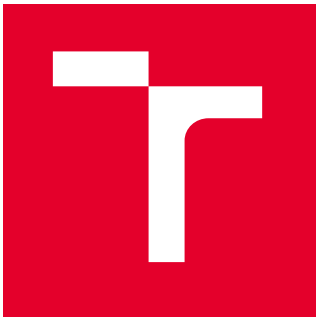


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE MTB PLATFORMOVÉHO PEDÁLU S VYUŽITÍM 3D TISKU

DESIGN OF A MTB FLAT PEDAL USING 3D PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **David Šuman**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **prof. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2025

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	**David Šuman**
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**prof. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.**
Akademický rok:	2024/25

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

Konstrukce MTB platformového pedálu s využitím 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době se mezi bajkery zaměřenými na trail a enduro MTB disciplíny velmi často diskutuje vhodnost použití nášlapů nebo platforem. Platformy neboli ploché pedály s piny jsou daleko vhodnější na techničtější pasáže sjezdu, kde je zapotřebí velmi rychle sundat nohu z pedálu. Navrhnout optimální platformový pedál však není snadné – musí se maximalizovat přenos síly, minimalizovat riziko sklouznutí chodidla, pedál musí být lehký a přitom odolný, přičemž tvarové a barevné řešení hraje také důležitou roli. Proč tedy nevyužít technologii 3D tisku k výrobě optimálních pedálů pro nadšené bikery?

Typ práce: vývojová–konstrukční (strojLAB ÚK)

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout platformový pedál pro MTB trail a enduro disciplíny, jehož konstrukce bude přizpůsobena aditivní výrobě pomocí 3D tisku plastů a bude optimalizována z pohledu maximální stability a přilnavosti podrážky obuvi a zároveň co nejnižší hmotnosti, při respektování ceny pro amatérské užití.
Dílčí cíle bakalářské práce:
– analýza konstrukčních parametrů současné nabídky platformových pedálů, vymezení požadavků uživatelů,
– návrh variantních řešení, zamyšlení se nad velikostí pedálu podle velikosti obuvi,
– nezbytné návrhové výpočty a analýzy (např. pomocí MPK), návrh uložení těla pedálu na ose (návrh kluzných nebo valivých ložisek včetně těsnění),
– návrh detailního řešení pro výrobu pomocí 3D tisku plastů,
– výroba prototypu na 3D tiskárně v dílně strojLAB Ústavu konstruování (tisk těla z plastu + kovové piny + kovová osa včetně ložisek).

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.
Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).
Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:
https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske–studium–ukonceni/

Seznam doporučené literatury:

BINI, Rodrigo Rico a DAGNESE, Frederico. Sistemas de pedivela não-circulares e interfaces pedal-pedivela no ciclismo: uma revisão da literatura. Online. Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano. 2012, roč. 14, č. 4, s. 470-482. ISSN 1980-0037. Dostupné z: https://doi.org/10.5007/1980-0037.2012v14n4p470.

Mohd Shahrizal Dolah, et. al. Practice-led: design factor analysis in developing new mountain bike (MTB) pedal. Online. ALAM CIPTA International Journal on Sustainable Tropical Design Research and Practice. 2022, roč. 15, č. 1, s. 19-23. Dostupné z: https://doi.org/10.47836/AC.15.1.Chapter03.

BUDYNAS, Richard G. a J. Keith NISBETT. Shigleyho konstruování strojních součástí. 2. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2023, 1296 s. ISBN 978-80-214-5471-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem, výrobou a testováním platformového pedálu pro horská kola s využitím technologie 3D tisku. Hlavním cílem bylo navrhnout pedál vhodný pro trailové a enduro disciplíny, který by nabízel nízkou hmotnost a cenovou dostupnost pro hobby uživatele. Na základě analýzy současné nabídky a provedených výpočtů byly navrženy tři různá koncepční řešení, z nichž následně jedno bylo vybráno a dopracováno. Konstrukční návrh byl ověřen numerickou simulací pomocí metody konečných prvků a následně testován v reálných podmínkách. Finální verze pedálu dosáhla hmotnosti 320 g za pár, což jej řadí mezi nejlehčí platformové pedály s vyměnitelnými piny dostupné na trhu. Testování prokázalo dostatečnou pevnost a odolnost při zachování nízké pořizovací ceny. Práce potvrzuje, že technologie 3D tisku umožňuje výrobu plnohodnotného cyklistického komponentu s výhodou snadné opravitelnosti v případě poškození.

KLÍČOVÁ SLOVA

Platformový pedál, MTB, FDM 3D tisk, MKP

ABSTRACT

This bachelor's thesis addresses the structural design, manufacturing, and testing of a platform pedal for mountain bikes using 3D printing technology. The primary objective was to design a pedal suitable for trail and enduro disciplines, offering low weight and affordability for hobby users. Based on an analysis of current market offerings and engineering calculations, three distinct conceptual solutions were proposed, from which one was selected and further refined. The structural design was validated through numerical simulations using the finite element method and subsequently tested under real-world conditions. The final version of the pedal achieved a weight of 320 g per pair, ranking it among the lightest platform pedals with replaceable pins available on the market. Testing demonstrated sufficient strength and durability while maintaining a low acquisition cost. The work confirms that 3D printing technology enables the production of a fully functional cycling component with the advantage of easy repairability in case of damage.

KEYWORDS

Platform pedal, MTB, FDM 3D print, FEM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠUMAN, David. *Konstrukce MTB platformového pedálu s využitím 3D tisku*. Online, bakalářská práce. Martin VRBKA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165404. [cit. 2025-05-18].

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Martinu Vrbkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a inspirativní přístup během celého zpracování práce. Jeho vstřícnost, ochota pomoci a nadšení pro téma byly pro mě velkou oporou při řešení vzniklých problémů i při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za podporu, trpělivost a povzbuzení, které mi poskytovali po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením prof. Ing. Martina Vrbky, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

…….

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD 13

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 14

2.1 Vývoj horské cyklistiky 14

2.1.1 Časová osa nejdůležitějších milníků MTB 16

2.1.2 Dělení disciplín horské cyklistiky 16

2.2 Dělení pedálů a obuvi na kolo 19

2.2.1 Dělení pedálů 19

2.2.2 Speciální obuv pro platformové pedály 21

2.3 Analýza současných výrobců pedálů 22

2.3.1 Srovnání jednotlivých modelů pedálů 23

2.4 Technologie 3D tisku v cyklistice 25

2.4.1 3D tisk na FDM tiskárně 25

2.4.2 Materiál 25

2.4.3 3D tisk v mountain bikingu 27

2.4.4 3D tisk pedálů 28

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE 30

3.1 Analýza problému 30

3.2 Cíl práce 31

3.2.1 Dílčí cíle 31

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ 32

4.1 Volba vhodné osy pedálu 32

4.1.1 Volba ložisek 34

4.2 Volba rozměrů těla pedálu 35

4.3 Výpočet zatížení 36

4.3.1 Statické zatížení 36

4.3.2 Zatížení během šlapání 37

4.3.3 Dynamické zatížení 38

4.4 Materiál pro 3D tisk těla pedálu 40

4.5 Přehled parametrů konstruovaného pedálu 41

4.6 Koncepty pedálů 41

4.6.1 GriPed 42

4.6.2 GeoPed 43

4.6.3 FeetPed 44
4.7 Hodnotící tabulka 45
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ 46
5.1 Konstrukční návrh GeoPedu 46
5.1.1 Uložení osy 46
5.1.2 Piny 47
5.1.3 Krytka 48
5.1.4 Hmotnostní optimalizace těla pedálu 48
5.2 Kontrolní výpočet pedálu pomocí MKP 50
5.3 Nastavení tisku 52
5.4 Testování a optimalizace konstrukčního řešení 53
5.5 Analýza výrobních nákladů 59
6 DISKUZE 61
7 ZÁVĚR 63
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 64
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN 71
9.1 Příklady použitých fyzikálních veličin 71
9.2 Seznam zkratek 71
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 73
11 SEZNAM TABULEK 75
12 SEZNAM PŘÍLOH 76

1 ÚVOD

V posledních letech lze pozorovat výrazný rozvoj technologií aditivní výroby, mezi které patří zejména 3D tisk. Tato metoda umožňuje rychlou a cenově dostupnou výrobu prototypů i finálních výrobků a nachází uplatnění v celé řadě průmyslových odvětví. Jednou z oblastí, kde se 3D tisk začíná stále více prosazovat, je cyklistika, a to nejen při výrobě doplňků, ale i funkčních komponent jízdních kol. Vývoj v oblasti horské cyklistiky je dlouhodobě ovlivňován snahou o snižování hmotnosti, zvyšování odolnosti a individuální přizpůsobení komponent potřebám konkrétního jezdce. Právě možnost rychlého prototypování a snadné výroby náhradních dílů činí z 3D tisku atraktivní volbu pro hobby i profesionální uživatele.

