovým předmětem hráče k přemisťování míčku po hracím poli. Proto při jejím výběru hráč musí správně a uvážlivě zhodnotit svoje schopnosti a podle toho si vybrat hůl s takovými parametry, aby se jeho hráčské přednosti projeví naplno. Nejprve si ukažme z čeho je taková florbalová hůl složená.

### 3.1 Části hole

Jak lze vidět z obr. 3.1, tak jádro a zároveň největší část florbalové hole tvoří tyč, neboli *shaft*. Tyč je trubkou proměnného a většinou kruhového průřezu. Vyrábí se



Obrázek 3.1: Přehled částí florbalové hole

z vícevrstvých vláknových kompozitů, kde výstužnou funkci plní nejčastěji uhlíková vlákna a pojící epoxidová pryskyřice. Pro představu váha „lepších“ holí bez čepele, omotávky a špuntu se pohybuje okolo 100 g.

Dalším velmi důležitým komponentem je čepel, která se nachází na konci hole s menším průměrem. Je nasazená do drážek vyfrézovaných v holi a upevněná dvěma šroubky. Čepele se vyrábí z polymeru vstříkovaného do formy. Pro představu, váha klasické čepele se pohybuje okolo 70 g.

Omotávka je tenký proužek látky, který na jedné straně natřený lepidlem, aby se dal pevně namotat na hůl a na druhé straně proužku je protiskluzová pěna, která má za úkol sát pot z dlaní hráče a zamezit prokluzu jeho rukou při střele.

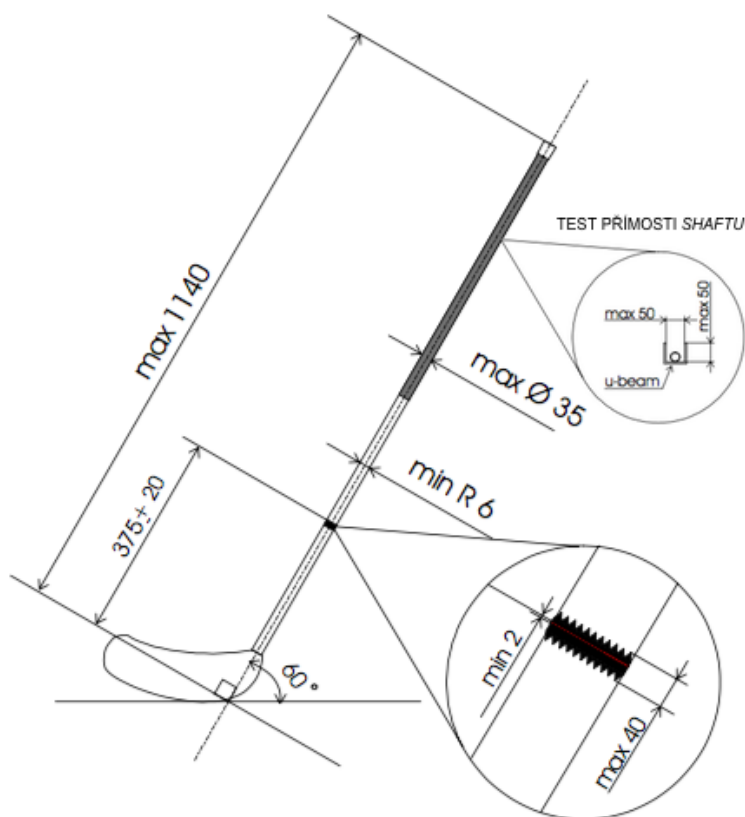
Špunt je schovaný pod omotávkou, a je „nastřelený“ na konci florbaluky s větším průměrem. Neboť samotná tyč je tenkostěnná trubka, tak špunt má hráči zabránit v kontaktu s ostrou hranou hole.

Florbalovou hůl lze rozebrat na části, které byly popsány výše a v případě jejich lomu, ošoupání či při ztrátě požadované tuhosti tzv. změknutí lze jakýkoliv komponent hole vyměnit. Při výměně komponentů by však měl hráč respektovat oficiální pravidla hry dle IFF [1]. V pravidlech je uvedena podmínka, že chce-li se

hráč účastnit oficiálních florbalových turnajů a zápasů, tak *shaft* a čepel musí být od stejného výrobce. Kombinace značek těchto částí není v souladu s pravidly [1].

## 3.2 Rozměry hole

Florbalovou hůl nedefinuje pouze její design nebo komponenty, ze kterých se musí skládat. Definice vyžaduje především konkrétní limitující vlastnosti hole, jako jsou například její rozměry, které lze vidět v jednotkách milimetrů na obr 3.2. Dalším



Obrázek 3.2: Požadavky na rozměry florbalové hole podle [1]

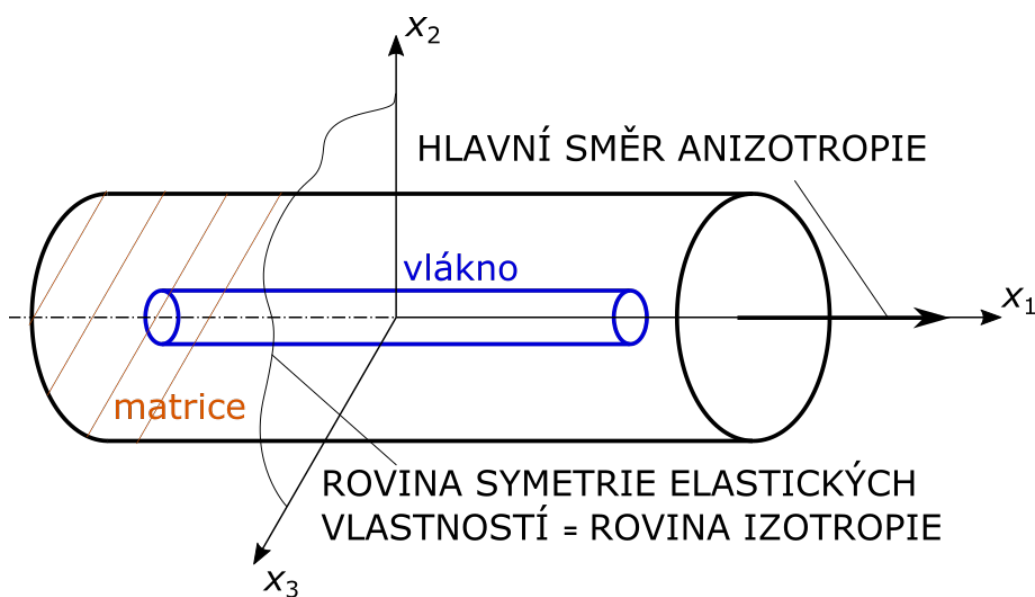
důležitým parametrem, který určuje definující vlastnosti florbalové hole, je její váha. Váha celé hole včetně omotávky nesmí překročit hodnotu 380 g [1].

## 3.3 Materiál hole

Jak už bylo zmíněno v kap. 3.1, florbalové hole se vyrábí z vícevrstevných dlouhoválnových kompozitů. Kompozit je materiál složený ze dvou nebo více chemicky a mechanicky odlišných látek, které dohromady mají lepší požadované mechanické vlastnosti. Základní rozdělení kompozitů je podle kombinace substancí, neboli látek

kterými jsou tvořeny. Hole se vyrábí z kompozitů tvořenými nejčastěji uhlíkovými vlákny a epoxidovou pryskřicí. Takové kompozity se řadí do první skupiny těchto materiálů, která je v technické praxi nejpoužívanější a pro tuto práci bude klíčová.

Výsledné mechanické vlastnosti materiálu vyrobené hole jsou potom dány uhlíkovými vlákny plnící výztužnou funkci a ztuhlou pryskřicí, která tvoří tzv. matici vyplňující prostor mezi vlákny a držící požadovaný tvar. O takto zhotovených kompozitech říkáme, že jsou to materiály příčně izotropní. Jedná se o materiál jehož rovina symetrie elastických vlastností je rovinou izotropie, tzn. elastické vlastnosti v této rovině jsou ve všech směrech stejné [5]. Na obr. 3.6 je znázorněn případ příčně izotropního materiálu s rovinou izotropie  $x_2 x_3$ .



Obrázek 3.3: Příčně izotropní materiál s rovinou izotropie  $x_2 x_3$

### 3.4 Technika střely

Nyní, kdy už víme, z čeho se florbalová hůl skládá, jaké jsou její rozměry a jakým materiálem je tvořena, tak představa o ní, je rázem jednoznačnější. Dále by přirozeně mělo následovat dělení holí na základní druhy a jejich technologie. Udělejme si ale před tím představu o tom, jak se s nimi střílí. Pro tuto práci je pojem o technice střely velmi důležitý, jelikož nejenže se od ní odvíjí aplikace vhodné technologie na správný typ hole, ale jedním z cílů je také navrhnout rozložení tuhosti podél florbalové hole tak, aby střela s ní byla co nejefektivnější. Popišme si tedy dále dvě základní techniky, jak střílet s florbalovou holí.

### 3.4.1 Střela tahem

Střela tahem nebo tzv. tahák je velmi dynamický a náročný typ střely na techniku hráče, jelikož se nejčastěji provádí za běhu. Jednoduchá verze střely tahem je taková, že hráč stojí na místě bokem k brankáři a pouze tažením vede míček okolo svého těla až do chvíle, kdy balónek vylétne požadovaným směrem z čepele. Složitější varianta je rozšíření předchozí verze ovšem střela, jak bylo zmíněno výše, se provádí za běhu. Tahák je pro gólmana velmi nepříjemný, neboť míček před výstřelem často začne rotovat a po výstřelu letí obloukem i v rovině rovnoběžné s podlahou. Pro představu je na obr. 3.4 znázorněná střela tahem za běhu.



Obrázek 3.4: Technika střely tahem dle [6]

### 3.4.2 Střela příklepem

Dle mého názoru je střela příklepem tvrdší nežli střela tahem. Tvrdost střely určuje počáteční rychlost míčku po kontaktu s čepele. Pokud má hráč kolem sebe místo a čas, aby se na krátký okamžik zastavil, tak spíše volí střelu příklepem. Tato střela se provádí tak, že hráč napřáhne hůl směrem od míčku a poté se jej snaží s co nejrychlejším zpětným máchnutím vystřelit takovým způsobem, že těsně před tím než čepele přijde do kontaktu s míčkem, hráč ohne florbalovou hůl o podlahu.

Ohybem se do hole naakumuluje energie, která při snaze vrátit tyč do původního stavu se předá balónku ve formě kinetické energie. Na výslednou rychlost míčku má tedy vliv zpětné máchnutí hole a množství naakumulované energie od ohybu hole. Na obr. 3.4 lze vidět okamžik krátce před kontaktem míčku s čepelí při příklepu, kde je hůl ukázkově prohnutá.



