



STŘEDOŠKOLSKÁ TECHNIKA 2022

SETKÁNÍ A PREZENTACE PRACÍ STŘEDOŠKOLSKÝCH STUDENTŮ NA ČVUT

Design madla sportovního luku

Martina Vojtová

**Střední průmyslová škola strojnická a Střední odborná škola profesora
Švejcara, Plzeň, Klatovská 109**

STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STROJNICKÁ
A STŘEDNÍ ODBORNÁ ŠKOLA PROFESORA
ŠVEJCARA, PLZEŇ

DESIGN MADLA SPORTOVNÍHO LUKU
MATURITNÍ PRÁCE

Martina Vojtová

Obor vzdělání 23-41-M/01 Strojírenství, třída: 4STB

Vedoucí práce: Ing Josef Gruber
Plzeň 2021

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval/a samostatně za použití literatury a dalších podkladů v ní uvedených.

V Plzni dne 28. 4. 2021

.....
podpis žáka

ANOTACE

Tuto práci jsem si zvolila, protože již 10 let se věnuji lukostřelbě, z toho víc jak třetinu funguji jako trenér a opravář základního materiálu pro můj klub. S lukostřeleckým náčiním jsem proto ve velmi blízkém kontaktu a jako střelec na vyšší úrovni už jsem si vyzkoušela několik typů, ale vždycky moji pozornost upoutaly madla firmy Hoyt, která mě (společně s návrhem Ing. Josefa Grubera) inspirovala vytvořit tento projekt.

Madlo luku už od prvního pohledu vypadá jako výtvar generativního designu nebo tvarové optimalizace, o nichž se budu zmiňovat a porovnávat je. Pro pochopení sil na luku také zpracovávám jednoduché rozložení zatížení až konečně po samotné návrhy madla a výběr finální verze.

OBSAH

ANOTACE	4
OBSAH	5
ÚVOD.....	6
1 DRUHY NAVRHOVÁNÍ	7
1.1 GENERATIVNÍ DESIGN	7
1.2 TVAROVÁ OPTIMALIZACE	7
1.3 POROVNÁNÍ.....	8
2 DESIGN MADLA	9
2.1 VÝROBA MADEL.....	9
2.2 ROZKLAD SIL NA MADLE.....	10
2.3 SILOVÁ ANALÝZA.....	15
2.4 NAVRHOVÁNÍ.....	19
2.4.1 Generativní design.....	19
2.4.2 Tvarová optimalizace	21
2.5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	22
ZÁVĚR	23
PŘÍLOHY	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
POUŽITÉ PODKLADY.....	24
PŘEJATÁ VYOBRAZENÍ	25

ÚVOD

Cílem této práce je přiblížit se výsledky k dnešním madlům od velkých lukostřeleckých firem a porovnat výsledky získané generativním designem a tvarovou optimalizací za zjednodušených podmínek. Stručně popisuje oba způsoby navrhování a rozklad sil na madle luku, včetně základní terminologie luku. Nakonec se věnuje samotným výsledkům modelování a porovnávání výsledků počítačových návrhů.

1 DRUHY NAVRHOVÁNÍ

1.1 GENERATIVNÍ DESIGN

Generativní design je postupně se rozšiřující způsob navrhování nových modelů využívající výpočetní techniky. Razantně zkracuje navrhovací proces jak v samotném modelování, tak zadávání hodnot. Generativní design pracuje se zadanými pevnými body, mezi nimiž vytváří novou strukturu, odpovídající zadanému zatížení. Je schopný pracovat s materiálem, požadovanou bezpečností, hmotností, tuhostí, započítává náklady na výrobu, styl výroby atd. Generativní design nejčastěji funguje na cloudovém výpočtu, generuje řadu verzí řešení, ze kterých si lze libovolně vybrat. Například program Autodesk Fusion 360 dokonce doporučuje výsledky nejlépe odpovídající zadaným požadavkům (konvergující řešení). Velmi často se objevuje v automobilovém průmyslu. Jde o celkovou změnu stylu, jakým se dnes vytváří nové výrobky a umožňuje rychle a levně navrhovat součásti na míru, které by jinak jako kusové výrobky byly mnohem dražší o cenu navrhování. Jde hlavně o nižší hmotnost se stejnou či vyšší pevností, jde o úsporu materiálu a v některých oblastech, jako dopravní průmysl znamená nižší hmotnost a menší spotřebu paliva. Součásti navržené touto technologií nejsou většinou výrobitelné konvenčními metodami. Předjímají nástup aditivních metod (např. tzv. 3D tisku) ať už s cílem zhotovit finální výrobek, nebo např. model pro odlévání.

1.2 TVAROVÁ OPTIMALIZACE

Tvarová optimalizace je v některých ohledech jednodušší než generativní design, ale princip je stále stejný. Udává rámeček řešení problémů na základě fyzikálních a mechanických požadavků, zpravidla snižování hmotnosti za zachování stejné či vyšší pevnosti, popřípadě tuhosti. Je to způsob výroby vhodný i pro aditivní výrobu a v dnešní době se postupně rozšiřuje jako řešení problému s postupně rostoucí cenou hrubého materiálu, kvůli níž se musí tvarově optimalizovat již v raných fázích navrhování. Programu se předloží model, ve kterém je potřeba provést úpravy – odlehčení. Velkou výhodou softwarem řízených výpočtů je nahrazení metody pokus – omyl, a tím pádem snížení potřeby destruktivních zkoušek u nových sérií výrobků, ale tato problematika má stále mnoho prostoru pro vývoj.

Tvarová optimalizace, využitá v této práci (tj. v mezích lineární pružnosti – malé deformace), pracuje se stávajícími modely, které, po definování materiálu, zatížení a

zachovaných oblastí, upravuje za pomoci Hookova zákona. Hookův zákon říká, že u relativně malých deformací objektu jsou posun nebo velikost přímo úměrné zatížení. Po odstranění zatížení se objekt vrátí do původního tvaru. Výsledky tvarové optimalizace jsou typické díky jejich síťované struktuře; přesnost výsledků lze ovlivňovat za pomoci zjemnění této sítě.

Tvarovou optimalizaci můžeme definovat třemi stupni.

1. Parametrická optimalizace – pracuje s parametry jako je tloušťka, zakřivení apod., jedná se však o velmi limitující způsob a je potřeba mít bližší představu o cílovém modelu pro získání ideálního výsledku.
2. Geometrická optimalizace – dovoluje větší svobodu navrhování nežli parametrická optimalizace, pracuje s pevným počtem prvků, ale volně upravuje jejich jednotlivé tvary a rozměry.
3. Topologická optimalizace – označuje jednotlivé prvky pevnými tvary a dovoluje je libovolně měnit.