Jedním z komponent, které jsou u horských kol vystaveny vysokému zatížení a zároveň často vyžadují individuální přístup, jsou platformové pedály. Tyto pedály představují zásadní spojení mezi jezdcem a kolem a jejich vlastnosti zásadně ovlivňují komfort, bezpečnost i efektivitu jízdy v terénu. V současné době je na trhu k dispozici široká nabídka komerčně vyráběných pedálů, které se liší použitými materiály, hmotností, konstrukčním řešením i cenou. Přesto většina dostupných modelů neumožňuje jednoduchou výměnu poškozených částí, především těla pedálu, což v případě poškození často znamená nutnost zakoupit celý nový pár pedálů. Zároveň je individuální přizpůsobení barevného provedení omezené možnostmi daného výrobce.

Motivací pro zpracování této práce byla snaha ověřit, zda je možné navrhnout a vyrobit plnohodnotný platformový pedál pro horské kolo s využitím běžně dostupné technologie 3D tisku, který by byl nejen lehký, dostatečně pevný a odolný, ale zároveň cenově dostupný a snadno opravitelný. V rámci práce je nejprve provedena analýza současného stavu poznání v oblasti konstrukce platformových pedálů a možností jejich výroby aditivními technologiemi. Dále jsou stanoveny hlavní konstrukční požadavky s ohledem na ergonomii, hmotnost, pevnost a uživatelský komfort. Následuje vlastní návrh, optimalizace a výroba prototypu pedálu na 3D tiskárně, včetně volby vhodných materiálů a parametrů tisku. Funkčnost navrženého řešení je ověřena numerickými simulacemi a praktickým testováním v terénu. Součástí práce je také ekonomická analýza a zhodnocení možností dalšího rozvoje navrženého řešení. Hlavním cílem práce je vytvořit platformový pedál optimalizovaný pro 3D tisk z plastu, který by umožnil snadnou výrobu náhradních dílů v případě poškození, zároveň cílí na jezdce vyžadující individuální přizpůsobení a barevné sladění s ostatními komponenty kola. Pedál je navržen tak, aby splňoval nároky na použití v trailových a enduro podmínkách, a rozšířil tak současnou nabídku pedálů.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Vývoj horské cyklistiky

Horská cyklistika neboli mountain biking, zkráceně MTB, je druh cyklistiky, která se na rozdíl od té silniční pohybuje v přírodním terénu. Horská kola se začala vyvíjet v sedmdesátých letech 20. století v Kalifornii založením první firmy specializovanou na horská kola [1]. Jedním z prvních významných milníků se stal příchod první odpružené vidlice RockShox RS-1 v roce 1989, viz obr. 2-1 [2; 3]. Faktor odpružení skokově posunul mountain biking kupředu [1]. Nedlouho poté se začínají objevovat i celoodpružené rámy [1].

Obr. 2-1 Horské kolo Kestrel Nitro s první odpruženou vidlicí Rockshox RS-1 [3]

Rok 1998 byl rokem, kdy světlo světa uviděli poprvé hydraulické brzdy, které jsou dnes neodmyslitelnou součástí každého horského kola [1; 2]. Tento vynález začal postupně nahrazovat původní systém ráfkových brzd, jelikož oproti tomuto řešení nabízí výrazně vyšší brzdnou sílu a účinnost především za mokrých podmínek [1]. Hydraulické brzdy nejdříve nahradily ráfkové brzdy v horské cyklistice, kde se jejich větší hmotnost přehlížela hlavně pro jejich vyšší účinnost, nicméně v současné době je hydraulická kotoučová brzda součástí i silničních kol i na té nejvyšší závodnické úrovni [1; 4].

Původní zakladatel první firmy na čistě horská kola Gary Fisher, přišel v roce 2001 s dalším převratným nápadem, s 29palcovým rozměrem kola nahrazující původní, 26palcový standard, viz obr. 2-3 [1]. V té době toto rozhodnutí vyvolalo pozdvižení, přesto dnes je hlavním rozměrem pro horská kola všech disciplín. Tento rozměr doplňuje ještě 27,5palcové kolo, které se v současné době používá především na juniorských kolech a také v kategorii mullet. Označení mullet má horské kolo, které má 29palcové kolo vpředu a zmiňované 27,5palcové vzadu, kde se snaží výrobci vytěžit maximum z obou standardů, průchodnosti terénem většího z kol a obratnosti (nižšího těžiště) menšího [5].

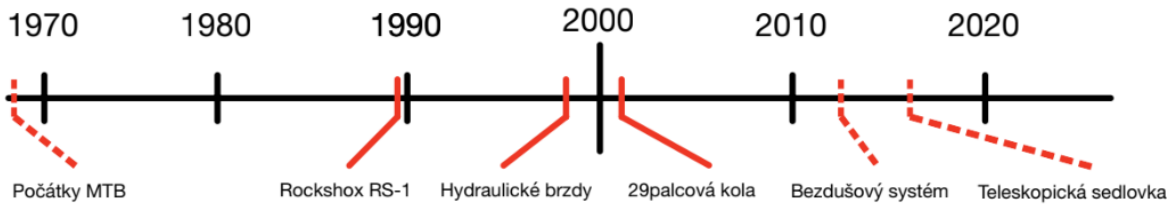
Obrovským posunem v ovladatelnosti kola při sjezdu nejen v těžkých terénních podmínkách bylo sestrojení teleskopické sedlovky, viz obr. 2-2 [6]. Díky této sedlovce je možno pomocí lanka nebo u některých modelů bezdrátově, měnit výšku sedla přímo během jízdy bez zastavení [6]. Sedlovka potom ve sjezdu nebrání jezdci mezi nohama a umožňuje mu lépe pracovat s těžištěm a kolem samotným [6]. První teleskopická sedlovka, v podobě, kterou známe se sice objevila již v roce 1998, ale k jejímu masovému rozšíření došlo především v poslední dekádě, a to hlavně díky jejich osazování na nových kolech [7; 8].

Obr. 2-2 Porovnání první teleskopické sedlovky (dole) se současným moderním řešením (nahoře) [7]

Posledním významným krokem k modernímu horskému kolu provedl vynález bezdušového systému, který je v horské cyklistice velmi využíván, samotné počátky sahají do roku 1999 kdy byl vytvořen Universal System Tubeless. Stejně jako teleskopické sedlovky, se ale tento systém začal hojně využívat až v posledních několika letech, kdy tento standard nahradil jiný, Tubeless Ready, který navíc využívá tekutý tmel. Ten v případě vzniku netěsnosti, díru zalepí a utěsní. Bezdušový systém je tak používán zejména v horské cyklistice, kde plášť zbavený duše se při jízdě chová jinak, je celkově poddajnější, lépe se přizpůsobuje povrchu a tekutý tmel zaceluje poškození vzniklé jízdou v přírodních podmínkách. [9]

Nejen samotné komponenty horských kol, ale také samotné rámy, které horská kola dělají horskými se v průběhu času vyvinuly [1]. Původně vycházely z těch silničních, později však přišlo k výraznému odklonu, především v geometrii rámu a zadní stavby, která je často odpružená [1]. Hliník, ale i ocel a titan jsou kovové materiály používané pro výrobu rámů, nicméně mnoho předních světových výrobců horských kol dnes pro výrobu rámů využívá karbon, který se stal běžným standardem napříč startovními poli různých disciplín horské cyklistiky [10].

2.1.1 Časová osa nejdůležitějších milníků MTB



Obr. 2-3 Časová osa nejdůležitějších milníků při vývoji MTB

2.1.2 Dělení disciplín horské cyklistiky

Horská cyklistika se dělí na několik kategorií lišících se především náročností terénu, přičemž jednotlivé disciplíny sahají od běžného lesního nebo šotolinového ježdění až po extrémně náročné a technické sjezdy [1; 11]. Od jednotlivých kategorií se odvíjejí i typy rámů, materiál, ze kterého jsou vyrobeny, a doplňky, kterými jsou kola osazeny [11].

První kategorií je kategorie XC neboli crosscountry, která je zaměřená na výkonnost jezdce a delší trasy plné úseků vyžadujících šlapání. Jak píše Zdeněk Morávek ve své bakalářské práci, kategorie XC se dále dělí na čtyři podkategorie, kde každá z nich má mírně odlišné parametry a závody v těchto kategoriích mají jiná pravidla [1]. Těmito kategoriemi jsou XCO cross country olympic, XCE cross country eliminator, XCC cross country short circuit a XCM cross country marathon [1]. Kola této kategorie mají převážně 29 palců, v některých případech jsou i celoodpružená, přičemž zdvih se pohybuje okolo 80–100 mm, viz obr. 2-4 [1].