Obrázek 3.5: Technika střely příklepem dle [2]

### 3.5 Typy holí a jejich technologie

Každý člověk je unikátní jednotka. Někdo je nadaný na cizí jazyky a někdo jiný zase má talent řešit problémy technického rázu. Podobně je tomu tak i ve florbale. Nějaký hráč může umět velmi dobře střílet na bránu, ale nemusí mít tak šikovné ruce na to, aby mohl kličkovat mezi soupeři. Odpověď na otázku, proč tomu tak je, není důležitá a pokud chce někdo hrát jakýkoliv sport, tak jednoduše musí akceptovat limity svých schopností. Stejně tak je tomu v případě, kdy se každému hráči hraje lépe s jiným typem florbalové hole. Není důležité z jakého důvodu to tak je, ale je třeba přijmout realitu a střizlivě naslouchat svým pocitům. Proto si ukážeme rozdělení holí na dva základní typy. Uvedeme si i technologie, které se používají u daného typu. Pro tuto práci byly vybrány především ty technologie,



kteře jsou osvědčené hráči a k vylepšení svých výrobků je používá více florbalových značek. Většinou půjde o tvarové změny hole, jejichž design se velmi dobře a relativně draho prodává.

### 3.5.1 Rovný tvar tyče

Základní rozdělení florbalových holí se určuje podle tvaru tyče. Prvním druhem je rovný tvar, který lze vidět na obr. 3.1. Myslím si, že je to nejpoužívanější typ holí, kterému hráči důvěřují, jelikož spoustu z nich tuší, že je důležitější mít šikvné ruce místo předražené hole s atraktivním tvarem.

Na trhu s florbalovými holemi, byl tento typ tyčí přirozeně prvním, který se začal prodávat. Málokdo by čekal, že postupem času se i rovné hole dočkají různých zdokonalení, které hráčům opravdu pozitivně přispějí k zlepšení jejich schopností nebo jim zpřijemní hru. Ukažme si tedy ty nejpoužívanější vylepšení florbalových holí s rovným tvarem tyče.

#### Raw Concept

Tato technologie má mnoho pojmenování, jelikož každý výrobce pro ni má svůj vlastní název. Pro označení tohoto vylepšení se používá např.: *TourLite*, *Superlight*, nebo *Top Light*. Všechny tyto názvy označují jednu a tu samou technologii, jejíž princip spočívá ve snížení váhy hole tím, že se použije kompozit složený z vrstev, které jsou tenčí než u běžných holí. Dle mého soudu je toto pravděpodobně nejsmysluplnější vylepšení *shaftu*, které může hráč používat, jelikož díky nižší váze hole se člověku méně unaví ruce během zápasu a umožní mu rychleji manipulovat s míčkem. Scela jistě je tato technologie vhodná i pro všechny typy střel. Nejlehčí hole na světě vyrábí značka Fat Pipe, která je prodává pod označením Raw Concept. Tyto florbaloky při délce (bez čepele) 96 cm važí podle [3] 177 g.

#### Oval

Technologie oval, která se osvědčila u holí s rovným tvarem *shaftu*, je opět známá pod různými názvy jako např.: *OvalFusion*, *G-oval*, nebo *Sweoval*. S tímto vylepšením koncový průřez florbalové hole s větším průměrem, kterému se říká rukojeť, má tvar elipsy. Díky oválovitému tvaru rukojeti má hráč lepší přehled o natočení čepele a pomáhá mu udržet florbalok ve správné poloze při střele a manipulaci s míčkem, proto je určitě tato technologie vhodná jak pro střelu tahem, tak i pro příklepový typ střely. Zhruba v oblasti poloviny hole přechází tento tvar průřezu z elipsy do kruhu. Tohoto přechodu se využívá z praktických důvodů, aby se na hole s touto technologií mohla nasadit většina čepelí.

## Hockey

*Oval* však není jedinou novinkou v tvarování průřezu rovných tyčí. Mnoho lidí, kteří rádi střílí příklepem, s oblibou hrají s holemi, u kterých se využívá technologie *Hockey*, *Square*, nebo *Beat*. Tyto technologie označují takové florbalčky, které vzhledově připomínají všem dobře známe hokejové hole. Potom je někdy nutné mít i čepele s atypickou násadou, neboť v tomto případě má *shaft* po celé své délce hokejový profil, ale není tomu tak vždy. Ve spodní části obrázku 3.5 lze vidět běžný tvar rukojeti florbalové hole v porovnání s typem *Hockey* a *Oval*.



Obrázek 3.6: Přehled tvarů rukojetí *Oval* a *Hockey* v porovnání s běžným tvarem

### 3.5.2 Zakřivený tvar tyče

Jednu skupinu tedy tvoří florbalové hole, jejichž tvar *shaftu* je přímý. Do druhé skupiny se řadí hole, jejichž tvar tyče je určitým způsobem zakřivený. Tyto tvarové změny *shaftu* jsou na pohled velmi zajímavé a v moderním florbalu nepůsobí nijak přehnaně nebo amatérsky jako dříve. Naopak s tímto druhem florbalek hraje spoustu hráčů i v nejvyšších soutěžích tohoto sportu, což budí dojem, že tyto technologie pozitivně přispívají k požadovaným mechanickým vlastnostem hole.

S příchodem tohoto typu florbalových holí se s nima na trhu doslova roztrhl pytel, což mělo značný vliv na marketing firem zaměřujících se na florbal. Dle mého názoru se díky tomuto typu *shaftu* také zvětšilo spektrum možností při hře a tento sport celkově nabyl alespoň jednou tolik na atraktivitě z pohledu nejen hráče, ale i diváka. Ukažme si proto jednotlivé nejpoužívanější technologie, které přišly se zakřiveným tvarem tyče ve snaze podpořit a zlepšit hráčské dovednosti.

## KickZone

*KickZone* je mezi hráči velmi oblíbenou tvarovou technologií florbalové hole, jež je zvýrazněná konvexní růžovou křivkou na obr. 3.7. Oblast *KickZone* se nachází ve



Obrázek 3.7: Zvýraznění oblasti technologie KickZone

spodní části hole v blízkosti čepele. Tuto technologii využívají především ti hráči, kteří střílejí příklepovým stylem. Jejím účelem je zvýšit průhyb při střele a tedy svižněji vymrštít míček po kontaktu s čepelí, aby jeho počáteční rychlost a dolet byly větší. Rychlost míčku určuje tzv. tvrdost střely a jistě každý florbalista se snaží vyvinout tak tvrdou střelu, jak jen dokáže, neboť to mu umožňuje střílet z větší vzdálenosti a gólmanovi dává menší šanci chytit míček, což je žádoucí.

Technologii *KickZone* vyvinul výrobce Salming, který díky ní mezi hráči značně nabył na oblibě. Pro podporu zvýšení vykopnutí míčku z čepele, firma Salming využívá v kombinaci s *KickZone* technologii, kterou nazívá *X-Shaft*. Technologie *X-Shaft* nemění tvar florbalové hole, přesto nebyla zmíněná u rovného typu holí, jelikož se nevyužívá osamotě na rovné tyči. Oblast, kde se nachází, je přibližně uprostřed hole vždy nad úrovní *KickZone* a je zvýrazněná písmenem „X“, jak lze vidět na obr. 3.8. Technologie *X-Shaft* má zajišťovat vyšší tuhost v horní části hole a tím změnit charakter jejího ohybu při střele pro zvýšení účinku *KickZone*.



Obrázek 3.8: Florbalová hůl s technologií *KickZone* v kombinaci s *X-Shaft*

## Curve

Druhou populární tvarovou technologií, jenž se uchytila na trhu s florbalovými holemi, je technologie *Curve*, která je zvýrazněná světle modrou křivkou na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9: Zvýraznění oblasti technologie Curve

Jak sám název napovídá, jedná se o zakřivení tyče. Hůl je zakřivená po celé své délce kromě rukojeti. Technologie *Curve* má být užitečná především při střelbě tahem, kdy někteří hráči mají problém tzv. zvednout míček (vystřelit balónek výše), jelikož tento typ střely je poměrně náročný na techniku. Princip této technologie spočívá v tom, že díky zakřivení hole svírá čepel se zemí příznivější úhel pro vystřelení míčku výše a není tak nutné pro tento efekt formovat čepel, neboť tvar čepele značně ovlivňuje kontrolu nad balónkem a manipulaci s ním.

## 3.6 Experimentální stanovení ohybové tuhosti

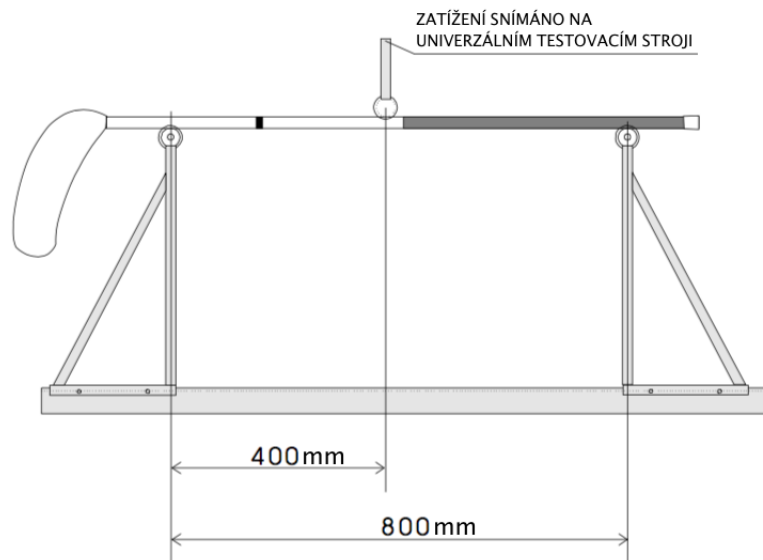
Aby se hráč mohl účastnit oficiálních soutěží ve florbale, musí mít certifikovanou hůl. Oblečení už lze mít stejné jako na kterýkoliv jiný halový sport, ale florbaluku si musí hráč pořídit už lepší než na pouhé pinkání venku s kamarády. Florbalová hůl spolu s ostatním vybavením pro tento sport musí splňovat spoustu různých parametrů a kritérií podle [1]. Jeden z parametrů, který musí být o tyči znám je její ohybová tuhost – tzv. *flex*.

*Flex* je jeden z klíčových parametrů, podle kterého si hráč vybírá svou hůl. Je to údaj, který by měl odpovídat schopnostem a silám hráče, jelikož v případě, že florbalista precenní své síly a bude mít *shaft* s vyšším *flexem*, tak při střele příklepem neohne hůl dostatečně na to, aby s ní efektivně vystřelil. V případě, že si hráč vybere tyč s menší ohybovou tuhostí než potřebuje, tak hůl se při střele ohne natolik, že střela s ní bude opět neuspokojivá, nebo v horším případě se hůl zlomí. Proto při volbě *flexu* musí hráč uvážlivě a střízlivě zhodnotit svoje síly, aby později nelitoval toho, že s danou florbalukou nemůže vystřelit tak, jak by si představoval.