1.3 POROVNÁNÍ

Už od prvního kroku se tyto dva postupy (tvarová optimalizace a generativní design) velmi liší. Tvarová optimalizace pracuje s hrubým modelem, od kterého odebírá materiál tak, aby se snížila hmotnost a zajistila pevnost, popřípadě tuhost. Software vytváří síť konečných prvků, se kterou pracuje a odebírá z ní materiál podle toků napětí. Rozlišení této sítě lze změnit a závisí na tom přesnost vygenerovaného modelu. Tvarová optimalizace nabízí přímočařejší návrhy a je vhodná, pokud máme hrubou představu o požadovaném výsledném tvaru. Rovněž je snazší výroba konvenčními metodami (CNC obrábění). Na druhou stranu generativní design vytváří zcela nové tvary mezi zachovanými zatíženými tvary. Programu lze zadat výchozí tvar, ale většinou se vytváří zbrusu nové tvary (bionické tvary, připomínající živou přírodu). Vždy vzniká několik možností a variací (někdy mnoho), ze kterých si lze vybrat podle upřesňujících kritérií.

Oba způsoby jsou vhodné pro aditivní výrobu, což je zároveň výhoda i nevýhoda. 3D tisk je stále se vyvíjející technologie, která má zcela jistě obrovský potenciál, nicméně v současnosti není natolik rozšířená (cena). Také vzhledem ke složitosti výsledků těchto typů navrhování to poukazuje na budoucnost, kde bude výroba probíhat bezvýkresově, pouze s počítačovými daty.

2 DESIGN MADLA

2.1 VÝROBA MADEL

Hlavní inspirací pro tuto práci jsou madla firmy Hoyt, společnosti založené již v roce 1931 Earlem Hoytem st., ačkoliv firma začala vyráběním zavíracích nožů a dřevěných sochorů. Jedná se o světového výrobce lukostřeleckého náčiní jak pro lov s lukem, tak pro sportovní lukostřelbu. Už od roku 1972 kdy se lukostřelba vrátila na olympiádu, se Hoyt drží ve špičce – střelci s luky od Hoytu získali více medailí než střelci s luky od jakéhokoliv jiného výrobce. Vychvalují jejich preciznost a už motto „*Get serious, get Hoyt*“ (v překladu: *Bej to vážně, poříd' si Hoyt*) poukazuje na dlouholetou zásadu výrobce, že kvalita je nadevše.

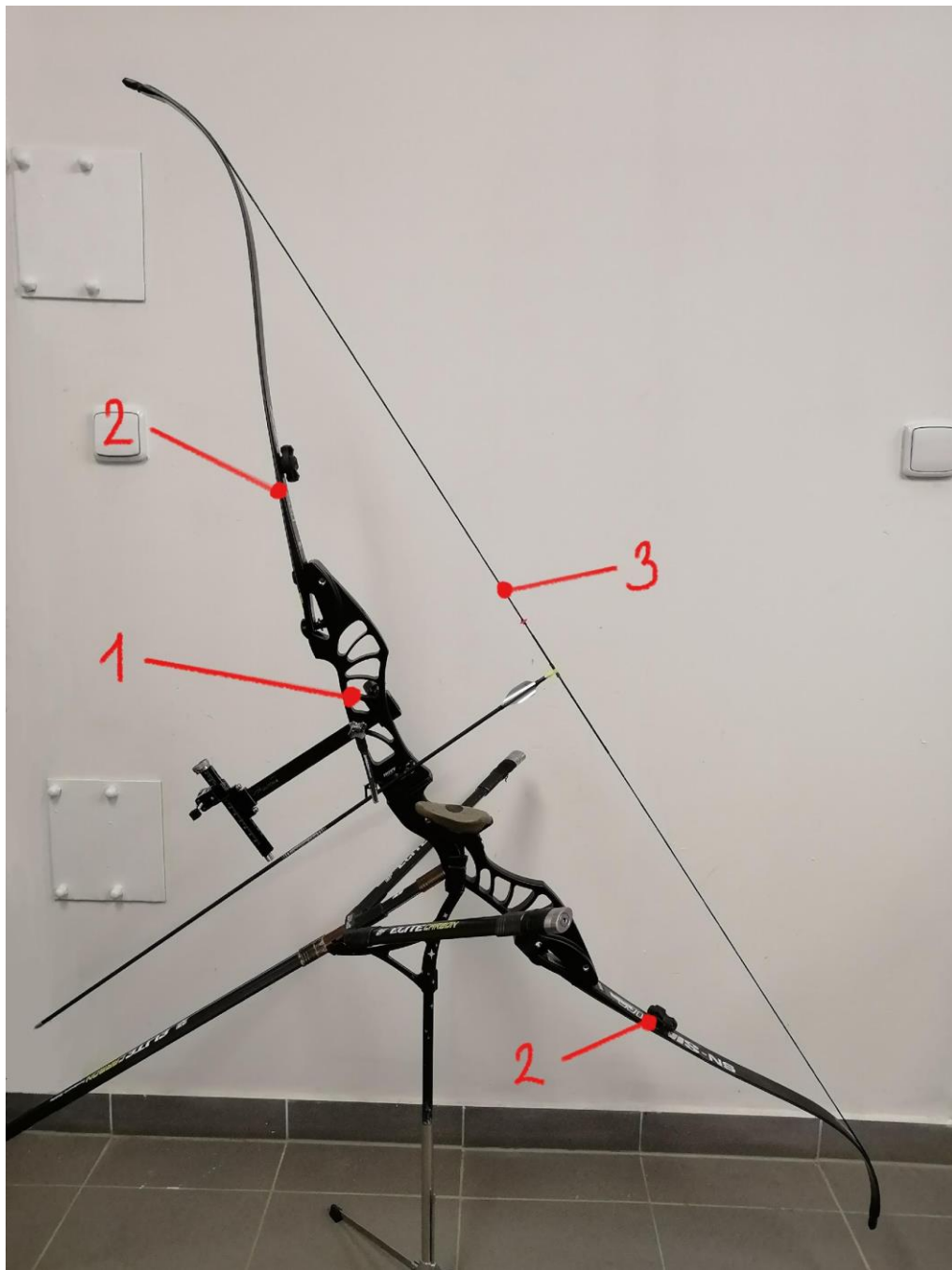
Detaily výroby madel jsou z velké části neznámé obyčejné veřejnosti, ale víme, že firma Hoyt vyrábí madla z 30kg ingotů, ze kterých vyfrézuje madla o hmotnosti 1,5 – 1,25 kg (snížení hmotnosti až o 96 %). Tyto ingoty jsou slitiny hliníku (s největší pravděpodobností dural), používané v leteckém průmyslu, a třísky z výroby madel se v něm dále zpracovávají. Pokud se při výrobě vyskytnou ingoty, jichž kvalita není na požadované úrovni, ale je stále akceptovatelná, vznikají madla střední kvality. Jinými slovy to jsou stále velmi kvalitní madla za nižší cenu. V poslední řadě se jedná o modely Arcos a Xakt, zatímco madla vyšší kvality jsou Formula Xi a Xceed.



Obr. 1 Nejnovější řada reflexních madel Hoyt

2.2 ROZKLAD SIL NA MADLE

Pro pochopení sil působících na luk je třeba znát základní části luku. Jádrem každého luku jsou madlo, ramena a tětva. Nadále budeme potřebovat znát button (jinak – boční opěrka). Jedná se o opěrný bod šípů, od něž se šíp odráží při výstřelu. Grip je opěrný bod pro ruku střelce nacházející se pod osou luku a svisle přesně pod buttonem (nejedná se o pravidlo). Na fotografii reprezentuje šíp již zmíněnou osu luku.