Obr. 2-4 Celoodpružené crosscountry kolo Cannondale Scalpel [12]

Další kategorií s o něco vyššími zdvihy je kategorie TR neboli trail. Tyto kola jsou designována na jízdu s kombinací rychlosti a technických úseků po lesních trasách pro horská kola neboli pro jízdu na trailech [11]. Vyznačují se celoodpruženým rámem se zdvihem od 120 do 150 mm při zachování stále výborných vlastnostech při šlapání [11].

Největší všestranností se pyšní kategorie AM, Allmountain. Tato kategorie počítá už s náročnějšími tratěmi, s větším počtem přírodních, ale i umělých překážek při jízdě z kopce. Geometrie rámů je o něco agresivnější a zdvihy se pohybují okolo 150 mm, viz obr. 2-5. Tato kategorie je proto přesně mezi trail a enduro. [11]

Enduro neboli EN je kategorie horských kol, která je zaměřená na velmi náročné sjezdy, ale stále se zachovanou možností jízdy do kopce [1]. Kategorie vznikla formou závodu, kde cyklisté musí projet co nejrychleji měřený úsek, vyznačující se především klesajícím charakterem a vysokou technickou náročností [1]. Následně se ale musí přemístit zpátky nahoru na start dalšího měřeného úseku (RZ) pomocí vlastních sil [11]. Kola této kategorie obvykle mají zdvih přes 160 mm, mají široké pláště s hrubým vzorkem a geometrií s větším rozvorem kol, která přispívá k vyšší stabilitě [1; 11].

Obr. 2-5 Celoodpružené Allmontain kolo Switchblade firmy Pivot [13]

Královskou disciplínou horských kol je kategorie DH neboli downhill. Jak již název napovídá, kola této kategorie jsou uzpůsobena pouze jízdě dolů z kopce [1]. Tratě bývají extrémně náročné, s kamenitými a kořenovými úseky, které doplňuje množství několikametrových skoků a dropů [1; 11]. Kola mají převážně 200 mm zdvih a geometrii i hmotnost uzpůsobenou primárně na dosažení nejlepšího času při jízdě z kopce, viz obr. 2-6 [11].

Podobnou kategorií jako DH je Freeride, kde se na rozdíl od klasického co nejrychlejšího sjezdu snaží jezdci docílit nejstylovějšího průjezdu tratě [11]. V závodech této kategorie se hodnotí především styl a obtížnost triků [2; 11]. Kola této kategorie musí být uzpůsobena jak obtížnému terénu, tak nárokům jezdců, kteří s nimi triky provádějí [2; 11].

Obr. 2-6 Sjezdové kolo Santa Cruz V10 [14]

2.2 Dělení pedálů a obuvi na kolo

2.2.1 Dělení pedálů

Pedály na kole, ať už na horském nebo silničním nemají vždy stejný tvar a mechanismus uchycení boty. Právě spojení podrážky boty s pedálem je místo, kde rozlišujeme tři hlavní kategorie pedálů [15]. Jsou to nášlapné pedály (anglicky clipless pedals), pedály s klipsnami (anglicky toe-clip/cage pedals) a platformové neboli flat pedals [15].

- Pedály s klipsnami

Pedály s klipsnami jsou běžné napříč komunitou rekreačních cyklistů a těch, kteří například každodenně dojíždějí do práce [15]. Klipsny mohou být, stejně jako těla jednotlivých pedálů, vyrobeny z kovu anebo plastu [15]. Tento typ pedálů je nejvíce jednoduchý na používání, jelikož nevyžaduje žádnou specifickou obuv, a proto vhodný i pro začínající jezdce [15].

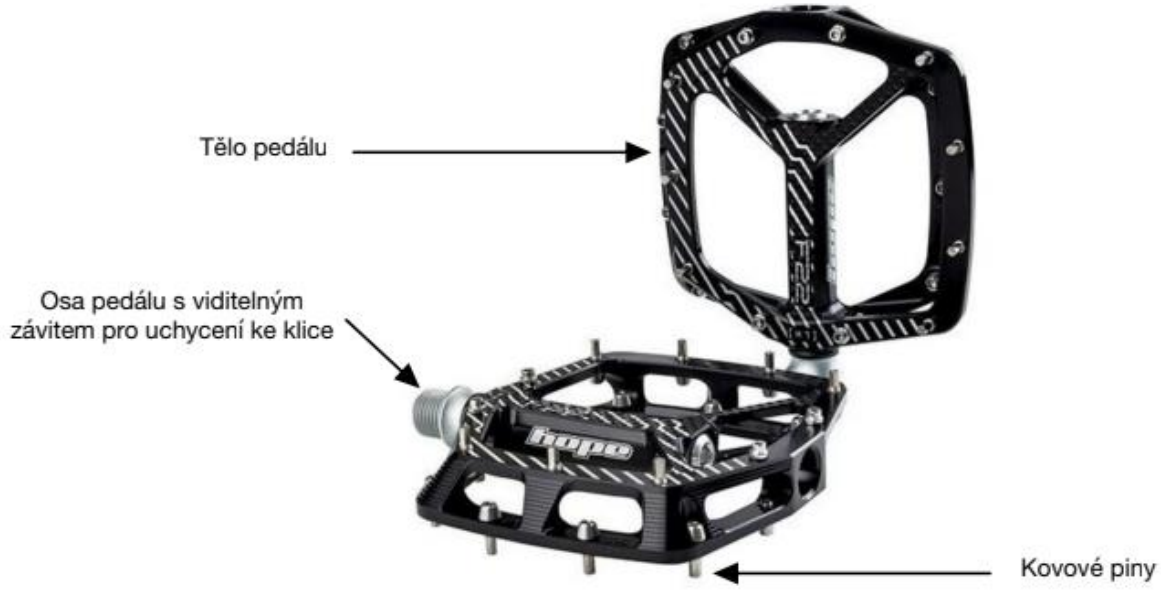
- SPD

Nášlapné pedály zajišťují spojení pomocí mechanického zámku, do kterého se speciálně upravená cyklistická bota s protikusem zacvakne a vytvoří tak pevné spojení jezdcovy nohy s kolem, viz obr. 2-7 [16]. Právě díky pevnému spojení dosahují tyto pedály nejvyšší efektivity ze všech zmiňovaných [17]. Nejčastěji je, díky své efektivitě, využívají silniční cyklisté, ale mohou být použity i v cyklistice horské, pro svoji schopnost pevného a jistého spojení v technicky náročném terénu [15; 16]. Na základě disciplíny, ve které budou použity, jsou potom tyto pedály vyrobeny z různých materiálů. Pro silniční cyklistiku je to karbon a lehké slitiny, pro tu horskou jsou pedály oboustranné a vyrobeny z o něco těžších odolnějších slitin [16]. Použití tohoto typu pedálu ale není pro každého, jelikož je zapotřebí zkušenost s používáním tohoto systému a je nutná speciální obuv [15; 16].

Obr. 2-7 Nášlapný pedál SPD Shimano PD-M520 [18]

- Platformové pedály

Poslední kategorií jsou platformové pedály, které svojí geometrií připomínají plochou platformu [15]. Ty můžeme typicky najít u horských cyklistů, jezdců BMX, ale stejně jako u kategorie klipsnových pedálů, je využívají i např. rekreační jezdci [15]. Z konstrukčního hlediska se platformový pedál skládá ze tří základních částí, osy, těla pedálu a pinů, viz obr. 2-8. Osa společně s ložisky slouží k uchycení pedálu ke klice a zajišťuje jeho rotaci. Tělo pedálu tvoří samotnou platformu, na které spočívá noha jezdce, a je navrženo tak, aby poskytovalo dostatečnou oporu a stabilitu [19]. Piny, což jsou malé šrouby nebo výstupky vystupující z povrchu těla pedálu, zajišťují zvýšenou přilnavost mezi pedálem a podrážkou obuvi [19]. Funkce pinů je zásadní zejména v náročném terénu, kde zabraňují sklouznutí nohy z pedálu a umožňují lepší kontrolu nad kolem. Pro dosažení maximální přilnavosti se často používá speciální obuv s plochou, tuhou podrážkou, která je speciálně navržena pro kontakt s kovovými piny [16]. Noha na pedálu má zároveň větší volnost pohybu. Není nijak pevně uchycena, což jí dává velkou výhodu, protože může rychle reagovat v případě pádu [15]. Tento pedál, díky zmíněným vlastnostem, je ideální jak pro začínajícího, ale i pokročilého jezdce na horském kole.