Ohybová tuhost tyče se stanovuje experimentálně. Tato zkouška je definovaná v IFF regulacích [1] pro hole od délky 650 mm do 849 mm (*Shaft Rigidity Method B*), které jsou určené pro děti a potom pro hole od délky 850 mm a více (*Shaft*

*Rigidity Method A*), které jsou určeny pro dospělé. Pro tuto práci bude klíčové především určení ohybové tuhosti *shaftu* pomocí metody (typu) A pro seniorské hole, proto si vysvětlíme, jak tato certifikační ohybová zkouška vypadá.

*Flex* se určuje z certifikační zkoušky tříbodovým ohybem, jak lze vidět na obr. 3.10. Jeho velikost je průměrná hodnota průhybů brána ze tří stejných holí, kdy



Obrázek 3.10: Certifikační zkouška po určení *flexu* florbalové hole typu A podle [1]

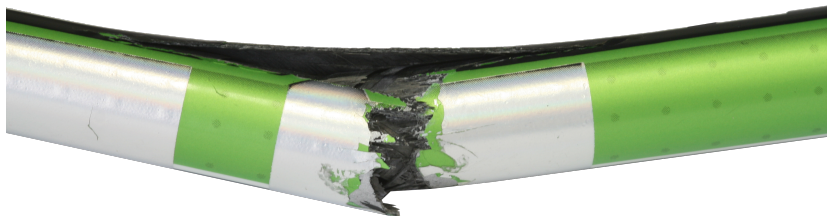
pro každou je odečten průhyb jednou ve vertikálním a jednou horizontálním směru (celkem 6 hodnot), při síle  $F_z = 300$  N působící uprostřed hole a vzdálenosti podpor  $l_A = 800$  mm. Dle regulací [1] by hodnota *flexu* měla být nejméně 23 mm s tím, že žádná individuální hodnota průhybu nesmí být v nejtuzší oblasti hole menší než 17 mm. Tyč by měla být schopna průhybu  $v_A = 60$  mm bez jakéhokoliv porušení v nejméně tuhé oblasti *shaftu* s tím, že po zkoušce (po uvolnění zatežující síly) by deformace hole neměla v místě největšího průhybu překročit 6 mm. Běžné hodnoty *flexu* se pohybují od 23 mm do 32 mm.

### 3.6.1 Ověření korektního provedení certifikační zkoušky

V rámci této práce byla ověřena správnost provedení ohybové certifikační zkoušky pro určení *flexu* florbalové hole dle IFF regulací [1]. Toto ověření bylo provedeno na několika holích s tím, že všechny byly už určitým způsobem poškozené, vyřazené z provozu a se souhlasem vlastníků ponechány výzkumným účelům.

Nejprve byla ověřována průhybová zkouška pomocí metody B pro kratší hole. Pro ověření správnosti postupu tohoto experimentu bylo vybráno pevnostní kritérium dle [1], kdy testovaná tyč by měla vydržet průhyb  $v_B = 30$  mm bez jakéhokoliv

porušení na podporách vzdálených od sebe o hodnotu  $l_B = 600$  mm. Tento pevnostní test byl proveden na zelené holi značky Salming, která byla ve své spodní části (oblasti čepele) značně poškozená, jak lze vidět na obr. 3.11. Hůl byla zlo-



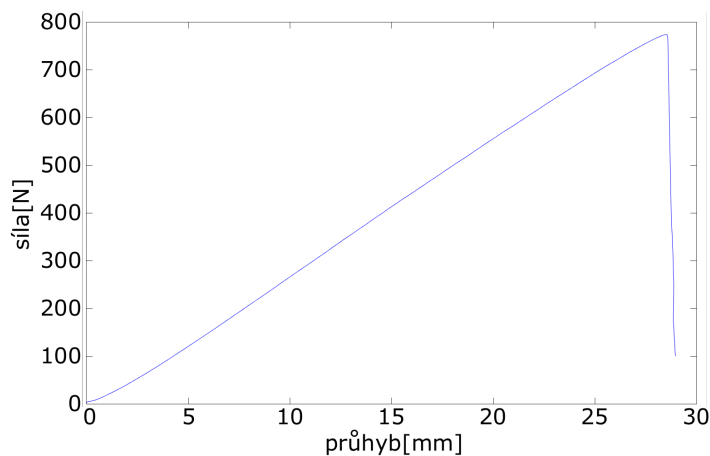
Obrázek 3.11: Snímek porušení *shaftu* zelené florbalové hole Salming

mena po natlačení hráče na mantinel. Tato tyč pevnostní kritérium dle metody B nevydržela a v místě, kde působila zatěžující síla, praskla. Místo porušení si lze prohlédnout na obr. 3.12, kde je zvýrazněné červeným kolečkem. Příčina nevy-



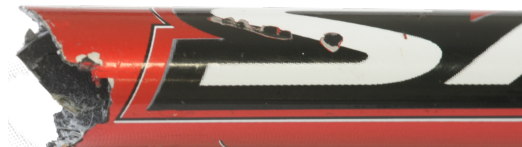
Obrázek 3.12: Místo lomu zelené florbalové hole Salming

hovění testované hole byla pravděpodobně dána rozsáhlou delaminací kompozitu. K lomu došlo při zatížení 774 N a průhybu 28,9 mm. Na obr. 3.13 lze vidět průběh průhybu *shaftu* v závislosti na zatežující síle.



Obrázek 3.13: Průběh průhybu zelené hole Salming v závislosti na zatěžující síle

Poté byla pro ověření správnosti provedení certifikační průhybové zkoušky typu B vybrána další hůl (opět značky Salming), ovšem její porušení v oblasti čepele bylo podstatně menší než-li u zelené florbaluky viz obr. 3.14. Tato tyč pevnostní



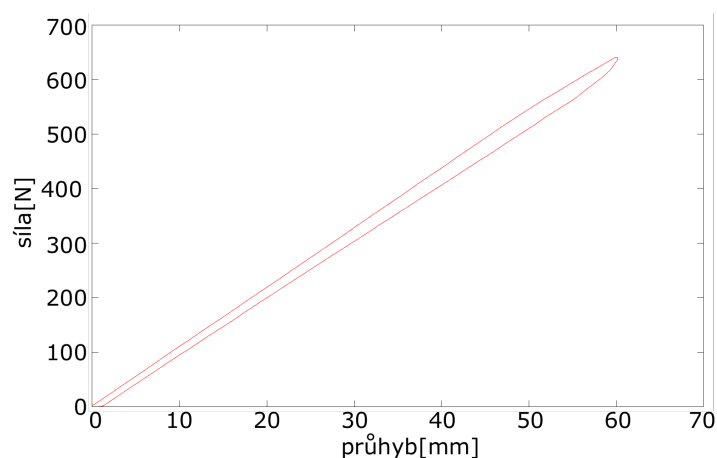
Obrázek 3.14: Snímek porušení *shaftu* červené florbalové hole Salming

kritérium dle metody B vydržela, proto se přistoupilo k pevnostnímu kritériu dle metody A, kde by testovaný *shaft* měl vydržet průhyb alespoň  $v_A = 60$  mm bez jakéhokoliv porušení, jak už bylo dříve zmíněno. Na obr. 3.15 si lze prohlédnout



Obrázek 3.15: Červená hůl Salming při průhybu 60 mm

červenou florbalovou hůl Salming v poloze při maximálním požadovaném průhybu pro certifikační ohybovou zkoušku typu A dle [1], která při experimentu vyhověla. Na obr. 3.16 lze vidět průběh průhybu *shaftu* v závislosti na zatěžující síle. Díky



Obrázek 3.16: Průběh průhybu červené hole Salming v závislosti na zatěžující síle



tomuto experimentu byl navíc ověřen i postup pro stanovení *flexu* tyče, neboť z výše uvedeného průběhu byla při zatěžující síle  $F_z = 300$  N odečtena hodnota průhybu 27,4 mm, což je běžná ohybová tuhost florbalových hůl.

### 3.7 Důležité parametry hole

Z celé této kapitoly vyplývá takový drobný, ale významný závěr. Nejenže bylo vysvětleno a objasněno, co je to florbalová hůl, ale byl kladen důraz i na relevantní parametry a vlastnosti hole, které hráče nejvíce zajímají a mají značný vliv na jeho výsledné schopnosti při hře. Důležitými údaji o holi jsou například jeho geometrické vlastnosti resp. délka nebo průměr tyče (který výrobci ani neudávají, ale pro úchop *shaftu* je podstatný), váha hole<sup>1</sup>, její tuhost nebo-li *flex*, typ *shaftu* a technologie, které jsou na něm použity. Ovšem za zmínku stojí určitě i ceny florbalových hůl, neboť dnes si lze koupit kus za 5000 korun českých, což dle mého názoru je dost na to, aby se někdo zabýval tím, zda-li technologie, díky kterým jsou určité hole tak drahé, jsou za tu cenu i dostatečně užitečné a kvalitní. V tabulce 3.1 si lze prohlédnout konkrétní vyčíslení a pojmenování důležitých parametrů hole podle [4], které hráče nejvíce zajímají při jejím výběru.

Tabulka 3.1: Důležité parametry hole podle [4]

| Parametr    | Hodnota / Název   | Jednotky |
|-------------|---|----------|
| Délka       | 55 – 105  | [cm]     |
| Tuhost      | 23 – 36   | [mm]     |
| Váha        | 177 – 270 (a více)  | [g]      |
| Typ         | Rovný / Zakřivený   | [-]      |
| Cena        | 399 – 5199  | [Kč]     |
| Technologie | Raw Concept<br>Oval<br>Hockey<br>KickZone<br>Curve<br>X-Shaft | [-]      |
| Značka      | Salming<br>Unihoc<br>Zone<br>Fatpipe<br>Oxdog<br>Exel         | [-]      |

<sup>1</sup>váha florbalové hole se bere včetně čepele a omotávky.



# 4 | Numerický model

Již v úvodu byly nastíněny výhody využití výpočtové techniky, díky které lze, za pomoci sofistikovaných numerických metod, simulovat reálné fyzikální procesy a experimenty. Toto počítačové modelování spočívá v sestavení matematického modelu (*preprocessing*), provedení jeho numerického řešení (*solving*) a následné vizualizace výsledků (*postprocessing*). K tomuto postupu se používají rozsáhlé výpočetní balíky, které využívají například metodu konečných prvků (známou pod zkratkou MKP). Jedná se o přibližnou numerickou metodu, jejíž podstata spočívá v prostorové diskretizaci zkoumaného objektu na konečný počet prvků (elementů), čímž vznikne tzv. konečnoprvková síť. Výhodou MKP je, že tyto elementy mohou mít rozdílnou velikost a vlastnosti, proto rozlišujeme i různé typy prvků.