Obr. 2: 1 – madlo, 2 – ramena, 3 – tětva

Chceme-li konstruovat madlo, je zapotřebí znát síly, které na ně působí. Na luk působí síly již v klidovém stavu jakmile se upevní tětíva, která jej napíná, a tím vytváří statické napětí ve formě tlaku na hrany madla a tah na šrouby držící ramena na místě. S těmito dvěma napětími se budeme potýkat celou dobu, ale v této klidové fázi je stále a nikdy nepřesáhne rostoucí napětí při nátahu a následné rázové zatížení při výstřelu. Nutno podotknout, že část síly z výstřelu se přenáší do šípu (zhruba 15 % celkové energie výstřelu), ale při nedestruktivním testování se tětíva pouští naprázdno. Proces testování probíhá až do lomu madla. Během testování se několikrát vymění ramena a tětíva, ale má to své opodstatnění – firma Hoyt zaručuje celoživotní záruku při poruše madla.

Tato práce se zaměřuje pouze na madlo luku a pro zjednodušení výpočtu počítáme s rameny jako s jednoduchými pákami. Ramena luku jsou buď čistě dřevěná, nebo kompozitní, a to buď dřevo-karbon, karbon-pěna. Někdy se dřevo nahrazuje bambusem pro jeho homogenní strukturu. Ramena luku jsou pružný prvek, jejich chování by se dalo přirovnat k pružině.

Podobně pro zjednodušení výpočtu budeme považovat délku tětívy za konstantní, přestože v praxi je vyrobena z nylonu, tedy pod napětím je roztažná.

Hlavní síla F působí v ose luku a rozděluje se do dvou větvícih se reakcí do tětívy. Opěrný bod na madle – grip se nachází pod osou luku, a proto víme, že tyto vazbové síly nejsou stejné a síla F_1 bude větší než síla F_2 (v obr. 5 je použito zjednodušení).

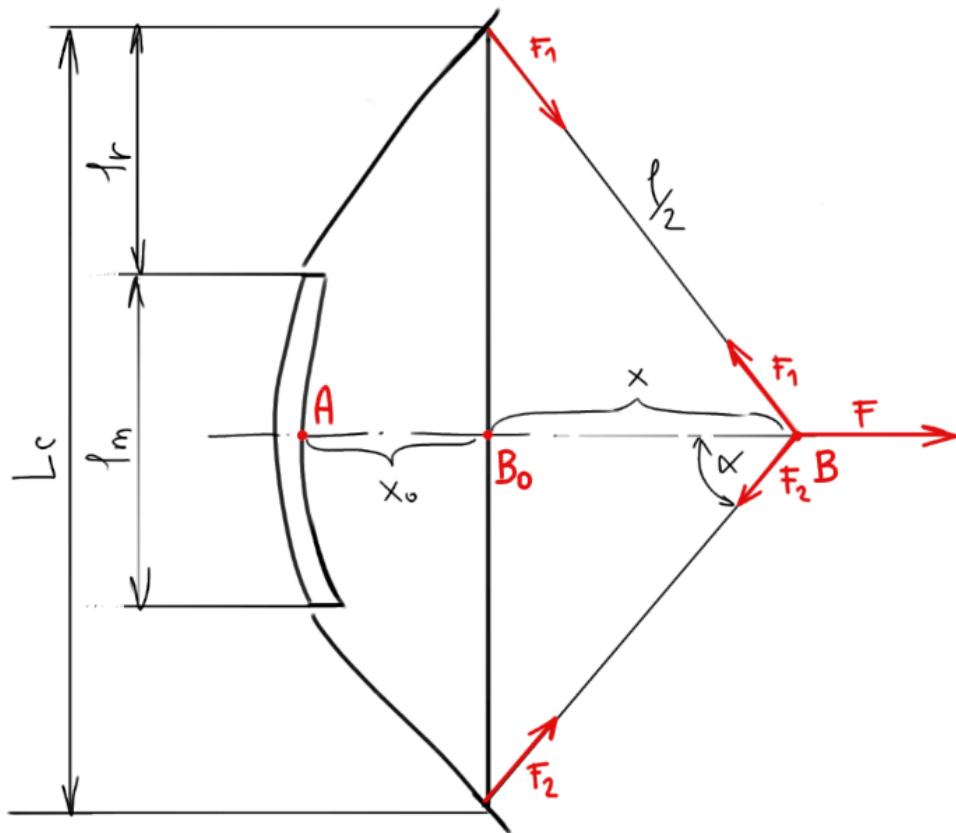
Pracujeme s rozměry luku, naměřenými na mém osobním. Celková délka luku L_C je u standardních luků mezi 66", 68" nebo 70", v tomto případě je to 70" - závisí na rozměru ramen. Madlo má pevný rozměr $l_m = 25" = 0,635$ m, a proto má jedno rameno délku $l_r = 22,5" = 0,5715$ m. Tětíva má délku $l = 69" = 1,75$ m.

Bod A je button a vzdálenost mezi ním a tětívou v klidovém stavu B_0 označujeme x_0 , nazývá se přepětí.

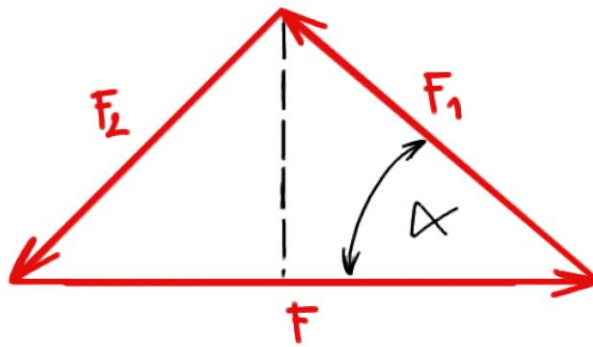
Vzdálenost x_0 je v klidovém stavu tzv. přepětí a v mém případě se jedná o 22 cm (viz obrázek 3), kde bod A je button a bod B_0 bod v ose luku na tětívě za klidu. Vzdálenost x je vzdálenost, o kterou se tětíva od bodu B_0 vzdálí při natažení luku až do bodu B , a jedná se o 73,6 cm. Tato hodnota byla získána odečtením hodnoty x_0 a vzdálenosti bod A (button) a klapačky od celkové délky šípu. Nakonec máme ještě změřeno, že při standardním nátahu je síla F rovná 38,77 lbf.



Obr. 3 Ukázka tzv. „těčka“ pro měření přepětí



Obr. 4 Rozklad sil na luku



Obr. 5 Silový trojúhelník

$$F = 38,77 \text{ lbf} = 172,46 \text{ N}$$

$$l = 69'' = 1,75 \text{ m}$$

$$x = 73,6 \text{ cm} = 0,736 \text{ m}$$

Když tyto síly složíme do silového trojúhelníku, vyjde nám najevo vztah;

$$\cos \alpha = \frac{F}{2F_1} = \frac{2x}{l}.$$

Z nějž můžeme získat sílu F_1 působící na horní část madla přes tětivu. Dále do něj dosadíme.