Obr. 2-8 Platformový pedál Hope F22 s viditelnými kovovými piny po okrajích, upraveno z [20]

2.2.2 Speciální obuv pro platformové pedály

Nejen na silniční nášlapné pedály, ale i na platformové pedály si může cyklista koupit speciální obuv. Ta se od té klasické liší hlavně podrážkou. Ta je speciálně navržena pro použití s platformovými pedály s piny, viz obr. 2-9 [21]. Bota tohoto typu a její podrážka umožňují dostatečně dobrou přilnavost, stabilitu, kontrolu nad kolem a v neposlední řadě také komfort [21]. Správná bota je designovaná na dostatečnou podporu, efektivní přenos síly při šlapání, odolnost proti vodě a také celkovou ochranu nohy od okolních náročných podmínek nejen na trailu [21]. Poslední dobou se nabídka speciální obuvi na horské kolo s platformovými pedály rozšiřuje a jezdec si může vybrat z celé řady výrobců a modelů, pro jednotlivé jízdní styly a disciplíny [21].

Obr. 2-9 Detail kontaktu speciální MTB obuvi Adidas Fiveten s platformovým pedálem [22]

2.3 Analýza současných výrobců pedálů

V současné době je na trhu množství výrobců nabízející své platformové pedály určené pro horská kola. Cyklista tak může vybírat pedál, který bude odpovídat jeho technice jízdy, velikosti nohy, barvě ostatních doplňků a jeho cenovým možnostem. V této kategorii existuje několik cenových úrovní, přičemž hlavním faktorem ovlivňujícím cenu je materiál použitého těla pedálu. Nejlevnější varianty představují plastové nebo kompozitové pedály, kde tělo pedálu tvoří plast (nejčastěji nylon), případně kompozit vyztužený skelným vláknem. Tyto pedály se obvykle pohybují v cenovém rozmezí 800–1 500 Kč v závislosti na tom, zda mají vyměnitelné kovové nebo pevné plastové piny vystupující z těla pedálu.

Dražší platformové pedály jsou vyráběny z kovových slitin. Tyto modely jsou určeny zejména pro náročnější uživatele a jejich cena může dosahovat i k vyšším tisícům korun. Vzhledem k zaměření této práce na konstrukci pedálu z plastu vyrobeného pomocí 3D tisku je v této kapitole věnována pozornost především výrobcům, jejichž pedály cílí na stejnou skupinu hobby uživatelů, jsou rovněž vyrobeny z plastů nebo plastových kompozitů a obsahují vyměnitelné piny, viz obr 2-10.

Mezi značky, jejichž platformové pedály jsou dostupné v cyklistických obchodech v České republice, patří například Deity, RaceFace, Chromag, OneUp, Look, Burgtec, Crankbrothers, HT-components, E-13, Shimano, Specialized a Tatze. Přehled vybraných modelů těchto výrobců, včetně základních technických parametrů, je uveden v hodnotící tabulce 2-1.

Obr. 2-10 Ukázka plastových platformových pedálů, Deity Deftrap (vlevo) [23] a HT pa03a (vpravo) [24] zahrnutých ve srovnávací tabulce

2.3.1 Srovnání jednotlivých modelů pedálů

Hodnotící tabulka 2-1 poskytuje přehledné porovnání vybraných modelů plastových kompozitových platformových pedálů s vyměnitelnými piny, které jsou běžně dostupné na e-shopech v České republice. Do výběru byly zařazeny modely pedálů renomovaných značek, a umožňuje tak relevantní srovnání s předními kompozitovými pedály v této kategorii. Naopak kovové modely pedálů nebyly do výběru zahrnuty, protože jejich zařazení by vedlo k neobjektivnímu srovnání vzhledem k odlišným vlastnostem materiálu a cenové hladině. Důležitým kritériem výběru byla také možnost vyměnitelných pinů, která je typická pro kvalitnější výrobce a zajišťuje lepší přilnavost a servisovatelnost pedálu, viz obr 2-11.

U jednotlivých modelů jsou uvedeny základní technické parametry, jako je cena, rozměry (vždy v pořadí délka × šířka × výška), viz obr. 4-19, použitý materiál, počet pinů na jednu stranu a hmotnost páru pedálů. Tyto údaje umožňují objektivní srovnání jednotlivých modelů a poskytují přehled o aktuálních možnostech výběru v této kategorii.

Obr. 2-11 Pedál Look Trail Fusion zahrnutý ve srovnávací tabulce především kvůli velmi nízké hmotnosti [25]

Tab. 2-1 Srovnání modelů pedálů

Název	Cena	Rozměry (dxšxv) mm	Materiál	Počet pinů na stranu	Hmotnost (pár) g	Citace
Deity Deftrap Pedals	54,99 $	113 x 103 x 18	nylon glass fiber composite	10	391	[26]
RaceFace Chester Pedals	55,00 $	115 x 110 x 16	nylon composite	11	355	[27]
HT Supreme-C / PA32A	55,00 $	101 x 100 x 19	nylon reinforced composite	9	345	[28]
HT pa03a	55,00 $	107 x 105 x 18	nylon reinforced composite	8	350	[29]
LOOK Trail Fusion	50,00 $	104 x 104 x 18	composite	8	324	[30]
Crankbrothers Stamp 1 Gen 2 S	59,99 $	100 x 100 x 15,5	composite	10	321	[31]
Crankbrothers Stamp 1 Gen 2 L	59,99 $	114 x 111 x 15,5	composite	10	348	[32]
Burgtec MK4 Composite Pedals	44,99 £	96 x 102 x 16	nylon and fibreglass	8	376	[33]
OneUp Composite Pedals	54,99 €	115 x 105 x 18,5	nylon composite	10	355	[34]
Chromag Synth	50,00 $	110 x 107 x 15	polycarbonate / nylon	9	380	[35]
Specialized Supacaz Smash	1 900 Kč	110 x 70 x 20	zesílený Thermopoly	10	360	[36]
Tatze CONTACT Composite	69,00 €	103 x 105 x 18	glass fiber reinforced plastic	10	359	[37]

2.4 Technologie 3D tisku v cyklistice

2.4.1 3D tisk na FDM tiskárně

Pro naši práci bylo využito metody FDM (Fused deposition modeling), což je metoda 3D tisku, která spočívá ve vytlačování roztaveného termoplastického vlákna, které je následně po vrstvách ukládáno podle trajektorie definované programem [38]. Materiály, které se častěji nazývají filamenty, určené pro tento typ tisku mají většinou formu vlákna o průměru 1,75 mm a jsou namotané na cívce [38]. Tato metoda umožňuje práci s širokou škálou materiálů od standardních polymerů, jako je kyselina polymléčná (PLA) nebo akrylonitril-butadien-styren (ABS), přes polyethylentereftalát s přídavkem glykolu (PETG), až po kompozitní filamenty např s přídavkem karbonu [39].

2.4.2 Materiál

V současné době existuje na trhu široká škála filamentů využitelných pro 3D tisk metodou FDM [39]. Ne každý má ale vyhovující materiálové vlastnosti pro použití platformového pedálu. Takový materiál musí dobře odolávat mechanickému zatížení působící na pedál během jízdy v různých terénních podmínkách a musí být vhodný pro outdoorové použití. V neposlední řadě je žádoucí, aby materiál byl dostupný v dostatečně široké paletě barev, což umožní uživateli přizpůsobit vzhled pedálu ostatním komponentům jízdního kola.

Pro naši práci byly vybrány dva materiály splňující tyto požadavky a běžně tisknutelné na FDM tiskárnách [39]. Akrylonitril-styren-akrylát (ASA) a polyethylentereftalát s přídavkem glykolu (PETG) pro své vyhovující materiálové vlastnosti, dostupnost, cenu a barevnou rozmanitost, viz obr. 2-12.

- PETG

Polyethylentereftalát s přídavkem glykolu (PETG), což je modifikovaná varianta běžně používaného polyethylentereftalátu (PET), se v poslední době stává stále populárnějším materiálem pro 3D tisk [39]. Glykol, který se přidává k PET, vylepšuje jeho vlastnosti při procesu tisknutí, a aby byl méně křehký [40]. PETG je ceněn zejména pro svou pevnost, pružnost a dobrou tisknutelnost, díky čemuž je vhodný například pro výrobu mechanických dílů, součástí tiskáren nebo ochranných krytů [39; 40]. PETG je oproti běžně používanému PLA pevnější, není tak křehký, má dobrou přilnavost mezi vrstvami a je vhodný pro venkovní použití [40]. Je však třeba mít na paměti, že povrch PETG se může poměrně snadno poškrábat [39].