## 4.1 Model ohybové certifikační zkoušky

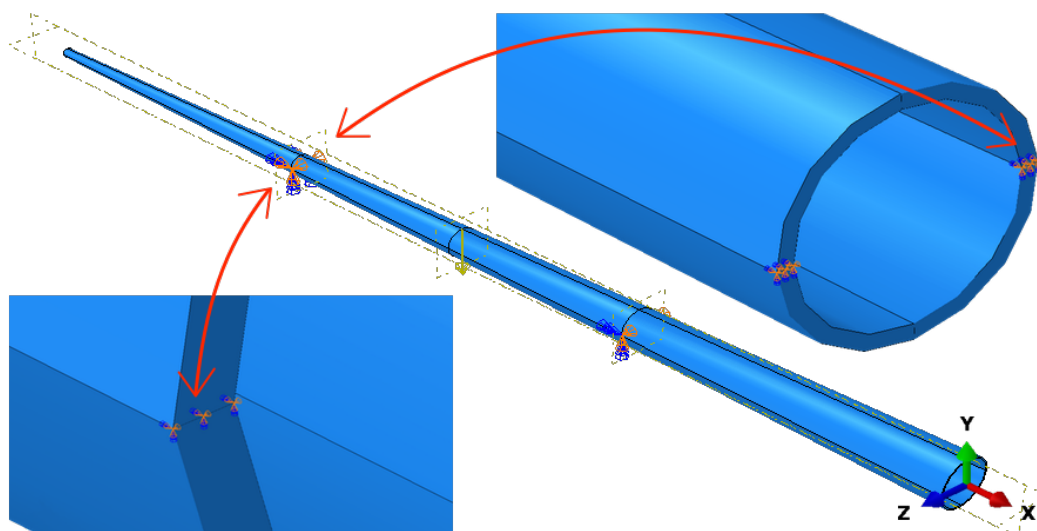
Jedním z cílů této práce bylo vytvořit numerický model certifikační ohybové zkoušky florbalové hole a validovat jej pomocí experimentu. Model certifikační ohybové zkoušky byl vytvořen pro určení *flexu* hole tříbodovým ohybem pomocí metody A dle regulací IFF [1]. Pro opakovatelné sestavení modelu se zvolenými parametry byl pro výpočtový systém *Abaqus* vytvořen parametrický skript pomocí programovacího jazyka *Python*. Tento skript umožňuje sestavit model kompozitové trubky s proměnným kruhovým průřezem na obou koncích o konstantní tloušťce, kde volenými parametry jsou oba koncové průměry, délka trubky, tloušťka a úhel natočení vláken jednotlivých vrstev laminátu, velikost prvku v podélném směru trubky, počet prvků na průřezu, zatěžující síla a materiálové údaje trubky. Skript byl přizpůsoben i na změnu vzdálenosti podpor, která se liší v závislosti na zvolené metodě testování ohybové tuhosti hole. Tato práce však byla zaměřena na ohybovou certifikační zkoušku pouze typu A, proto parametr vzdálenosti podpor byl brán v úvahu jako neměnný s hodnotou  $l_A = 800$  mm.

Při vytváření modelu skořepinovými (*shell*) prvky a prostorovými (*solid*) prvky byly nakonec pro trubku zvoleny osmi uzlové prvky typu *solid*. Materiál byl zadáván pomocí *layup*, tudíž volené prvky byly vícevrstvé.

Díky pomocným rovinám, které jsou znázorněné žlutou čerchovanou čarou na obr. 4.1, byla kompozitová trubka rozdělena na několik částí, čímž v modelu vznikly nejen podélné hrany, ale i příčné, skrze jeho tloušťku. Na čtyři horizontálně příčné hrany byly zadány okrajové podmínky, jak si lze prohlédnout s jejich detailními snímky v řezu trubky na obr. 4.1, kdy na dvou z nich, které jsou blíže menšímu

průměru, byly odebrány všechny stupně volnosti kromě natočení okolo osy  $z$ . Na zbylých dvou hranách byly odebrány všechny stupně volnosti kromě natočení okolo osy  $z$  a posuvů ve směru osy  $x$  (v podélném směru trubky).

Zatěžující síla byla reprezentována osamělou silou působící v uzlu proti kladnému směru osy  $y$  uprostřed trubky na jejím vnějším průměru, jak je uvedeno na obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Zatěžující osamělá síla a okrajové podmínky kompozitové trubky s detailními snímky řezu v místě jejich zadání

### 4.1.1 Validace modelu experimentem

Vytvořený parametrický model, byl verifikován experimentem třibodové ohybové zkoušky tenkostěnné trubky konstantního průřezu s danými geometrickými a materiálovými vlastnostmi laminy. Tyto údaje byly ve skriptu vstupními parametry modelu, jak lze vyčíst na další straně z obr. 4.2, kdy materiálové údaje laminy byly za pomoci analytických vztahů dle [5] přepočteny na materiálové vlastnosti laminátu.

Cílem této verifikace bylo ověřit správnost sestavení modelu a naladit jeho parametry sítě tak, aby chyba průhybu modelu od experimentu při dané zatěžující síle byla, pokud možno, co nejmenší. Testovanými parametry sítě konečnoprvkového modelu, znázorněného na obr. 4.3, byly velikost prvku v podélném směru trubky a počet prvků na průřezu.

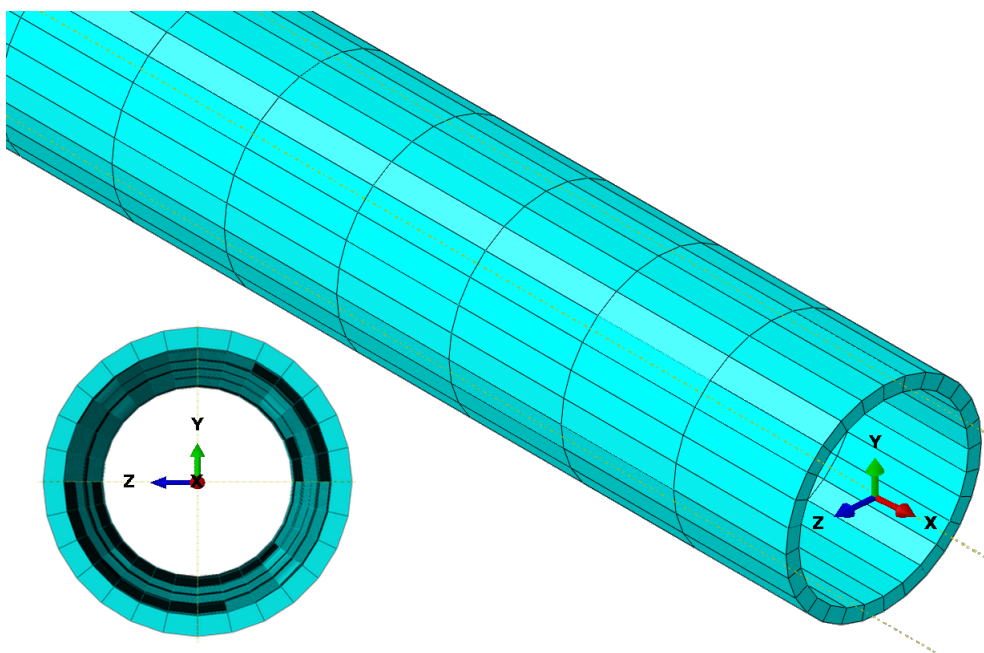
Hodnota průhybu modelu byla brána z referenčního uzlu, který byl vytvořen přímo pod zatěžující silou na druhé straně vnějšího průměru trubky. Výsledné

velikosti průhybů modelu byly porovnávány se zjištěnou hodnotou z experimentu, která byla -10,0111 mm při zatěžující síle 345 N, vzdálenosti podpór  $l_A = 800$  mm

```
'''PARAMETRIZACE - nastavitelne parametry'''
small_diameter = 40e-3 # [m] levý vnitřní průměr
big_diameter   = 40e-3 # [m] pravý vnitřní průměr
stick_length   = 2100e-3 # [m] délka hole
lay_thickness   = [0.504e-3, 0.496e-3] # [m] vektor tloustek jednotlivých vrstev
lay_angle      = [44.16, -44.87] # [°] vektor uhlu natočení jednotlivých vrstev
concentrated_force = 345 # [N] zatěžující síla
global_mesh_size = 14e-3 # [m] velikost jednoho prvku v podélném směru hole
num_of_edge_el = 7 # [n] počet elementu na 1/4 průřezu hole
E_f            = 620e9 # [Pa] modul pružnosti vláken
V_f            = 0.49 # [-] objemový podíl vláken
nu_f           = 0.33 # [-] poissonovo číslo vláken
E_m            = 3.45e9 # [Pa] modul pružnosti matrice
nu_m           = 0.3 # [-] poissonovo číslo matrice
```

Obrázek 4.2: Vstupní parametry modelu ve skriptu

a jejich průměru  $d_p = 30$  mm. Při analýze vlivu testovaných parametrů sítě na průhyb kompozitové trubky bylo dosaženo nejmenší chyby modelu od experimentu při testu, kdy její hodnota byla 0,4 %. Při takto malé chybě byl model složen celkově z 4200 prvků typu *solid*.



Obrázek 4.3: Konečnoprvkový model testovací trubky

#### 4.1.2 Vliv skladby vláken a počtu vrstev na průhyb modelu

Numerický model pro stanovení ohybové tuhosti florbalové hole, který byl verifikován experimentem s chybou 0,4 %, byl využit k analýze vlivu natočení vláken

v jednotlivých vrstvách kompozitu a počtu těchto vrstev na výsledný průhyb. Tato analýza byla provedena na modelu kompozitové trubky, jejíž délka a vnitřní průměry na obou koncích vycházely z reálné florbalové hole. Jednalo se o florbaluku značky *Unihoc* s danými geometrickými vlastnostmi, jako byla délka tyče  $l_u = 960$  mm, vnitřní průměr  $d_1 = 15,75$  mm na jednom konci a vnitřní průměr  $d_2 = 22,49$  mm na druhém konci, které se staly výchozími rozměrovými parametry pro model.

K výchozím geometrickým vlastnostem hole byl zvolen materiál kompozitu s tloušťkou jedné vrstvy laminátu  $t_v = 0,29$  mm. Takto vytvořený model kompozitové trubky s nekonstantním průřezem byl podroben analýze vlivu jeho skladby pro vyvážený a symetrický laminát, z důvodu vyloučení přídavných namáhání materiálu, jež jsou spojeny s pořadím vrstev v kompozitu viz [5]. Cílem bylo sestavit takovou skladbu, aby *flex* vytvořeného modelu se věrně podobal ohybové tuhosti vzorové hole *Unihoc*, která činí 26 mm. Z uvedených skladeb v tab. 4.1 bylo dosta-

Tabulka 4.1: Vliv skladby vláken a počtu vrstev na průhyb hole

| Skladba č. | Vrstvy [°] |     |     |    |     |     |     |    | Průhyb [mm] |
|------------|------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-------------|
|            | 1          | 2   | 3   | 4  | 5   | 6   | 7   | 8  |             |
| 1          | -45        | 45  | 90  | 90 | 45  | -45 |     |    | -19,38      |
| 2          | -45        | 45  | 0   | 0  | 45  | -45 |     |    | -8,35       |
| 3          | -45        | 45  | 0   | 45 | -45 |     |     |    | -14,96      |
| 4          | -50        | 50  | 90  | 90 | 50  | -50 |     |    | -25,76      |
| 5          | 90         | -50 | 50  | 90 | 90  | 50  | -50 | 90 | -19,15      |
| 6          | -55        | 55  | 90  | 90 | 55  | -55 |     |    | -33,56      |
| 7          | 90         | -55 | 55  | 55 | -55 | 90  |     |    | -33,37      |
| 8          | 90         | 90  | -60 | 60 | 60  | -60 | 90  | 90 | 30,33       |
| 9          | 90         | 90  | -57 | 57 | 57  | -57 | 90  | 90 | 26,74       |

ženo nejlepšího požadovaného výsledku ohybové tuhosti u laminátu číslo 9 s *flexem* daného uspořádání vrstev kompozitu 26,74 mm.