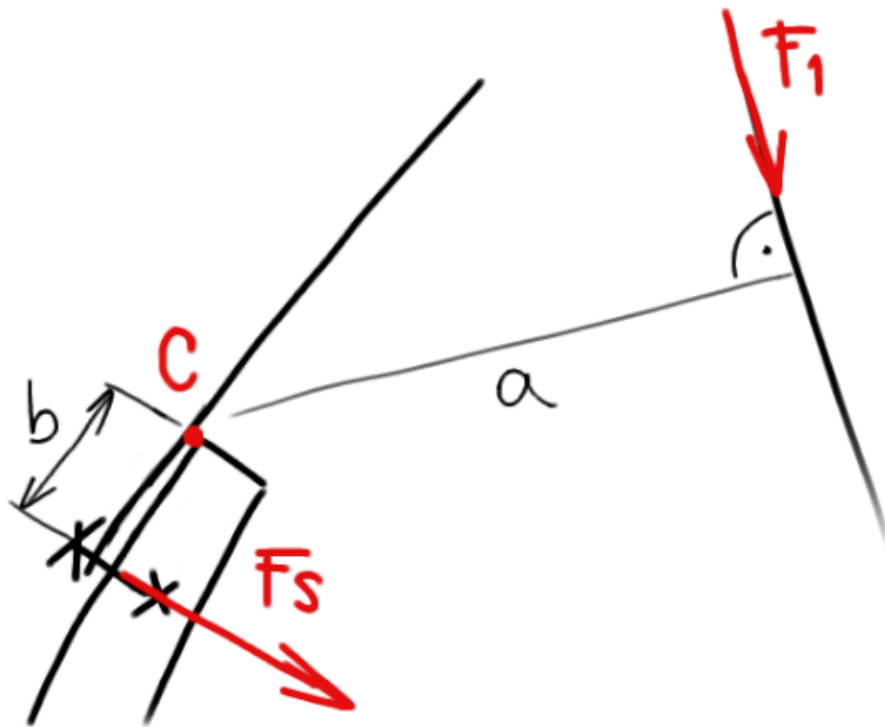
$$F_1 = F \cdot \frac{l}{4x},$$

$$F_1 = 172,46 \cdot \frac{1,75}{4 \cdot 0,736} = 102,52 \text{ N}.$$

Abychom získali sílu působící na madlo, musíme se podívat na zámky luku, kde největším zatížením je tah na šroub, označen F_S (obr. 6). Hodnoty a a b se nedají přesně zjistit, ale šlo je s různou obtíží naměřit na luku. Pokud vezmeme opěrný bod ramena C jako otočný bod momentu, můžeme snadno získat sílu působící na šroub.

$$a = 18,5 \text{ cm} = 0,185 \text{ m},$$

$$b = 8 \text{ cm} = 0,08 \text{ m}.$$



Obr. 6 Síla působící na zámek

$$F_s \cdot b = F_1 \cdot a,$$

$$F_s = F_1 \cdot \frac{a}{b},$$

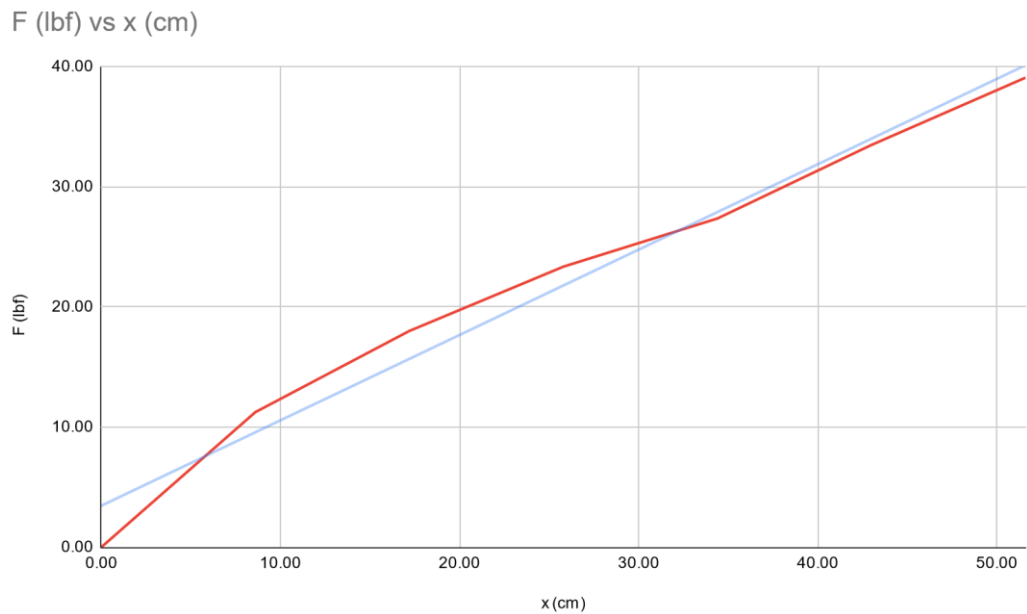
$$F_s = 102,52 \cdot \frac{0,185}{0,08} = 237,08 \text{ N}.$$

Jako výsledek měření byl vytvořen graf průběhu růstu síly při nátahu, měřené po dílcích s mincířem. Jednalo se o pouhé označení jednotlivých dílků na samotný šíp a měření. Výsledkem je velmi lineární růst síly během nátahu.



Obr. 7, šíp rozdělený na dílky pro usnadnění měření

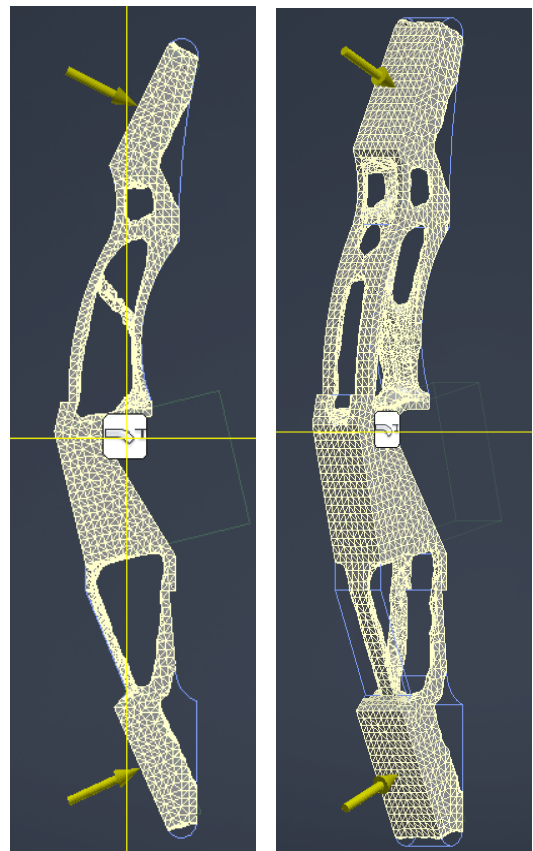
x (cm)	0.00	8.60	17.20	25.80	34.40	43.00	51.60
F (lbf)	0.00	11.24	18.00	23.35	27.36	33.48	39.08