- ASA

Akrylonitril-styren-akrylát (ASA) je polymerní materiál s výjimečnou odolností vůči vnějším podmínkám, což jej předurčuje pro praktické aplikace, zejména v automobilovém průmyslu [39]. ASA je amorfní termoplast, svými mechanickými vlastnostmi podobný ABS s teplotou skelného přechodu 118,5 °C [41]. Díky své UV stabilizaci, tepelné odolnosti a dlouhodobé trvanlivosti je materiál ASA vhodný pro výrobu komponentů operujících v náročných podmínkách [39]. Nevýhodou tohoto materiálu je jednoznačně silné kroucení tisknutého modelu, způsobené teplotními rozdíly mezi okolím a modelem [42]. Tomuto kroucení lze předcházet zakrytováním tiskárny, které však nemusí být součástí všech modelů tiskáren [42].

Obr. 2-12 Nabídka barev materiálu PETG v jednom z českých e-shopů

2.4.3 3D tisk v mountain bikingu

V současné době se trend 3D tisku v MTB rychle rozšiřuje a rozrůstají se tak možnosti jak pro hobby jezdce, tak i pro profesionály. Na trhu se již roku 2020 objevily první sedla vyrobené pomocí 3D tisku [43]. Roku 2022 je doplnila česká oceňovaná firma Posedla s vlastním přístupem výroby cyklistického sedla na míru [44]. Výhody rychlého prototypování a možnosti rychlého otestovaní koncepčních modelů v plném nasazení využila i značka slunečních brýlí SunGod při závodě Giro di Italia 2023, kde v prvních etapách závodu prototypovala optimální tvar brýlí a ke konci závodu už měla vyvinutý nový produkt [45]. 3D tisk se nevyužívá pouze při výrobě cyklistických doplňků a komponentů, ale stále častěji s ním experimentují také výrobci rámů, kteří zkoumají různé možnosti a přínosy této technologie. Německá firma jízdních kol Canyon v rámci projektu Ride Green přišla s prototypem pevného neodpruženého rámu, vyrobeného pomocí 3D tisku především s důrazem na udržitelnost [46]. Další firmou, která vyrábí části svých rámů je skotská firma Atherton. Ta pro své nejvyšší modely celoodpružených horských kol využívá 3D tisk titanových spojů, do kterých jsou následně vlepeny karbonové trubky tvořící rám viz obr. 2-13 [47]. Technologie 3D tisku tedy postupně nachází uplatnění napříč celým cyklistickým průmyslem nejen při vývoji nových produktů ale i při sériové výrobě.

Obr. 2-13 Detail na titanové 3D tištěné spoje rámu Atherton A170 [48]

2.4.4 3D tisk pedálů

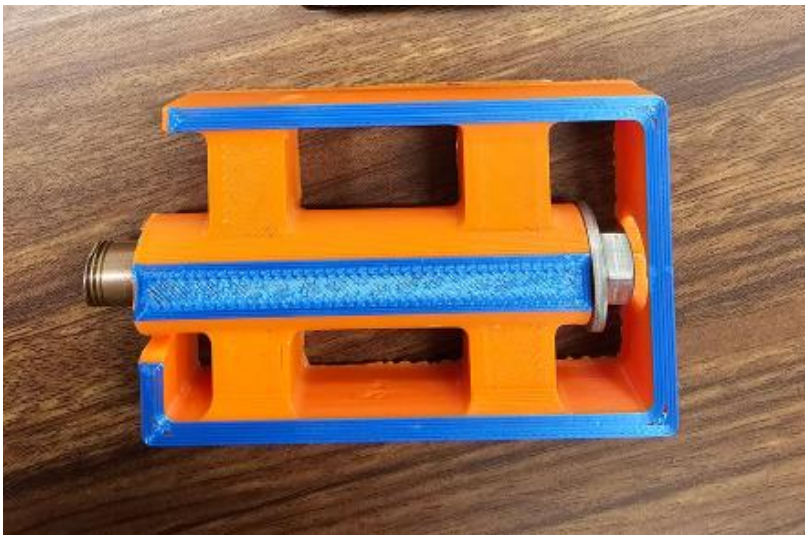
Lze pozorovat rostoucí trend ve využití aditivních technologií pro výrobu cyklistických komponentů, přičemž pedály představují jednu z oblastí, kde se 3D tisk také začíná uplatňovat. Dosavadní analýza trhu však ukazuje, že žádný z etablovaných komerčních výrobců pedálů zatím nemá ve svém portfoliu plnohodnotný model vyrobený pomocí 3D tisku.

Významným pokusem o komerční uplatnění 3D tisku v této oblasti byla iniciativa společnosti Titanum GmbH, která v roce 2021 založila crowdfundingovou kampaň na platformě Kickstarter s cílem uvést na trh nášlapné pedály vyrobené z titanu pomocí aditivní technologie, viz obr. 2-14 [49]. Cenové rozpětí těchto produktů se pohybovalo mezi 247 a 554 eury [50]. V současnosti však nelze dohledat další informace o vývoji tohoto projektu, neboť webové stránky výrobce již nejsou aktivní, což naznačuje možné komplikace při realizaci projektu.

Obr. 2-14 Představený nášlapný pedál společnosti Titanum GmbH [50]

Nejčastěji jsou 3D tištěné pedály vyráběny z běžně dostupných plastových filamentů, jako je PLA nebo PETG, a jejich návrhy jsou často sdíleny na internetových platformách zaměřených na 3D tisk, například Printables. Výjimečně se objevují také realizace z kovových materiálů, například titanu, jejichž výrobní náklady však výrazně převyšují možnosti běžných uživatelů [51].

Analýza těchto amatérských návrhů však ukazuje několik zásadních nedostatků. Například nadměrnou tloušťku profilu, vysokou hmotnost a často absenci pinů, viz obr. 2-15, nezbytných pro zajištění dostatečné přilnavosti mezi pedálem a obuví v terénu. Sami autoři těchto modelů občas uvádějí, že jejich výrobky nejsou vhodné pro trailové využití, což významně omezuje jejich potenciál v oblasti horské cyklistiky [52].



Obr. 2-15 Ukázka jednoho z modelů pedálů na platformě Printables [53]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Na základě rešerše bylo zjištěno, že na internetu se již začínají objevovat produkty vyrobené pomocí 3D tisku, které postupně pronikají napříč celou oblastí mountain bikingu.

Pravděpodobně největším problémem v současné době je, když se jezdci na horském kole podaří při pádu zničit tělo plastového pedálu, tak si nemůže koupit náhradní díl. Zbude mu tak kovová osa a druhý pedál. Většina výrobců v dnešní době nabízí náhradní sadu (rebuild kit), která obsahuje ložiska či osu pedálu, nikoliv však už nejvíce exponované tělo pedálu. Řešení všech náhradních dílů pedálu nabízí pouze někteří výrobci a pouze u svých nejvyšších a nejdražších modelů. Hobby jezdcům tak nezbývá nic jiného než si koupit celý nový pár pedálů, protože samostatně se pedály nikdy neprodávají.

Využití 3D tisku při výrobě platformového pedálu však může tento problém efektivně řešit, neboť umožňuje snadnou výrobu náhradního těla pedálu přesně dle aktuálních potřeb jezdce. Zároveň tato technologie poskytuje větší možnost individuální volby barevného provedení, což hobby jezdcům umožňuje přizpůsobit vzhled pedálu vlastním preferencím a sladit jej s designem jejich kola. Významnou výhodou je také snížení nákladů na údržbu horského kola, protože není nutné pořizovat celý nový pár pedálů, ale stačí jednoduše vyměnit pouze poškozený díl.

O výrobu 3D tištěných variant se v minulosti pokoušeli někteří tvůrci, avšak tyto realizace byly převážně na amatérské úrovni. Podle dostupných publikovaných modelů nejsou tyto produkty vhodné pro použití v náročnějších podmínkách, například na trailových tratích, nebo ekonomicky nedosažitelné pro běžné uživatele. Kromě omezené odolnosti je jejich nevýhodou také vyšší hmotnost ve srovnání s běžně dostupnými pedály.

Tato oblast tedy představuje prostor pro další výzkum a vývoj, se zaměřením na konstrukční řešení optimalizované pro 3D tisk, volbu vhodných materiálů a parametrů, které zajistí výrobu plnohodnotného platformového pedálu využitelného i na trailových tratích.