Z této skladby tedy plyne, že celková tloušťka  $t_c$  vytvořeného numerického modelu, spočtena jako tloušťka jedné vrstvy ( $t_v = 0,29$  mm) přenásobená jejich celkovým počtem v laminátu, vychází 2,32 mm. Tímto byly zjištěny všechny potřebné parametry florbalové hole (geometrické a materiálové) pro její potenciální výrobu a další práci, které vycházely ze vzorové hole *Unihoc* s využitím zvolených materiálových vlastností hole.

V rámci této práce byly pořízeny mikroskopické snímky<sup>1</sup> porušených florbalových holí viz obr. 4.4, za účelem získat konkrétnější představu o skladbě laminátu. Snímky 1 a 4 pozorovatele vizuálně svádí k myšlence, že na těchto tyčích byly pou-

<sup>1</sup>Snímky 1 a 3 jsou fotografie stejné hole (zelená Salming), přičemž snímky 2 a 4 nikoliv.



žity skladby s natočením vláken pod úhly  $0^\circ$  a  $45^\circ$ . Ovšem z dosažených výsledků v tabulce 4.1 byla při zvoleném materiálu prokázána nevhodnost použití skladeb s orientací vláken pod úhlem  $0^\circ$  a navíc ze zmíněných snímků je velmi obtížné od pohledu určit, zda-li se jedná o natočení vláken pod  $45^\circ$  a nebo vyhovujícími  $57^\circ$  ze skladby č. 9. Stejně tak je tomu s počtem vrstev kompozitu, kdy kvůli rozsáhlé delaminaci materiálu, ze snímků 2 a 3 na obr. 4.4 nelze jednoznačně stanovit množství lamin.



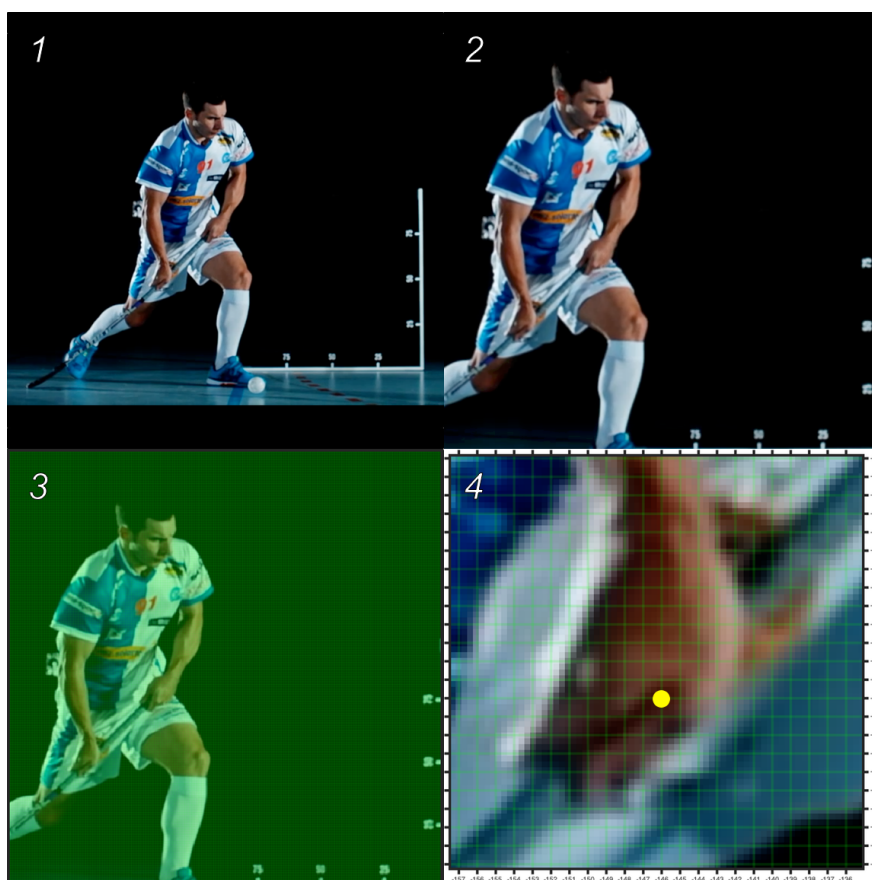
Obrázek 4.4: Mikroskopické snímky kompozitního materiálu porušených florbalových holí

## 4.2 Model pro simulaci střely

Dalším cílem této práce bylo navrhnout tuhosti jednotlivých částí florbalové hole, tak aby střela s ní byla co nejefektivnější. Zmíněnými částmi hole byly myšleny jednotlivé úseky, na které byla tyč rozdělena, vyjma držadla, což je segment *shaftu* mezi dvěma body, kde je florbaluka uchycena rukama hráče.

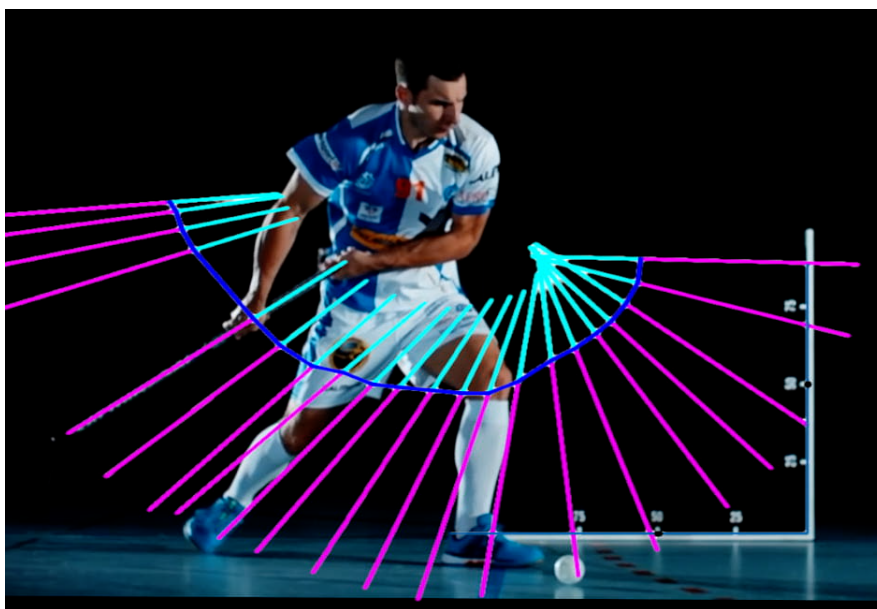
Aby bylo možné posuzovat efektivity střely (rychlost míčku po jeho vystřelení) v závislosti na rozložení tuhosti hole po částech, tak byl pro výpočtový systém *Abaqus* vytvořen parametrický skript pomocí programovacího jazyka *Python*, který umožňuje sestavit model explicitní úlohy pro simulaci střely florbalovou holí se zvolenými parametry jednotlivých součástí modelu, jež byly: tyč, čepel, podlaha a míček. Všechny díly sestavy byly vytvářeny pomocí prvků typu nosník (*beam*), kdy vzájemné působení mezi nimi bylo ve výpočtovém programu *Abaqus* zadefinováno typem interakce *general contact* s uvažováním normálových (*normal behavior*) a tangenciálních (*tangential behavior*) složek navzájem působících sil, kde hodnota koeficientu tření  $f_t$  byla zvolena 0,3. Ovšem čepel s tyčí byly v bodě navzájem pevně spoutány typem svázání *coupling*.

Ovšem předtím, než se přistoupilo k modelaci, bylo potřeba nadefinovat pohyb, který by reprezentoval příklepovou střelu s florbalovou holí. Tento pohyb byl zadán s využitím bodů držadla hole, které byly odečteny z video nahrávky [7] díky mřížkované síti vytvořené ve výpočtovém programu *Matlab*. Postup při získávání souřadnic si lze prohlédnout na obr. 4.5, na jehož snímcích 1 až 4 je znázorněn jeden



Obrázek 4.5: Postup získávání souřadnic bodů držadla florbalové hole pro nadefinování pohybu střely

a ten samý časový krok z videa, kde postupně byly po oříznutí (snímek 2), namířkování (snímek 3) a přiblížení (snímek 4) vyčteny souřadnice bodů držadla ve 21 zvolených časových krocích video záznamu. Pomocí získaných diskretních bodů byly dopočteny výsledné polohy hole popisující její pohyb při střele příklepem dle [7]. Tyto polohy byly dány body spodního konce držadla a úhly natočení okolo těchto bodů, jež jsou znázorněné na obr. 4.6. Modré úsečky představují lineární proložení dráhy mezi diskretními body polohy spodního úchopu hole a světle modré úsečky (držadlo) spolu s fialovými reprezentují umístění *shaftu* v souřadnicovém systému videa ve všech zvolených časových krocích. Jak lze vidět opět na obr. 4.6, poloha hole v daném časovém kroce se velmi věrně shoduje s nahrávkou. Z toho důvodu, že toto porovnání s video záznamem [7] platilo i pro lineárně proloženou trajektorii bodu uchycení hole spodní rukou hráče, tak byl takto nadefinovaný pohyb florbalové hole uznán za dostačující.

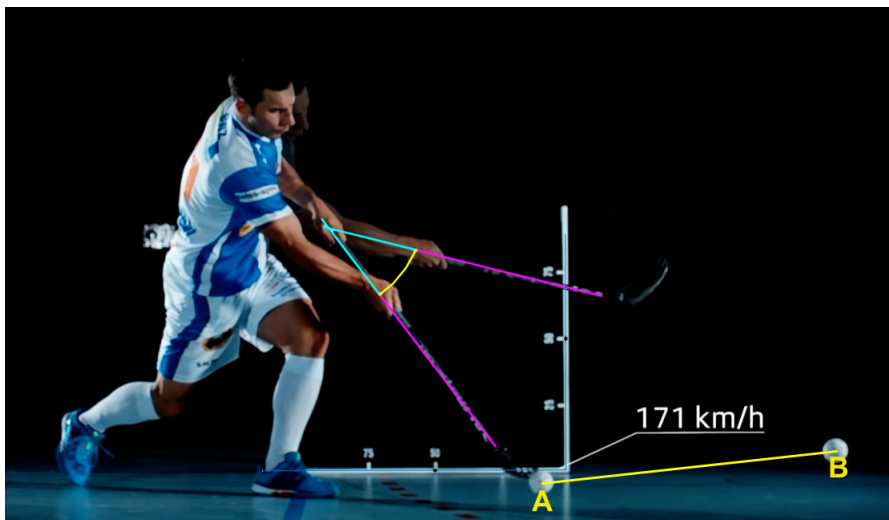


Obrázek 4.6: Trajektorie bodu úchopu hole spodní rukou hráče a polohy tyče ve 21 zvolených časových krocích

Po shlédnutí video nahrávky [7] si lze všimnout, že je zpomalené a hráči trvá vystřelit míček v řádech desítek sekund. To jistě neodpovídá reálné době tvání střelby, ovšem pro simulaci a úplné zadefinování pohybu florbalové hole bylo potřeba zjistit reálný čas. Pro účely této práce byl brán v úvahu předpoklad, že rychlost hole je rovnoměrná. Potom bylo možné reálný čas dopočíst pomocí obr 4.7, kde lze vidět žlutou dráhu míčku kterou urazil z místa A do místa B rychlostí 171 km/h, kdy čas, který při tom strávil na cestě, trval stejně dlouho jako urazit bodu spodního úchopu hole svou žlutou trajektorií. Následným přenáso-



bením získaného času na jednotku trajektorie spodní ruky hráče (žlutá křivka) celkovou dráhou tohoto bodu (modrá křivka na obr. 4.6) byl získán celkový reálný čas simulace  $t_{\text{real}} = 0,236$  sekund.