Obr. 8 Graf rostoucí síly při nátahu

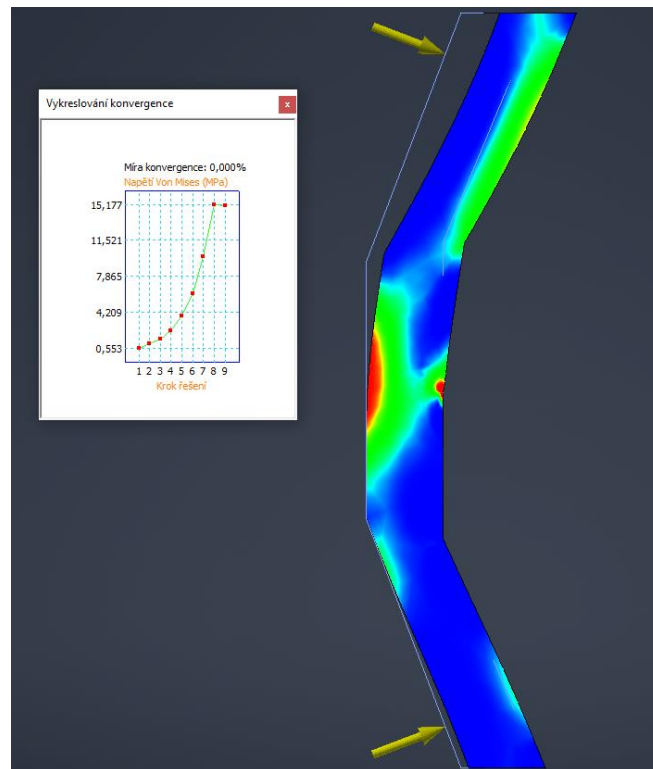
2.3 SILOVÁ ANALÝZA

Na úplném začátku práce jsem si vyzkoušela udělat velmi hrubý model, pouze pro účely vyzkoušení práce s tvarovou optimalizací, ale už tehdy se povedlo udělat zajímavý výsledek. Model jako takový byl rozměrově velmi předimenzovaný, co týče tloušťky a síť se vygenerovala více prostorově, což by pro naše účely bylo z hlediska lukostřelby vcelku složité na výrobu. Prvním krokem byl jednoduchý model pro demonstraci, kde působí největší zatížení, a jak už se dá vypožorovat z předešlých výsledků, na horní polovinu madla působí větší síla a posuv než na spodní. Už teoreticky můžeme říct, že spodní část nebude potřebovat tak silný výplet.



Obr. 9 První přiblížení

Toto se dá vypořádat už i ve starší řadě výrobků Hoyt. Dnešní modely dosti často mají velmi podobně strukturovaný výplet po celé délce, jedná se pouze o estetickou volbu.