3.2 Cíl práce

Cílem této práce je návrh, konstrukční řešení, výroba a testování platformového pedálu pro MTB trail a enduro disciplíny, jehož konstrukce bude přizpůsobena aditivní výrobě, pomocí 3D tisku plastů. Pedál bude optimalizován z pohledu maximální stability a přilnavosti podrážky obuvi při současném dosažení co nejnižší hmotnosti, to vše při respektování cenové dostupnosti pro amatérské uživatele. Navržený pedál bude představovat alternativu ke komerčním produktům, s důrazem na možnost výměny jednotlivých komponent v případě poškození.

3.2.1 Dílčí cíle

- Analýza konstrukčních parametrů současné nabídky platformových pedálů pro trail a enduro disciplíny.
- Návrh konstrukčního řešení optimalizovaného pro tisk na 3D tiskárně využívající technologii FDM, při současném zachování minimální hmotnosti s přihlédnutím na ergonomii.
- Provedení návrhových výpočtů a analýz pomocí metody konečných prvků.
- Výroba funkčního prototypu na 3D tiskárně v dílně strojLAB Ústavu konstruování, zahrnující tištěné tělo z plastu, kovové piny a kovovou osu včetně ložisek.
- Ověření funkčnosti testováním v reálných podmínkách.
- Zhodnocení výsledků.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Volba vhodné osy pedálu

Tato kapitola se zabývá výběrem vhodné osy pro navrhovaný pedál. Vzhledem k tomu, že pedál je určen pro hobby jezdce a nepředpokládá se hromadná výroba, bylo zvoleno řešení nákupu komerční osy od jednoho z výrobců.

Naprostá většina moderních pedálů, nehledě na disciplínu, má stejné uchycení do kliky pomocí závitu. Toto uchycení je realizované pomocí závitu 9/16 inches × 20 TPI, tedy 9/16 palce × 20 závitů na palec, s pravým závitem na pravé klice a levým na levé. Tento rozměr lze považovat v dnešní době již za standard. Výjimkou mohou být dětská kola, nebo kola BMX, kde se může vyskytovat závit jiný.

V současné době existuje na trhu nespočet typů os od velkého množství výrobců pedálů (kap. 2.3), kteří tyto osy nabízejí jako náhradní díly ke svým, již stávajícím modelům. Protože mnoho výrobců MTB pedálů zároveň vyrábí i další komponenty na kolo a pedály nejsou jejich hlavním výrobním artiklem, byl vybrán výrobce HT-components. HT-components je Tchajwanská firma světových rozměrů, která se specializuje na výrobu pedálů a sponzoruje úspěšné jezdce na světových pohárech horských kol napříč různými kategoriemi [54]. Zároveň jsou jejich pedály stejně jako náhradní díly v České republice snadno dostupné na mnoha tuzemských e-shopech. V neposlední řadě bylo pohlíženo i k pořizovacím cenám náhradních dílů, protože výsledný konstruovaný pedál by měl konkurovat stávající nabídce i po cenové stránce.

Po rešerši trhu byla zvolena osa s názvem NANO-S, která je použita v pedálu Supreme ANS10. Tyto platformové pedály, určené pro velmi náročný terén a patřící do série HT NANO, byly podle výrobce navrženy s důrazem na nízkou hmotnost při zachování vysoké spolehlivosti za jakýchkoli podmínek [55]. Výrobce dále uvádí, že díky zapouzdřeným ložiskům a odolným osám patří tyto pedály k nejodolnějším na světě [55].

Tyto CNC-obráběné chrom-molybdenové osy, zobrazené na obrázku 4-16, disponují třemi precizně obrobenými plochami určenými pro uložení ložisek a závitem situovaným na jejich konci. První ložisko, umístěné v axiálním směru nejblíže ke klice jízdního kola, představuje radiální kluzné ložisko o rozměrech 9/11x10 mm (vnitřní/vnější průměr x šířka), vyrobené z výrobcem nespecifikovaného polymerního materiálu. Druhé ložisko je rovněž radiálního kluzného typu s rozměry 6/9x10 mm, vyrobené ze shodného materiálu jako ložisko první. Poslední z ložisek je radiální kuličkové jednořadé ložisko 5/11x10 mm zapouzdřené z obou stran.

Obr. 4-16 Použitá osa HT NANO-S ANS10 [56]

Z konstrukčního hlediska je nutno podotknout, že obě kluzná ložiska není možné zajistit proti axiálnímu posuvu, a je proto nezbytné, aby tělo pedálu svou geometrií tento axiální pohyb zabezpečilo. Radiální kuličkové ložisko je proti axiálnímu pohybu zajištěno kombinací osazení na ose z jedné strany a pojistnou maticí M5 s polyamidovou vložkou ze strany druhé. Závit této matice je navržen tak, aby při šlapacím pohybu docházelo k jejímu dotahování – tedy na pravém pedálu je aplikován levý závit matice a analogicky na levém pedálu pravý závit. Axiální síla vzniklá dotažením matice je následně rovnoměrně distribuována na ložisko prostřednictvím speciálně tvarované podložky, která je uzpůsobena pro optimální kontakt s valivým ložiskem.

Tato osa byla zvolena zejména s ohledem na její geometrii, která umožňuje použití tří ložisek s dostatečně velkou styčnou plochou pro efektivní rozložení sil, což vede k menším deformacím na kontaktních místech. Výběr této osy byl dále podpořen jejími vlastnostmi, jako je konstrukce určená pro náročný terén, nízký profil a použití zapouzdřených ložisek. Tyto faktory byly rozhodující pro její zařazení do konstrukčního řešení platformového pedálu navrženého v rámci této práce.

4.1.1 Volba ložisek

Pro výběr ložisek byla zvolena varianta zakoupení tzv. Rebuild kitu, který je určen pro daný typ osy a je vyráběn stejným výrobcem. Tento kit společně s osou je dostupný prostřednictvím mnoha tuzemských e-shopů a v době psaní této práce nepředstavuje jejich objednání žádný problém. Obsahem Rebuild kitu, který je vidět na obrázku 4-17, jsou všechna ložiska potřebná pro oba pedály, dvě speciální podložky pro styk s kuličkovými ložisky, pojistné matice a sada těsnících kroužků pro utěsnění útrob pedálů od okolního prostředí. Hobby jezdec, pro něhož je pedál primárně určen, může jednoduše objednat pedálové osy a k nim příslušný Rebuild kit, přičemž se vyhne komplikacím spojeným s vyhledáváním tří odlišných typů ložisek, podložek a pojistných matic. Další výhodou tohoto přístupu je jistota, že zakoupené komponenty budou plně kompatibilní s osou pedálu a díky stanoveným výrobním tolerancím budou optimálně pasovat do těla 3D tištěného pedálu, viz obr 4-18.

Obr. 4-17 Rebuild kit použitý při konstrukci pedálu

Obr. 4-18 Osa ložisky, maticí a těsněním

4.2 Volba rozměrů těla pedálu

Dalším důležitým parametrem pro návrh těla pedálu jsou jeho hlavní vnější rozměry. Ty by měly zohledňovat velikost boty jednotlivých jezdců a současně zachovat co nejtenčí profil pro vysokou průchodnost terénem. Příliš široký pedál nejen zvětšuje rameno působiště síly od nohy na pedál vzhledem k ložiskům a tedy i celkový ohybový moment, ale také by mohl negativně ovlivnit průchodnost kola v úzkých pasážích trailu, kde je okraj pedálu často nejširším bodem kola. To může negativně ovlivnit průchodnost horského kola úzkými pasážemi trailu a zvyšovat tak riziko kolize s okolím.

Z provedené rešerše pedálů na trhu vyplývá, že většina výrobců se pohybuje s rozměry v rozmezí šířky 96–107 mm, délky 101–115 mm a výšky profilu 15–19 mm. Tyto rozměry korespondují i s rozptylem šířek chodidel jezdců, které se mezi jednotlivci výrazně liší. Pro návrh univerzálního pedálu je proto nutné zvolit takové rozměry, které budou vyhovovat co nejširšímu spektru uživatelů. Podle studie pana Jurce, která porovnávala 3D skeny 1,2 milionu chodidel, vyplývá, že největší počet mužů na evropském kontinentě má délku chodidla 270 mm [57]. Mužská noha této délky má potom obvyklou šířku okolo 103 mm [57]. Pro dámská chodidla jsou tyto hodnoty menší, evropské ženy mají nejčastěji 245 mm na délku a 94 mm na šířku [57].