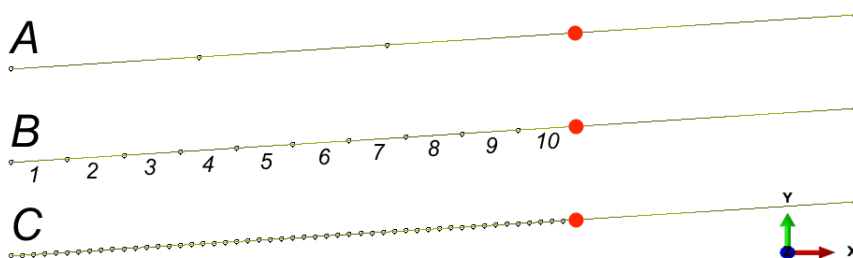


Obrázek 4.7: Porovnání žlutých trajektorií pro získání reálného času simulace

#### 4.2.1 Tyč

Z přechozích kapitol byly při zvoleném materiálu zjištěny všechny potřebné parametry *shaftu*, které vycházely ze vzorové hole *Unihoc*. Ze zjištěných poznatků bylo možné florbaluku s těmito rozměry a skladbou vymodelovat pro simulaci střely, nebo-li s ní vystřelit, jelikož už byl znám pohyb předepisující střelu s florbalovou holí.

Jelikož bylo cílem navrhnout tuhosti tyče po částech, tak parametrický skript vytvářející jednorozměrnou geometrii *shaftu* florbaluky byl přizpůsoben na její rozdělení vyjma držadla na určitý počet sekcí (*section*). Uzpůsobení skriptu je demonstrováno na obr. 4.8, kde lze vidět varianty segmentace A, B a C, kde byla tyč



Obrázek 4.8: Rozdělení *shaftu* florbalové hole na jednotlivé sekce vyjma držadla



rozčleněna na tři, deset a padesát sekcí. Od pohledu bylo pro analýzu rozložení tuhosti tyče na výslednou rychlost míčku přijato za dostačující rozdělení *shaftu* (kromě držadla) při variantě B z obr. 4.8, resp. na deset sekcí.

Z důvodu, že model tyče byl vytvořen pomocí jednorozměrné geometrie, tak pro navrhování tuhostí jednotlivých částí hole bylo potřeba určitým způsobem kontrolovat hodnoty těchto tuhostí podél *shaftu* jako nastavitelné parametry modulu pružnosti v ohybu (*Young's Modulus*). Toho bylo docíleno pomocí vztahu 4.1

$$v = \frac{Fl^3}{48EJ} \quad , \quad (4.1)$$

který udává průhyb  $v$  prutu (nosníku) o délce  $l$  s modulem pružnosti v ohybu  $E$  a kvadratickým momentem pro konstantní mezikruhový průřez k jeho ose  $J$  při třibodovém ohybu se zatěžující osamělou silou  $F$  působící uprostřed podpor. Pro homogenizaci kompozitu na materiál isotropního charakteru popsany především efektivním modulem pružnosti  $E_{\text{ef}}$  bylo třeba vztah 4.1 převést do následujícího tvaru:

$$E_{\text{ef}} = \frac{Fl^3}{48vJ} \quad . \quad (4.2)$$

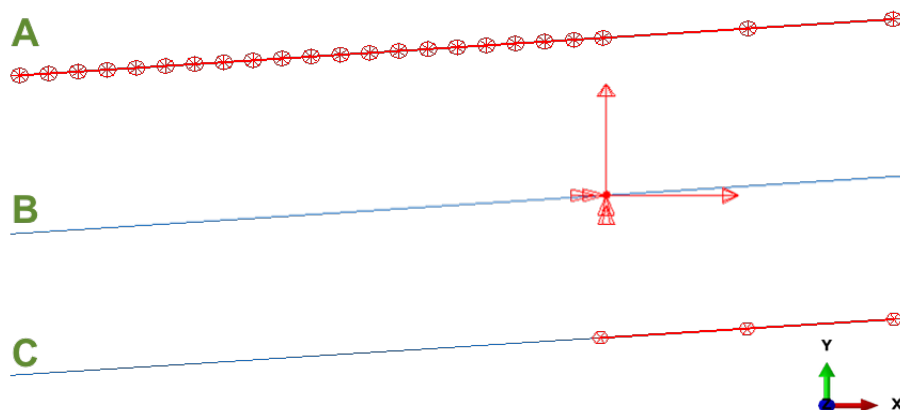
Pomocí verifikovaného modelu pro stanovení ohybové tuhosti hole (*flexu*) byla sestavena trubka konstantního průřezu se střední geometrií tyče s vyhovující skladbou z tab. 4.1, zatěžující osamělou silou  $F = F_z = 300$  N uprostřed podpor a jejich vzdáleností  $l_A = 800$  mm. Pro takto vytvořený model byl odečten průhyb  $v$  a přes vztah 4.2 následně dopočten efektivní modul pružnosti pro zhomogenizovaný laminát, jehož hodnota  $E_{\text{ef}}$  vyšla  $13,5 \cdot 10^9$  Pa. Díky využití vztahů 4.1 a 4.2 je tedy zřejmé, že průřez modelu tyče pro simulaci střely bylo třeba definovat po částech (sekcích) konstantní. Jelikož simulace střely byla zadána jako explicitní úloha, tak pro materiál tyče bylo potřeba navíc určit hustotu, která byla pomocí známého objemu získaného z modelu ohybové certifikační zkoušky a naměřené hmotnosti vzorové hole *Unihoc* (95 g) určena z následujícího vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad . \quad (4.3)$$

Okrajové podmínky pro tyč byly zadány celkem tři. První z nich byla zadefinována na celé geometrii hole, jak lze vidět u varianty A na obr. 4.9, a zamezovala posuv *shaftu* ve směru osy  $z$  (nákresny). Další okrajová podmínka (varianta B na obr. 4.9) byla zadána pro posuv spodního bodu držadla, zvýrazněného červenou tečkou (referenční bod) na obr. 4.8, který byl spolu s natočením okolo referenčního bodu zjištěn na základě nahrávky [7], kdy zmíněná rotace byla poslední z podmínek zadána na celém držadle (varianta C na obr. 4.9). Dvě poslední okrajové

podmínky pro tyč byly proměnné v dopočteném čase simulace, proto bylo potřeba pro 21 nalezených poloh *shaftu* zjistit stejně tolik hodnot časů pro posuv spodní ruku hráče resp. natočení držadla. Neboť při zadaném rovinném pohybu vykonávajícím při střele byl posuv referenčního bodu a natočení okolo něj proveden ve stejný čas, tak stačilo napočítat jednotlivé časy pouze pro spodní bod úchyty při uvažování konstantní rychlosti tohoto bodu po celý čas simulace.

Přesto, že okrajové podmínky definující pohyb hole byly zadávány s pomocí časových kroků simulace, tak tyto kroky byly vždy dopočteny na základě nalezených rychlostí jednotlivých segmentů trajektorie spodního bodu držadla. V pozdější fázi práce byly s výhodou tyto rychlosti referenčního bodu na několika prvních modrých úsecích z obr. 4.6 zadávány tak, aby se po těchto úsecích postupně navyšovaly až na konečnou rychlost tohoto bodu, která korespondovala s původní napočtenou hodnotou času simulace  $t_{\text{real}} = 0,236$  sekund. Jelikož na těchto několika prvních

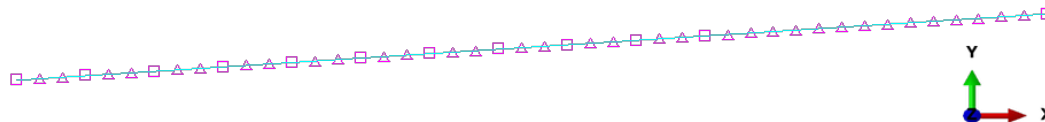


Obrázek 4.9: Okrajové podmínky tyče florbalové hole pro simulaci střely

segmentech celkové dráhy se spodní bod držadla pohyboval s menší rychlostí, tak celkový čas úlohy se přirozeně zvětšil na hodnotu  $t_{\text{sim}} = 0,3$  sekund. Postupné navyšování rychlosti spodního bodu držadla na prvních  $n$  úsecích jeho dráhy (modrá křivka z obr. 4.6) o hodnotu  $1/n$  konečné rychlosti tohoto bodu zmatně zmírnilo rozkmitání tyče při skokovém zadání vstupní rychlosti posuvu daného bodu. Tato metoda se osvědčila pro hodnotu  $n = 6$ , ovšem při navyšování zmíněné hodnoty na více než prvních šesti úsecích došlo sice k menšímu prvotnímu rozkmitání hole, jelikož vstupní rychlost byla podělena o parametr  $n$ , ale množství impulsů opět vedlo k značně velkému rozkmitání *shaftu*.

Konečnoprvková síť modelu tyče pro simulaci střely byla definována velikostí prvku, která se odvíjela od parametru  $q$ , udávajícího rozdělení jedné sekce *shaftu*. Tuto síť lze vidět na obr. 4.10, kde fialové obrazce představují uzly konečnoprvkové sítě, přičemž čtverce zároveň vytyčují konce jednotlivých sekcí. Jelikož množsví

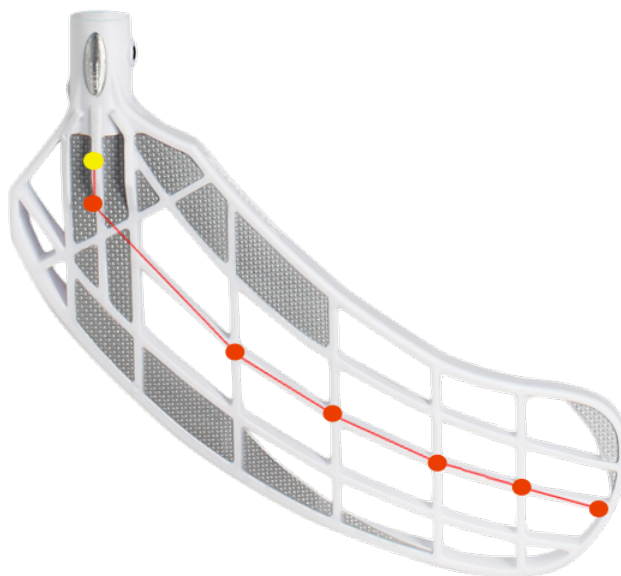
těchto sekcí *shaftu* (10), resp. velikost každé z nich byla stanovena jako neměnná, tak dopočtena velikost jednoho prvku pro zvolenou hodnotu parametru  $q$  rovnou třem vyšla 24,33 mm.