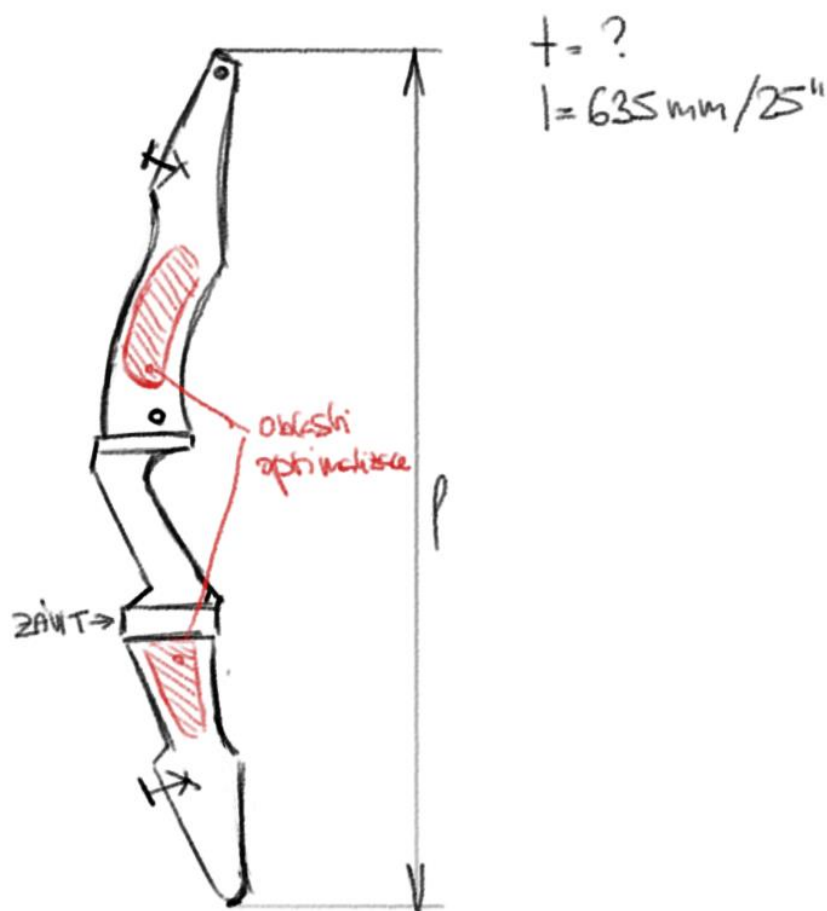


Obr. 10 Ukázka zatížení velmi jednoduchého modelu madla



Obr. 11 V pořadí: Axis, Aerotec, Matrix, Helix, Eclipse a Nexus

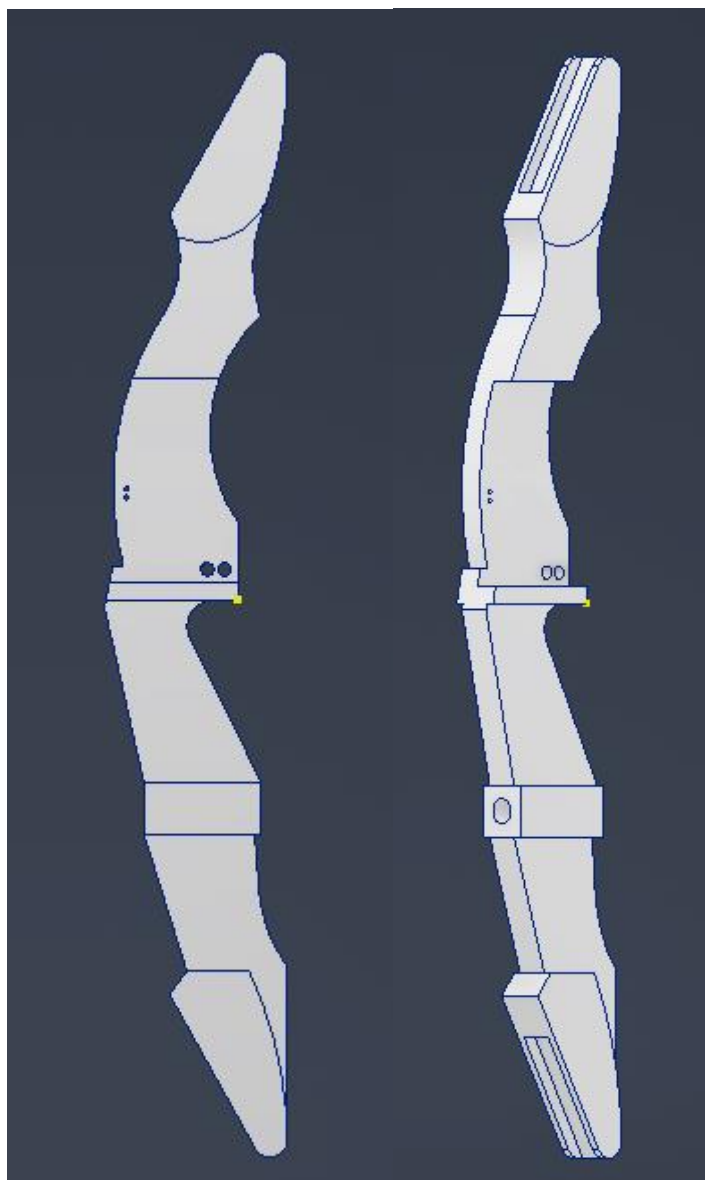
Zde můžeme vidět u některých madel velmi jednoduchý výplet, v podstatě se jedná o pouhé odlehčení a nic jiného. Jedná se o zhruba 20 let starou řadu, ale i osobně znám střelce, kteří tyto madla stále mají a osobně jsem měla Matrix ještě před dvěma roky. Poukazuje to i na dnešní madla a jejich tendenci se přiklánět spíš k designu po estetické stránce než čemukoli jinému. Některé starší modely mají takzvanou vzpěru (viz obr. 10, modely Axis, Aerotec, Helix a Eclipse), jedná se o prvek, který místy vzniká při generativním designu a jistým způsobem napomáhá celkové pevnosti, ale není důležitý a v dnešních madlech se už v podstatě neobjevuje.



Obr. 12 Základní náčrt

Pro začátek jsem si připravila jednoduchý náčrt pro základní tvar mého madla, s kterým jsem dále pracovala. Jedná se o jednoduchý návrh s vyznačenými body, kde se standardně objevuje výplet na madle.

Model byl vytvořen v Autodesk Inventoru Prof. podle tohoto návrhu už s dírami na klapačku, button a stabilizátor, jelikož se jedná o oblasti, které se musí zachovat. Vedení pro ramena, závitová díra pro šroub zámků (slouží k přitahování ramen) jsou zanedbány (zbytečně by tyto prvky komplikovaly síť konečných prvků), ale berou se na ně ohledy při finálním modelování ve tvarové optimalizaci.



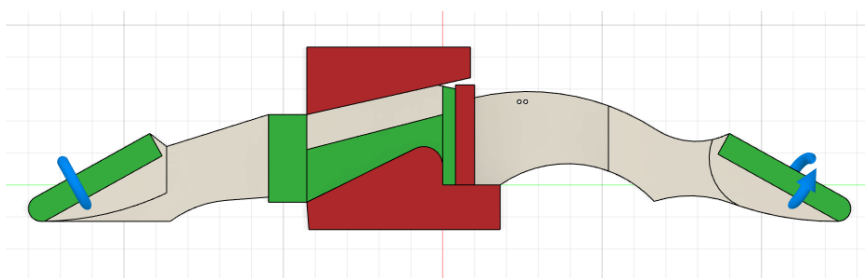
Obr. 13 Základní model, viz příloha 4

2.4 NAVRHOVÁNÍ

2.4.1 GENERATIVNÍ DESIGN

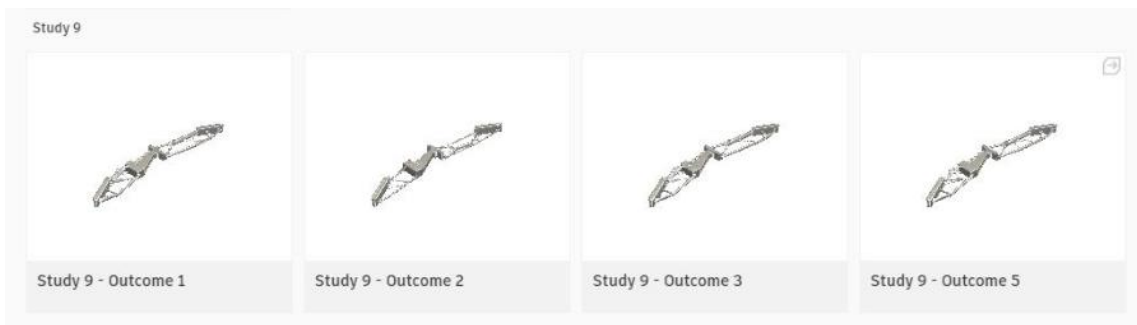
S generativním designem v programu Autodesk Fusion 360 byla velmi zajímavá práce, už pouze kvůli jinému prostředí než má ve škole více vyučovaný Autodesk Inventor Professional (ten neumožňuje generativní design). Práce v cloudu má výhodu v menších nárocích na hardware, ale vyžaduje dobré internetové připojení. Velkou výhodou je možnost ukončit chod programu v počítači, zatímco cloud provádí potřebný výpočet (může trvat několik hodin). Model vytvořený v Inventoru byl importován do programu Fusion 360 a rozdělen na jednotlivá tělesa (*bodies*) pomocí plošných těles. Navíc bylo zapotřebí vytvořit překážkové objekty (*obstacle*) v místech, kde bude mít střelec ruku, čili okolo pevné vazby, a poté v místech zakládky, kudy prochází šíp. Jinak by zde mohl program vygenerovat útvary, které by znemožnily funkci madla.

V místě opěry byla zadána pevná vazba a zatížení bylo zadáno jako kombinace sil a momentů (ohyb, krut), aby se předešlo problémům s tvarovou stabilitou.