Obr. 4-19 Popis hlavních rozměrů pedálu, upraveno z [58]

Z provedené analýzy trhu (viz tab. 2-1) i posouzení výsledků dat z práce pana Jurce byly pro návrh zvoleny rozměry 100 × 110 mm (šířka × délka). Tyto rozměry odpovídají nejběžnějším velikostem mužských i ženských chodidel a zároveň zohledňují konstrukční požadavky, zejména použití plastového materiálu, který má nižší odolnost vůči ohybovému namáhání než kov. Navržené rozměry tak představují kompromis mezi ergonomií, mechanickou odolností, nízkým profilem a zachováním dobré průchodnosti terénem i nízké hmotnosti pedálu.

4.3 Výpočet zatížení

Posledním velmi důležitým aspektem při vývoji konstrukce MTB pedálu je analýza zatížení, které bude na pedál během jízdy působit. Tělo pedálu musí odolávat různým situacím, ve kterých na plochu pedálu působí různé síly. Zatěžování pedálu bychom mohli rozdělit do tří kategorií. Statické zatížení, zatížení působící na pedál při šlapání a v neposlední řadě také dynamické zatěžování vznikající během jízdy.

4.3.1 Statické zatížení

Statickému zatížení je pedál vystaven v situacích, kdy jezdec přenáší celou svou hmotnost na pedály, aniž by seděl na sedle. Typickým příkladem je jízda ve stoje, například při krátkém odpočinku bez šlapání. V těchto případech působí na každý pedál významná část celkové hmotnosti jezdce včetně vybavení, což představuje zásadní návrhový parametr z hlediska pevnosti a bezpečnosti konstrukce.

Hmotnost jezdce je hlavním faktorem ovlivňujícím velikost působící síly. Výrobci rámů jízdních kol proto často stanovují maximální přípustnou hmotnost, kterou může kolo včetně jezdce a veškerého vybavení nést [59]. Tato hodnota bývá u předních výrobců standardně stanovena na 300 lb, tedy 136 kg [59]. Tato mezní hodnota je určující nejen pro samotný rám, ale i pro všechny ostatní komponenty včetně pedálů, které musí být navrženy tak, aby tomuto zatížení spolehlivě odolaly. Z tohoto důvodu je nezbytné při konstrukci pedálu počítat s maximálním statickým zatížením, odpovídajícím této hmotnosti.

- Výpočet statického zatížení

$$F_{stat} = \frac{m_{max} \cdot g}{2} = \frac{136\ kg\ \cdot 9{,}81\ \mathrm{m\,s^{-2}}}{2} = 667{,}08\ \mathrm{N} \tag{1}$$

Tato hodnota tedy reprezentuje sílu, která působí na každý pedál, při nejvyšší přípustné hmotnosti pro samotný rám kola, což zajišťuje dostatečnou bezpečnostní rezervu.

4.3.2 Zatížení během šlapání

Pedál je při šlapání vystaven komplexnímu zatížení, které je výsledkem sil a momentů, vyvíjených jezdcem během celého šlapacího cyklu. Tomuto zatěžování je tedy pedál vystavován při jízdě nejčastěji. Studie Biniho a jeho kolegů [60] se zabývala tomuto komplexnímu zatěžování a efektivitě šlapání. Data byla měřena pomocí senzorů síly, které snímaly síly vyvíjené na pedál ve třech směrech (x,y,z), během celého otočení kliky o 360° a následně byla vyhodnocena efektivita záběru [60]. Během experimentu s 11 kompetitivními cyklisty byly měřeny síly maximálního aerobního výkonu [60]. Tyto naměřené síly působící v jednotlivých směrech byly následně sečteny v jednu, výslednou sílu a vyneseny do grafu [60]. Maximální výsledná síla působící na pedál v průběhu celého otočení kliky dosahovala hodnoty 450 N [60].

Jelikož je ale šlapání na kole velmi komplexní pohyb, může změna geometrie rámu kola výrazně ovlivnit efektivitu šlapání, a tedy i sílu vyvíjenou jezdcem na pedál. Tomuto problému se věnovali Devys a jeho kolegové [61], kteří ve své studii porovnávali rozdíly mezi silničním a horským kolem. Studie porovnávala výkony 10 poloprofesionálních mountain bikerů při 65 %, 90 % a 115 % maximálního úsilí vyvíjeného při šlapání na horském a silničním kole [61]. Ze studie je patrné, že největšímu zatížení na pedál na horském kole dochází při 115 % vyvíjeného úsilí. Konkrétně odpovídá 6,7 N/kg, protože tato studie aproximovala zatížení vzhledem k hmotnosti jezdce [61].

Z odvozené závislosti ve studii můžeme vypočítat zatížení pro nejkritičtější situaci, tedy že hmotnost jezdce je maximálních 136 kg.

- Výpočet zatížení během šlapání

$$F_{ped} = m_{max} \cdot n = 136\ \text{kg} \cdot 6{,}7\ \text{N kg}^{-1} = 911{,}2\ \text{N} \qquad (2)$$

Z provedených studií je vidět, že během jedné otočky je dosahováno rozdílných sil, působících na pedál a rozdílné efektivity šlapání. Právě snaha o maximální efektivitu při šlapání může snižovat zatížení na pedál [62]. Maximální efektivity je dosahováno právě tehdy, když je výsledná síla působící na pedál kolmá ke směru otáčení [62]. Ze studie Franzisky Onasch [62] je vidět, že pokud se nezaměřujeme na efektivitu šlapání ale pouze na co největší sílu vyvinutou na pedál, dostaneme průměrně hodnotu 988 N.

4.3.3 Dynamické zatížení

Posledním typem zatížení pedálu, které je třeba analyzovat, je dynamické zatížení. Toto zatížení vzniká při jízdě na horském kole v členitém terénu, zejména při přejezdu nerovností a při skocích, které výrazně namáhají celou konstrukci jízdního kola včetně všech jeho komponentů.

Vzhledem ke komplexnosti dynamického zatížení působícího na horské kolo v různorodém terénu je nezbytné zavést určitá zjednodušení, která umožní výpočet hodnot co nejvíce se blížících reálným provozním podmínkám. Pro účely tohoto výpočtu je nejprve nutné specifikovat kategorii horských kol, pro které je navrhovaný platformový pedál určen.

Vyvíjený pedál bude určen pro trailové/endurové kolo. Tato kategorie je popsána a vymezena mezinárodní normou ASTM F2043-13, která definuje kategorii 4 jako jízdu v těžkém offroadovém terénu, ve kterém se mohou vykonávat skoky a seskoky z maximální výšky 122 cm [63]. Na základě této normy, je možné vypočítat reakční sílu působící na pedál při dopadu jezdce na rovnou plochu z uvedené maximální výšky.

Pro výpočet zatížení je dále potřeba stanovit průměrnou hmotnost horského kola. Tato hodnota je obtížně stanovitelná, neboť v současnosti neexistuje jednotná metrika, kterou by se výrobci kol řídili. Hmotnost kola se významně liší v závislosti na velikosti rámu a úrovni modelových řad osazených komponentů. Průměrná hmotnost trailového/endurového kola se pohybuje okolo 14,3 kg [64].

Poslední veličinou, kterou je potřeba znát pro výpočet, je čas, za který stihne jezdec zabrzdit po dopadu z maximální výšky 122 cm. To je opět velmi složitá problematika, která nelze jednoduše vyjádřit. Při měření totiž záleží na velkém množství aspektů. Tvrdosti podložky, tlaku v pneumatikách, nastavení tlumičů, geometrii kola. Také záleží, jak rychle dokáže samotné tělo jezdce zastavit při doskoku z dané výšky. Jill L. McNitt-Gray ve své studii uvádí, že profesionální gymnasté dokážou zabrzdit při seskoku z výšky 1,28 m za 0,237 s, kdežto rekreační atleti za 0,292 s [65]. Do našeho výpočtu použijeme hodnotu naměřenou u profesionálních atletů, jelikož nám posune výpočet více k bezpečné straně, protože kratší čas potřebný na zastavení, znamená větší vyvozenou sílu.

Výpočet tedy vychází z následujících parametrů: maximální možná hmotnost jezdce, maximální výška skoku pro danou kategorii kola a průměrná hmotnost jízdního kola. Pro zjednodušení výpočetního modelu je dále zanedbán odpor vzduchu, který by během skoku působil proti pohybu jezdce. Za těchto stanovených podmínek lze vypočítat průměrné zatížení, které působí na pedál při dopadu jezdce na rovnou plochu.

Pro vyjádření výsledné síly od dynamického zatížení nejdříve musíme vypočítat, jakou rychlost bude mít jezdec v momentě těsně před dopadem. Pro to využijeme zákon zachování energie.