Obrázek 4.10: Konečnoprvková síť tyče florbalové hole pro simulaci střely

### 4.2.2 Čepel

Pro kontakt florbalové hole s podlahou byl vytvořen model čepele, který vycházel z reálného vzoru *Salming Quest Endurance*. Body křivky, vytyčující sekce geometrie tohoto modelu, byly získány ze středové mřížky čepele *Salming Quest Endurance*, jak je názorně vyobrazeno na obr. 4.11. Model čepele byl vytvořen jako další

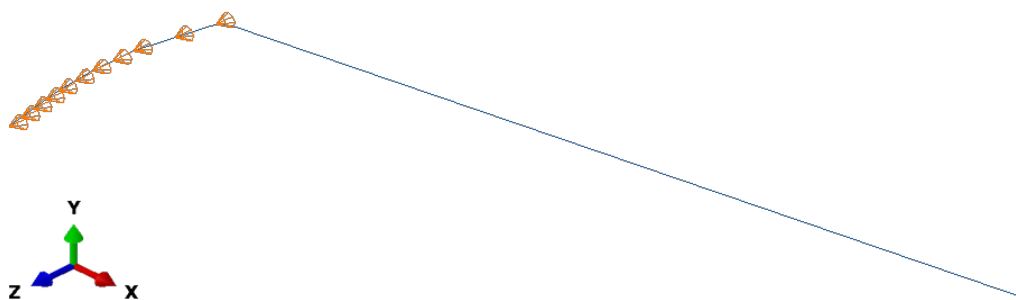


Obrázek 4.11: Geometrie modelu čepele vycházející ze *Salming Quest Endurance*

samostatná část (*Part*), kdy v sestavě (*Assembly*) byla jeho geometrie připojena ke koncovému bodu *shaftu* na druhé straně od držadla svým krajním uzlem zvýrazněným žlutou tečkou na obr. 4.11. Jak už bylo více zmíněno, tak tyto díly byly spojeny typem svázání *coupling*, kdy v uzlu spojení byly odebrány všechny stupně volnosti pro fixní upevnění čepele k tyči. Vzájemné natočení čepele vůči tyči bylo nastaveno, co nejvěrněji, dle video nahrávky [7].

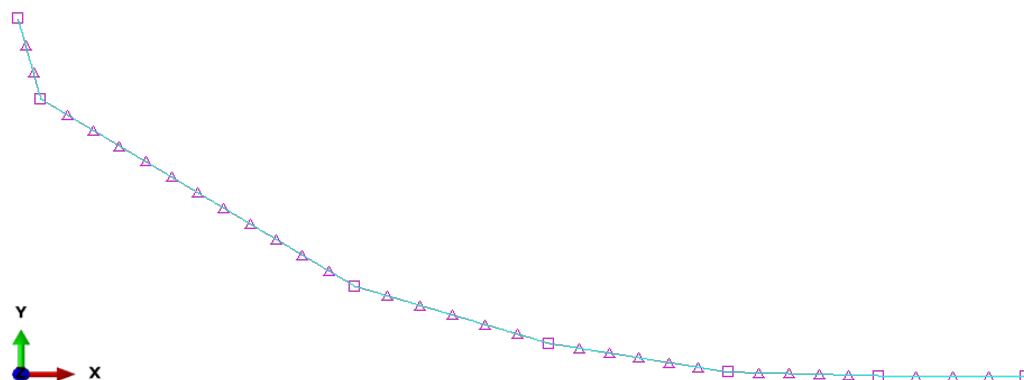
Materiál čepele byl zadán pomocí modulu pružnosti, který byl zvolen o řád nižší než-li u tyče ( $E_{ef} = 13,5 \cdot 10^9$  Pa) a hodnotou *Poissonovo* konstanty, která byla pro všechny díly soustavy (tyč, čepel, podlaha, míček) po vyčíslení stejná  $\nu = 0,3$ . Hustota čepele byla určena pomocí vztahu 4.3 tak, aby se při zvolené hustotě zachovala její reálná hmotnost, kdy všem sekcím znázorněným na obr. 4.11 byl zadán plný obdelníkový průřez o rozměrech  $10 \times 70$  mm.

Na celé geometrii čepele byla zadána okrajová podmínka zamezující posuv ve směru osy  $z$ , jak si lze v perspektivě prohlédnout na obr. 4.12, kde je čepel už připojená k tyči v přichystané výchozí poloze pro simulaci střely.



Obrázek 4.12: Okrajová podmínka v perspektivě vyobrazené čepele připojené k tyči

Konečnoprvková síť modelu čepele pro simulaci střely byla definována velikostí prvku, která se odvíjela od parametru  $c$  udávajícího rozdělení nejkratší sekce čepele obsahující žlutý bod na obr. 4.11. Tuto síť lze vidět na obr. 4.13, kde fialové obrazce mají stejný význam jako u konečnoprvkové sítě tyče. Jelikož velikost zmiňované nejkratší sekce byla stanovena jako neměnná, tak dopočtena velikost jednoho prvku pro zvolenou hodnotu parametru  $c$  rovnu třem vyšla 7,19 mm.

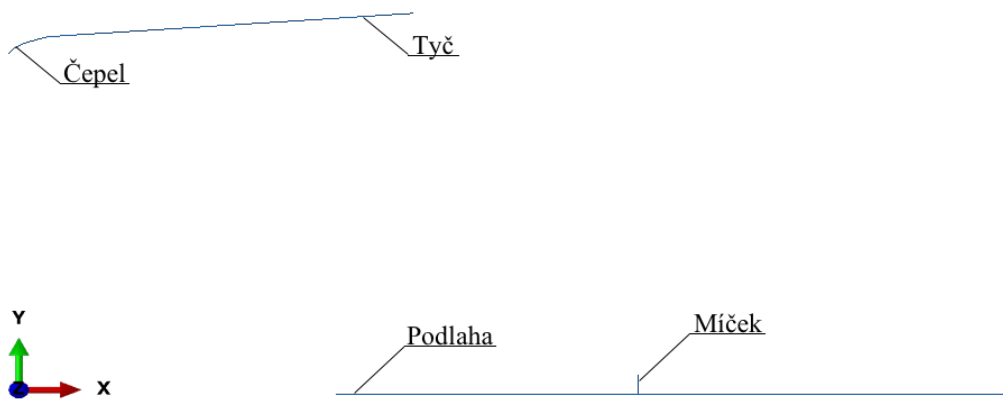


Obrázek 4.13: Konečnoprvková síť čepele florbalové hole pro simulaci střely

### 4.2.3 Sestava

Jak už bylo zmíněno, tak sestava byla složena z tyče, čepele, podlahy a míčku. První dva díly již byly podrobně popsány výše, proto při nabytých zkušenostech bude už jen stručně formulováno provedení modelace podlahy a míčku. Jejich poloha vůči holi byla s určitými kompromisy<sup>2</sup> nastavena dle video nahrávky [7]. Při imitaci záznamu byl obzvlášť kladen důraz na vizuální podobnost ohybu *shaftu* během jeho kontaktu s podlahou, která byla vůči ostatním dílům *assembly* uvažována jako tuhá s konečnoprvkovou sítí tvořenou 70 prvky. Florbalový míček byl modelován jednou sekcí s konstantním mezikruhovým průřezem, naměřeným poloměrem  $r_m = 36$  mm a tloušťkou  $t_m = 3$  mm, hodnotou modulu pružnosti rovnu čepeli, povolenými posuvy ve směrech  $x$  a  $y$ , konečnoprvkovou sítí tvořenou 20 prvky a vypočtenou hustotou pomocí vztahu 4.3 při zachování reálné hmotnosti míčku.

Model pro simulaci příklepové střely florbalovou holí byl tímto kompletní pro nastavitelné hodnoty modulů pružnosti jednotlivých sekcí (částí) tyče  $E_1$  až  $E_{10}$ , představující rozložení tuhosti podél hole. Sestavu ve výchozí poloze si lze prohlédnout na obr. 4.14, kde jsou znázorněné jednotlivé díly sestavy reprezentované modrými křivkami. Jak bude ukázáno v následující kapitole, tak tento model byl dále využit pro návrh rozložení tuhosti podél florbalové hole tak, aby střela s ní byla co nejefektivnější.



Obrázek 4.14: Model pro simulaci příklepové střely florbalovou holí

<sup>2</sup>Bylo třeba brát v úvahu, že prostorové zachycení s mírným nadhledem celé scény záznamu [7] bylo redukováno na rovinné vnímání všech úkonů.

# 5 | Výsledky

Bylo třeba navrhnout rozložení (konfiguraci) tuhosti podél hole tak, aby střela s ní byla co nejefektivnější, resp. aby míček během simulace dosáhl po výstřelu co nejvyšší rychlosti. Výsledná rychlost byla počítána jako aritmetický průměr rychlostí balónku v jednotlivých časech simulace od 0,26 sekund až do 0,3 sekund (konec simulace).

Sestavený parametrický model pro simulaci střely byl nejprve testován při výchozím návrhu č. 0 z tab. 5.1 v porovnání s video nahrávkou [7]. Ze zmiňované tabulky<sup>1</sup> lze vidět, že rychlost  $v_0$  se od hodnoty ze záznamu (viz obr. 4.7) příliš neliší. Je nutné upozornit na to, že nebylo cílem namodelovat vzorovou střelu ze záznamu, avšak podobnost výsledků nasvědčuje o správném sestavení modelu a zvolení hodnot jeho parametrů. Pro ověření korektnosti modelu byla všem sekcím navýšena hodnota modulu pružnosti o polovinu té původní. Při navýšení tuhosti podél celé tyče a stejném ohybu (předepsaném pohybu), tak selským rozumem lze dojít k závěru, že se v *shaftu* naakumuluje více energie a míček bude vystřelen s vyšší rychlostí, což u modelu nastalo. V opačném případě, kdy všem sekcím byla hodnota modulu pružnosti snížena na třetinu té původní, tak se rychlost míčku po jeho vystřelení snížila, což je z logiky věci v pořádku.