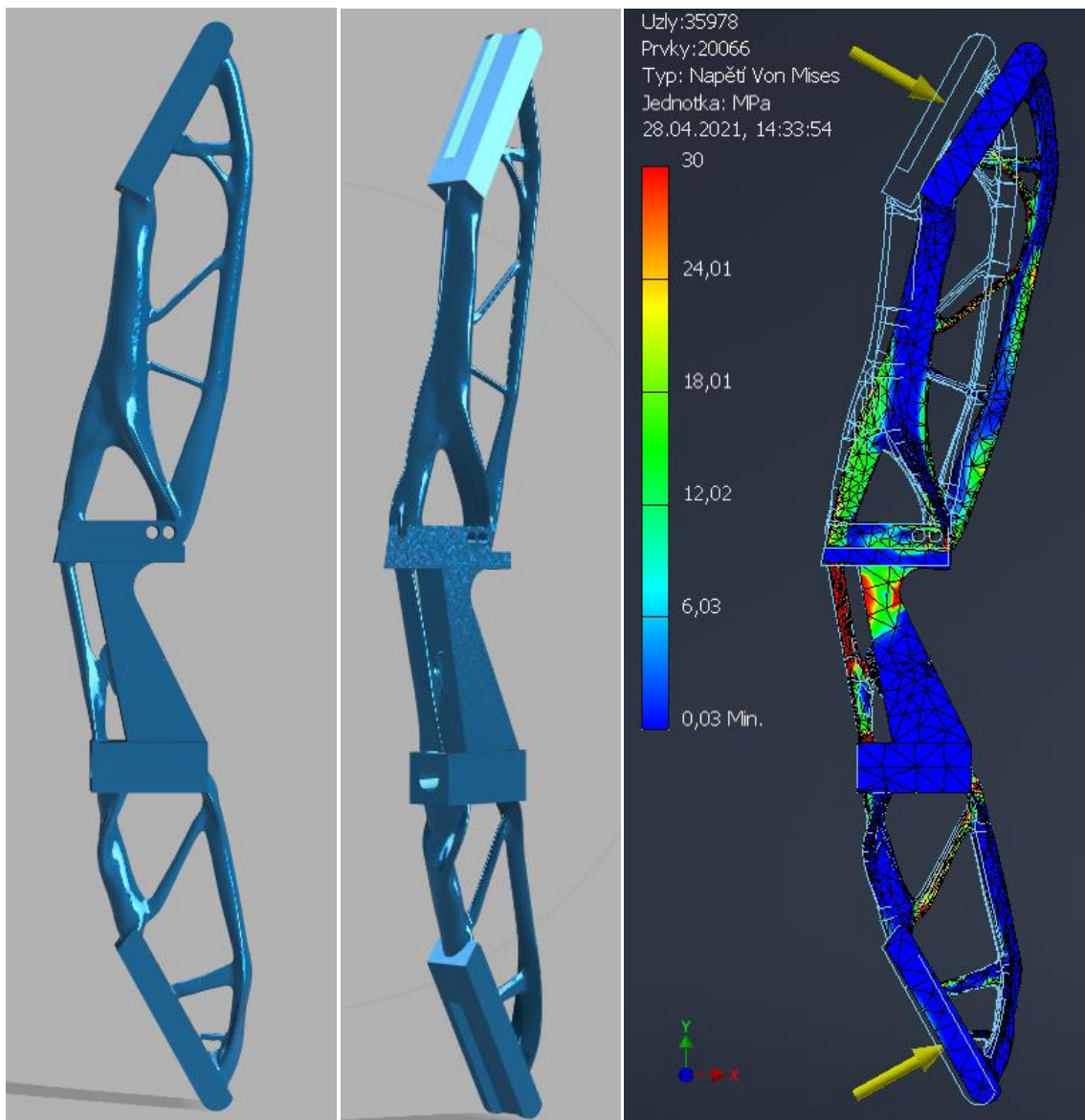


Obr. 14 Zachovávané části zeleně a překážkové objekty červeně

Fusion 360 nabídl několik variant řešení, všechna měla typický bionický vzhled typický pro generativní design, velká většina softwarem doporučených návrhů měla ve finální podobě až příliš jemnou stavbu, která by v praxi nejspíš neuspěla. U generativního návrhu se lze vrátit na libovolné místo výpočtu (probíhá iterativním způsobem) a tím zvolit tvar, který vyhovuje. Návrh číslo 5 v 9. studii měl nejlepší výplet (viz příloha 3). Bylo použito 39. iterace ze 43. Výsledný model je velmi elegantní s trojúhelníkovým výpletem a v několika ohledech lehce připomíná model Exceed od Hoytu. Struktura vychází v pevnostní analýze velmi pěkně, Fusion 360 umožňuje na rozdíl od Inventoru a ověření tvarové stability, ta rovněž vyhovuje. Obecně by stačilo do praxe pár úprav, jako přidání materiálu pro zámky a zjednodušení tvaru do plochy pro snížení nákladů při frézování.



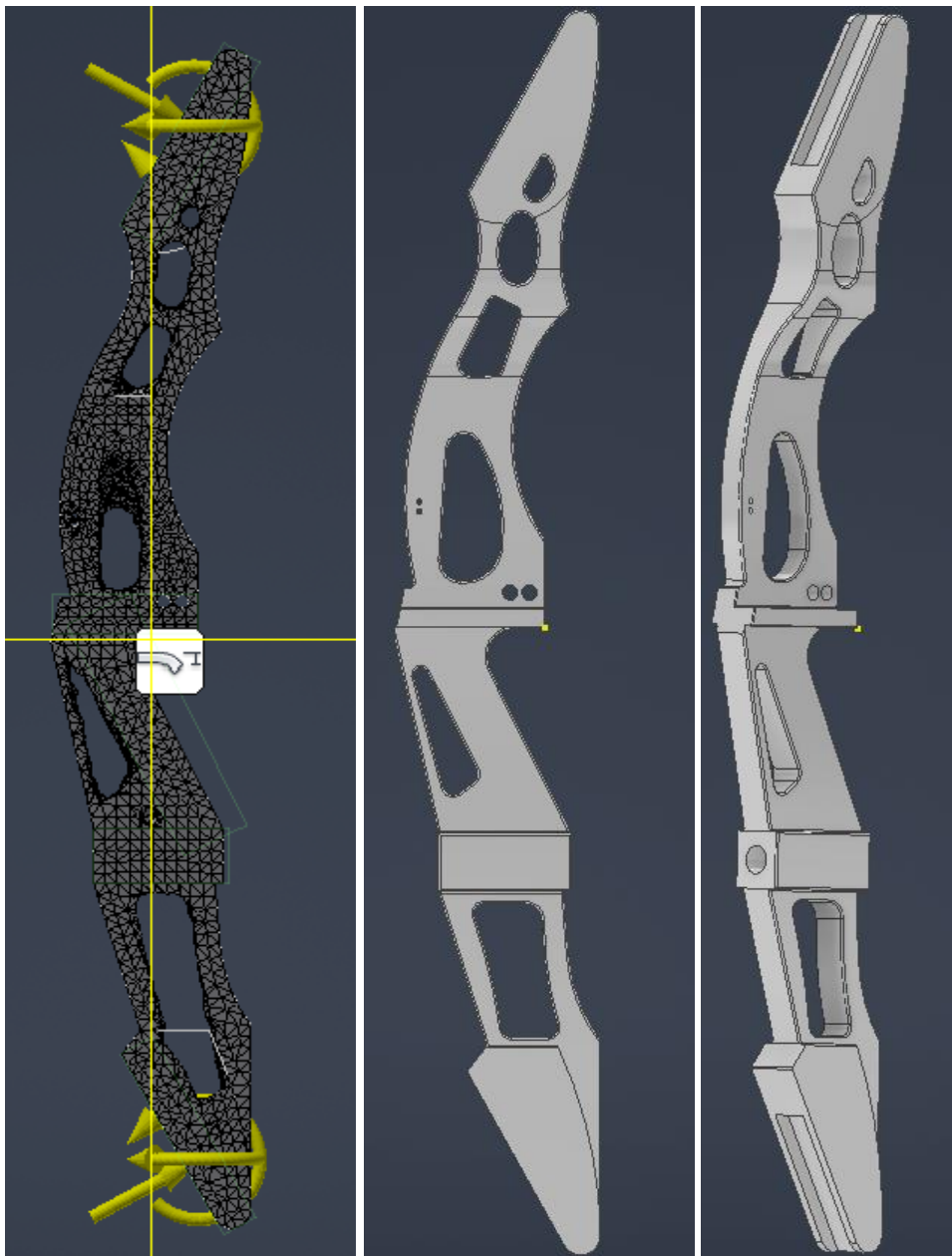
Obr. 15 Ukázky vygenerovaných řešení



Obr. 16 Výsledný model generativního designu a jeho následná pevnostní analýza.

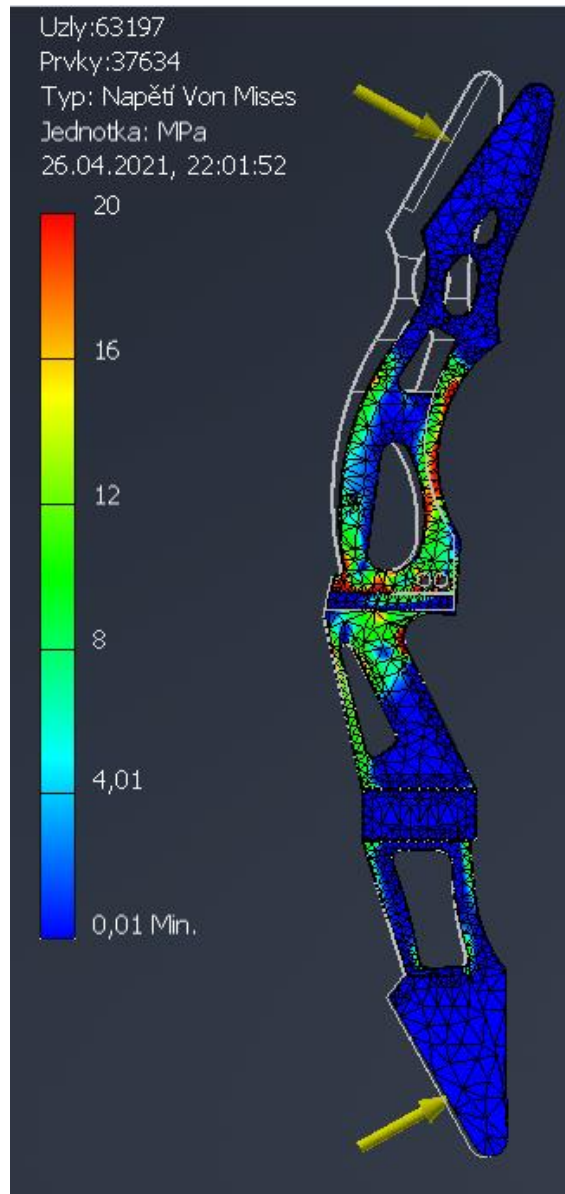
2.4.2 TVAROVÁ OPTIMALIZACE

Zachované oblasti jsou identické jako u předchozího navrhování, a jelikož tvarová optimalizace pracuje pouze s již existujícím materiálem, tak není třeba zadávat překážky. Z výsledné sítě se poté vytvořilo vodítko úpravou stávajícího modelu do finální podoby. Jedná se o velmi jednoduchý model, jednoduchý na výrobu, dost možná by stačila obyčejná tříosá frézka. Ale také je to vizuálně méně atraktivní model sám o sobě. Modelování v Inventoru nedovoluje příliš volné tvary v prostoru, ale výsledný model je již od pohledu pevný a vychází dobře v silové analýze.



Obr. 17 Tvarová optimalizace

Připomíná některé jednodušší modely od Hoytu, tu již zmíněnou střední kvalitu, i když by se do výroby dal výplet ještě více zeslabit.



Obr. 18 Pevnostní analýza

2.5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

I přes velmi podobné podmínky a stejná zatížení se oba dva modely velmi liší. Výsledek tvarové optimalizace je zatím o něco použitelnější v současné praxi a více se podobá realitě, zatímco model, který je výsledkem generativního designu vyžaduje netradiční způsoby výroby (aditivní technologie – 3D tisk). Možnost vybrat si z několika návrhů u generativního designu byla velmi komfortní.

ZÁVĚR

Tato práce shrnula generativní design a tvarovou optimalizaci a rozšířila moje obzory, co se týče navrhování a budoucnosti v tomto ohledu, včetně reality, kde bude výroba probíhat zcela bezvýkresově, vzhledem k výsledným tvarům modelů a celkové digitalizaci průmyslu jako takového. Dále mi tento projekt dal možnost lépe pochopit, jak působí síly na luku, něco, co mě velmi bavilo a nebránila bych se v budoucnu k tomu vrátit, včetně ramen, jakkoliv jsou to výpočtově složitá tělesa. A nakonec samotné modelování, sblížení v práci s Invertorem a seznámení s Fusion 360 pro rozšíření obzorů a práce s cloudovými výpočty. Oba výsledné modely výrazně ukazují už od pohledu rozdíly mezi způsoby navrhování a jsou to velmi zajímavé výsledky, které se blíže přibližují realitě. V praxi by se zatím nejspíše jednalo o hybrid mezi generativním designem a tvarovou optimalizací se silným náhledem k celkové estetice, dnes se madla na vrcholu rovnají kvalitou a hlavním důvod pro volbu je vzhled. Proces vzniku modelů lze těžko poznat, Hoyt ani žádná jiná společnost svá tajemství nevydají, ale byla to velmi zajímavá a obohacující zkušenost se zkusit alespoň přiblížit k jejich práci.

POUŽITÉ PODKLADY

1. *Generativní design: revoluce ve výrobě*. [online] Dostupné z WWW: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/generativni-design-revoluce-ve-vyrobe>>
2. *Hoyt Archery*. [online] Dostupné z WWW: <<https://hoyt.com/>>
3. CHARLES DAPOGNY, PASCAL FREY, *An introduction to shape optimization, with applications in fluid mechanics*. Department of Mathematics, Rutgers University, New Brunswick, NJ, USA 2 Laboratoire J.-L. Lions, UPMC, Paris, France June, 2014 [online] Dostupné z WWW: <<https://www.ljll.math.upmc.fr/~frey/cours/EAFIT/shapeOptim.pdf>>
4. *Hooke's law*. [online] Dostupné z WWW: <<https://www.britannica.com/science/Hookes-law>>

PŘEJATÁ VYOBRAZENÍ

1. Hoyt Archery [online]. Dostupné z WWW: <<https://hoyt.com/>>

11. Pinterest [online]. Dostupné z WWW:
<<https://cz.pinterest.com/pin/581457001870353478/>>