Tabulka 5.1: Klíčové návrhy rozložení tuhosti podél hole při zachování *flexu* tyče dle regulací IFF

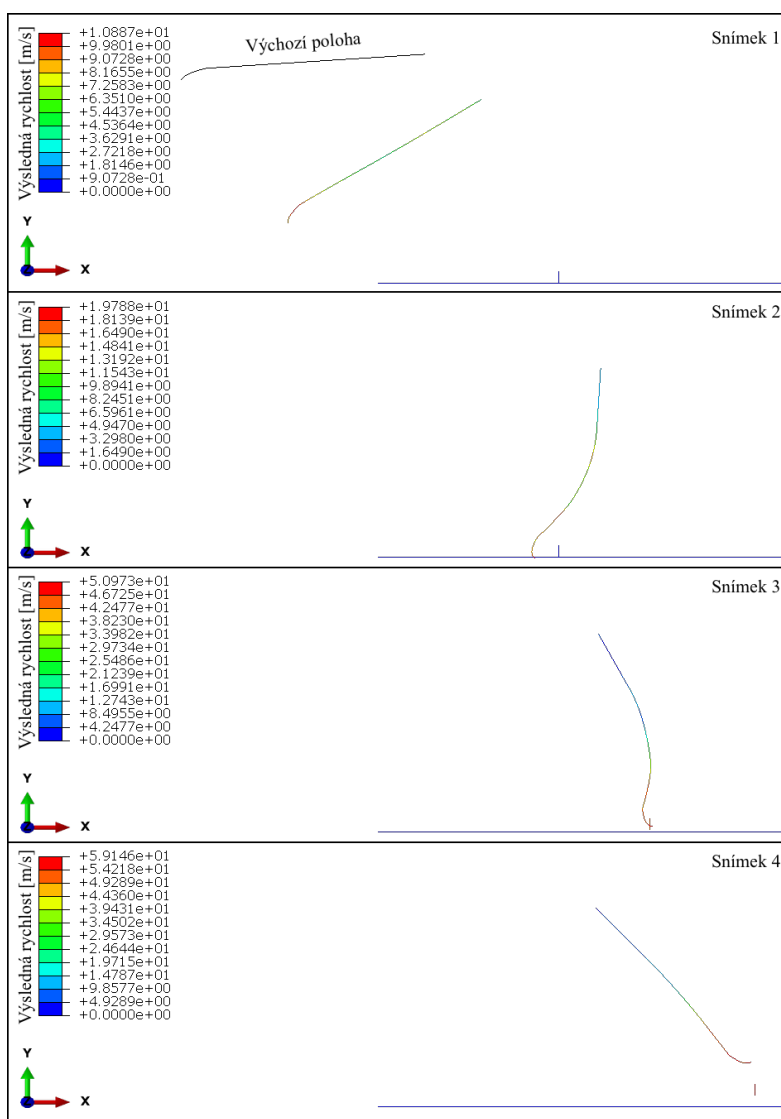
| Návrh č. | Segment <i>shaftu</i> |          |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     | <i>flex</i> [mm] | $v_i$ [km/h] |
|----------|-----------------------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------|
|          | 1                     | 2        | 3                   | 4                   | 5                   | 6                   | 7                   | 8                   | 9                   | 10                  |                  |              |
| 0        | $E_{ef}$              | $E_{ef}$ | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | 25,8             | 174,6        |
| 1        | $E_{ef}$              | $E_{ef}$ | $\frac{1}{2}E_{ef}$ | $\frac{1}{2}E_{ef}$ | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $\frac{9}{8}E_{ef}$ | $E_{ef}$            | 25,8             | 194,6        |
| 2        | $E_{ef}$              | $E_{ef}$ | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $\frac{3}{4}E_{ef}$ | $\frac{3}{2}E_{ef}$ | $\frac{3}{2}E_{ef}$ | 26,3             | 189,2        |
| 3        | $E_{ef}$              | $E_{ef}$ | $\frac{1}{2}E_{ef}$ | $\frac{1}{2}E_{ef}$ | $\frac{5}{4}E_{ef}$ | $\frac{5}{4}E_{ef}$ | $\frac{5}{4}E_{ef}$ | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | $E_{ef}$            | 25,9             | 203,4        |

Jelikož pohyb pro florbalovou hůl byl na základě okrajových podmínek tyče předepsán, tak předchozí úvahou by se nejlepšího návrhu rozložení tuhosti dosáhlo při dokonale tuhé konfiguraci. Ovšem nelze zvyšovat tuhost hole libovolně. Musí platit, že její *flex* bude dle regulací IFF pro všechny návrhy stejný (po zaokrouhlení na 5/10). Byla tedy provedena analýza vlivu rozložení tuhosti podél tyče na výslednou rychlost míčku při daném *flexu*, jehož hodnoty byly vypočteny z mo-

<sup>1</sup>Čísla návrhů konfigurací odpovídají indexům jejich rychlostí.

delu certifikační ohybové zkoušky. Tento model tvořený nosníkovými prvky, sloužil k rychlému zjištění ohybové tuhosti hole při zvolené konfiguraci a byl validován pomocí analytického řešení. Z analýzy rozložení tuhostí byly vybrány klíčové návrhy, které jsou uvedené v tab. 5.1, kde u č. 1 a 2 si lze obdobnou konfiguraci představit při využití technologie *KickZone* v kombinaci s *X-Shaft* (viz obr. 3.8). To by potom znamenalo, že použití podobných vylepšení florbalových holí je pro hráče do určité míry užitečné, o čemž svědčí i návrh č. 3.

Nejlepšího výsledku rozložení tuhostí podél hole bylo dosaženo při posledním návrhu z tab. 5.1, kdy míček po výstřelu příklepem dosáhl rychlosti  $v_3$  rovnu 203,4 km/h, což je o 16,5 % více oproti výchozímu návrhu č. 0. Průběh střely při této konfiguraci si lze prohlédnout na čtyřech snímcích pořízených ze simulace uvedených v obr. 5.1.



Obrázek 5.1: Průběh střely florbalovou holí s rozložením tuhosti při návrhu č. 3

## 6 | Závěr

Tato bakalářská práce byla soustředěna na halový sport, se stále navyšující se popularitou, kterým je florbal. Hlavním předmětem této práce byla florbalová hůl tzv. florbalka, jež je nejdůležitějším nástrojem hráče k přemístování míčku po hracím poli. Důraz byl kladen na ověření funkčnosti technologií, které spočívají ve změně rozložení tuhosti materiálu podél hole. Tyto technologie se používají na florbalkách za účelem podpořit hráčské schopnosti a pro výrobce jsou nesporným důvodem k navyšování cen holí.

Byla provedena rešerše florbalek, kdy byly nalezeny zvolené údaje o jejich stávajícím stavu. V této práci byl nastíněn komplexní obraz florbalu, aby kdokoliv snadno nabyl jasný pojem o hlavních principech této hry. Byla zde podrobně popsána florbalová hůl, aby o ní čtenář získal skutečnou představu a měl ponětí o jejich typech a technologiích, které se používají pro daný typ hole.

V rámci této práce bylo provedeno ověření korektního vykonání certifikační ohybové zkoušky dle regulací IFF [1]. Tato zkouška stanovuje jeden z nejdůležitějších parametrů florbalové hole, kterým je při zadefinovaných podmínkách tzv. *flex* (ohybová tuhost). Tento parametr je při výběru florbalové hole pro hráče klíčovým, neboť musí odpovídat jeho dovednostem.

Pro určení *flexu* florbalky metodou A (pro hole od délky 850 mm a více) dle regulací IFF [1] byl vytvořen numerický model certifikační ohybové zkoušky. Pro opakovatelné sestavení modelu se zvolenými parametry byl pro výpočtový systém *Abaqus* vytvořen parametrický skript pomocí programovacího jazyka *Python*. Tento skript umožňuje sestavit model kompozitové trubky s proměnným kruhovým průřezem na obou koncích o konstantní tloušťce. Model byl s nalazenými parametry konečnoprvkové sítě validován pomocí experimentu s chybou 0,4 %. Při zvoleném materiálu byla pro kompozit navíc prokázána nevhodnost použití skladby s orientací vláken pod úhlem  $0^\circ$ , jak lze vyčíst z tab. 4.1.

Dále byl pro výpočtový systém *Abaqus* vytvořen parametrický skript pomocí programovacího jazyka *Python*, který umožňuje sestavit model explicitní úlohy pro simulaci příklepové střely florbalovou holí. Pomocí tohoto modelu se zvolenými parametry jeho součástí (tyč, čepel, podlaha, míček) byla navržena tuhost jednotlivých segmentů florbalové hole s určitou hodnotou *flexu* tak, aby střela s ní byla co nejefektivnější, jak si lze prohlédnout v tab. 5.1.

Nejlepšího výsledku rozložení tuhosti podél hole s hodnotou *flexu* 26 mm bylo dosaženo při návrhu č. 3 z tab. 5.1, kdy míček po výstřelu dosáhl rychlosti 203,4 km/h, což je o 16,5 % více oproti výchozí tuhostní konfiguraci hole při návrhu č. 0.



V této práci byla ověřena funkčnost určitých technologií, jež se používají na florbalových holích za účelem zvýšení rychlosti míčku po jeho vystřelení. Bylo zjištěno, že změna rozložení tuhosti podél hole při zachování její ohybové tuhosti (*flexu*) má nezanedbatelný vliv na výslednou rychlost míčku po jeho vystřelení. Z návrhu č. 1 v tab. 5.1 lze vyčíst, že tuhostní konfigurace ve smyslu používaných technologií *KickZone* a *X-Shaft* je na holi užitečná. Vyšší cena za forbalky s těmito prvky (technologemi) je tedy oprávněná, ovšem hráč už musí sám zhodnotit, zda-li se mu to za přidaný výkon finančně vyplatí, či nikoliv. Nejdůležitějším závěrem této práce je však to, že bylo dosaženo vhodnějšího rozložení tuhosti podél florbalové hole při návrhu č. 3 z tab. 5.1 oproti konfiguraci ve smyslu současně používaných technologií (návrh č. 1).

# Literatura

- [1] Certification Rules for IFF-marking of Floorball Equipment SPCR 011. Edition 2014. Sweden: International Floorball Federation, c2014.
- [2] Fatpipe Attitude (Singapore). In: Facebook [online]. Menlo Park: Facebook, 2004 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/Fatpipe-Attitude-Singapore-125307717534909/>
- [3] Fatpipe Raw Concept 27 JAB 17/18. FLORBAL.COM [online]. Brno: Florbal.com, c2016 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.florbal.com/florbalove-hole/seniorske-hole/fatpipe-raw-concept-27-jab-17-18/>
- [4] FLORBAL.COM [online]. Brno: Florbal.com, c2016 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.florbal.com>
- [5] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-X.
- [6] Salming Floorball Sweepershot Rasmus. In: YouTube [online]. san Bruno: Google, 2005 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=4ZYz8yPHzk8>
- [7] Slow Motion: Nico Scalvinoni Powershot. In: YouTube [online]. San Bruno: Google, 2005 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=uLHq4FxRioo>
- [8] TOP10list.cz [online]. Česká republika: Houdková, 2014 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <http://www.top10list.cz/top-10-nejoblíbenější-sporty-v-cr/3/>