- Zákon zachování energie

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} \tag{3}$$

$$m \cdot g \cdot h + 0 = 0 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \tag{4}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \tag{5}$$

- Dosadíme a vyjádříme dopadovou rychlost

$$v_{dopad} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\ \mathrm{m\ s^{-2}} \cdot 1{,}22\ \mathrm{m}} \tag{6}$$

$$v_{dopad} = 4{,}892\ \mathrm{m\ s^{-1}} \tag{7}$$

- Vyjádření zrychlení z druhého Newtonova zákona

$$F = m \cdot a \tag{8}$$

$$a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{9}$$

$$a \cdot \mathrm{d}t = \mathrm{d}v \tag{10}$$

$$\int_0^t a \cdot \mathrm{d}t = \int_0^v \mathrm{d}v \tag{11}$$

- Dosadíme meze integrace (pro t = 0,237 s, pro v = 4,892 m s^{-1})

$$\int_0^{0{,}237} a \cdot \mathrm{d}t = \int_0^{4{,}892} \mathrm{d}v \tag{12}$$

$$a \cdot 0{,}237\ \mathrm{s} = 4{,}892\ \mathrm{m\ s^{-1}} \tag{13}$$

$$a = \frac{4{,}892\ \mathrm{m\ s^{-1}}}{0{,}237\ \mathrm{s}} \tag{14}$$

$$a = 20{,}643\ \mathrm{m\ s^{-2}} \tag{15}$$

- Výsledné zrychlení dosadíme zpět do Newtonova druhého zákona

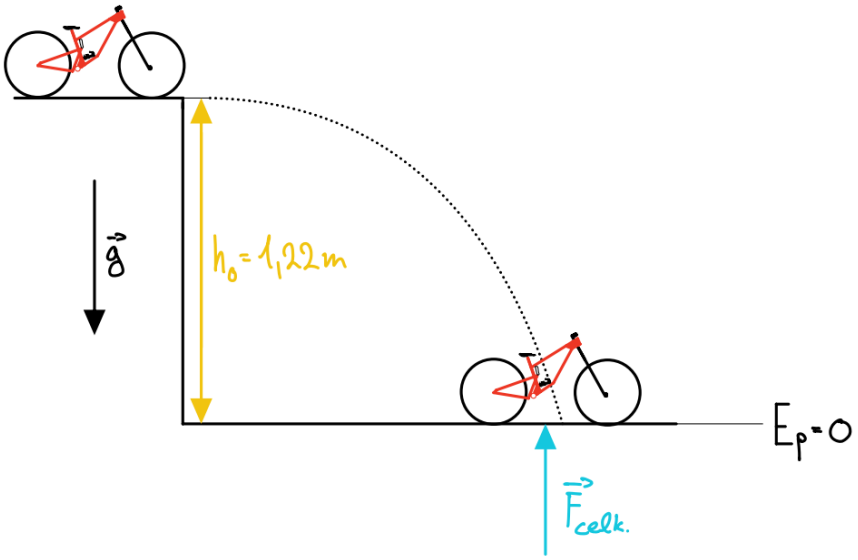
$$F_{celk} = (m_{max} + m_{kola}) \cdot a \tag{16}$$

$$F_{celk} = (136\ \mathrm{kg} + 14{,}3\ \mathrm{kg}) \cdot 20{,}643\ \mathrm{m\ s^{-1}} \tag{17}$$

$$F_{celk} = 3102{,}7\ \mathrm{N} \tag{18}$$

- Celkovou sílu podělíme dvěma, pro výslednou sílu působící na jeden pedál

$$F_{dyn} = \frac{F_{celk}}{2} = \frac{3102{,}7\ \text{N}}{2} = 1551{,}35\ \text{N} \tag{19}$$



Obr. 4-20 Symbolický nákres situace při dynamickém zatížení

Na základě studií a provedených výpočtů byly stanoveny konkrétní hodnoty sil působících na pedál při jednotlivých typech zatížení. Ve všech případech bylo uvažováno s nejnepříznivějšími možnými podmínkami, které mohou v provozu nastat. Z výsledků je patrné, že nejvyšší zatížení pedálu vzniká při dynamickém zatížení. Pro následné simulace byla proto zvolena síla F = 1551,35 N, která reprezentuje tuto nejkritičtější situaci. Tyto parametry nám tak zajistí dostatečnou míru bezpečnosti.

4.4 Materiál pro 3D tisk těla pedálu

Pro naši práci byl na základě analýzy zvolen materiál PETG pro své výrazně lepší tiskové vlastnosti při zachovaných vyhovujících materiálových vlastnostech, dostupnosti, ceně a dostatečné barevné rozmanitosti viz obr. 2-12. PETG oproti materiálu ASA nepodléhá tak výraznému smršťování a kroucení tisknutého modelu, a proto nevyžaduje žádné zakrytování tiskárny. Díky výrazně menší tendenci k smršťování tak lze dosáhnout konzistentnějších výsledků při tisku a přesnějších tolerancí potřebných pro správné fungování ložisek společně s osou pedálu.

4.5 Přehled parametrů konstruovaného pedálu

Tab. 4-2 Tabulka parametrů konstruovaného pedálu

Požadavky na tělo pedálu

Šířka	100 mm
Délka	110 mm
Výška	Nejnižší možná
Odolnost vůči zatížení	1551,31 N
Hmotnost	Nejnižší možná
Materiál těla pedálu	PETG
Kompatibilita s osou	HT NANO-S ANS10
Počet ložisek	3

Požadavky na piny

Počet pinů	min. 10
Vlastnosti	Kovové, vyměnitelné

Požadavky na krytku

Materiál krytky pedálu	PETG
Vlastnosti	Těsnost, montáž pomocí závitu

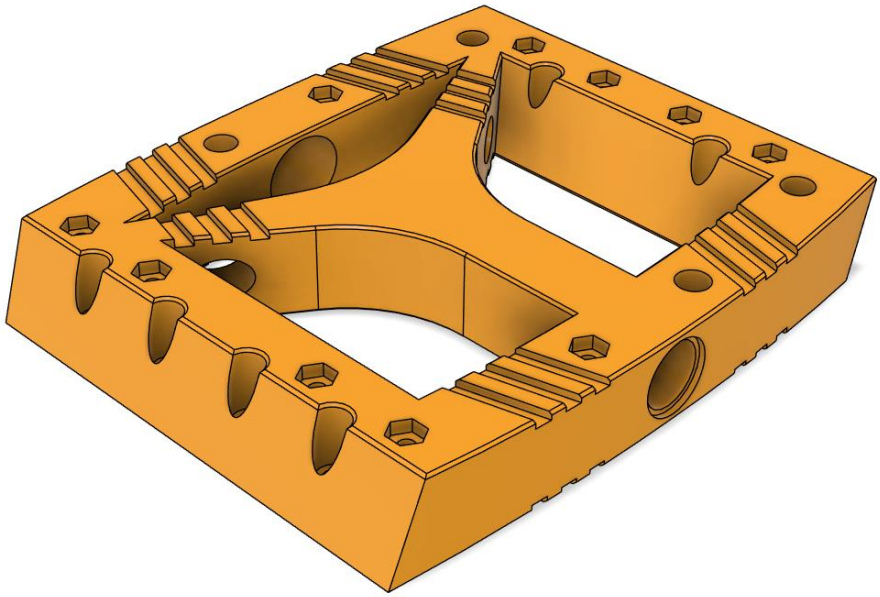
4.6 Koncepty pedálů

Tato kapitola se zabývá představením koncepčních řešení, která měla stejné vstupní parametry. Stejnou osu a uložení ložisek, stejné hlavní rozměry, zatížení, kterému musela bezpečně odolat, stejný materiál, ze kterého budou vyrobena a v neposlední řadě všechna musela splňovat podmínku možnosti montáže pinů spolu se symetrickým designem umožňujícím použití z obou stran. Přestože vstupní podmínky byly pro všechny varianty shodné, cílem bylo vyvinout zcela odlišné přístupy k jejich naplnění. Výsledkem jsou tři tvarově diametrálně odlišné pedály, které byly pojmenovány podle jejich charakteristických konstrukčních prvků a celkového přístupu k řešení dané problematiky.

4.6.1 GriPed

Prvním koncepčním řešením je pedál s názvem GriPed. Toto řešení, které lze vidět na obrázku 4-21, je zaměřeno na robustní konvexní platformu s vnějším oválným tvarem, který usnadňuje průchodnost terénem a minimalizuje riziko zachycení o překážky. Pro dosažení maximální možné přilnavosti (gripu) byla zvolena výrazná konvexnost profilu pedálu, která umožňuje lepší kontakt s podrážkou obuvi a zvyšuje stabilitu při jízdě v technickém terénu.

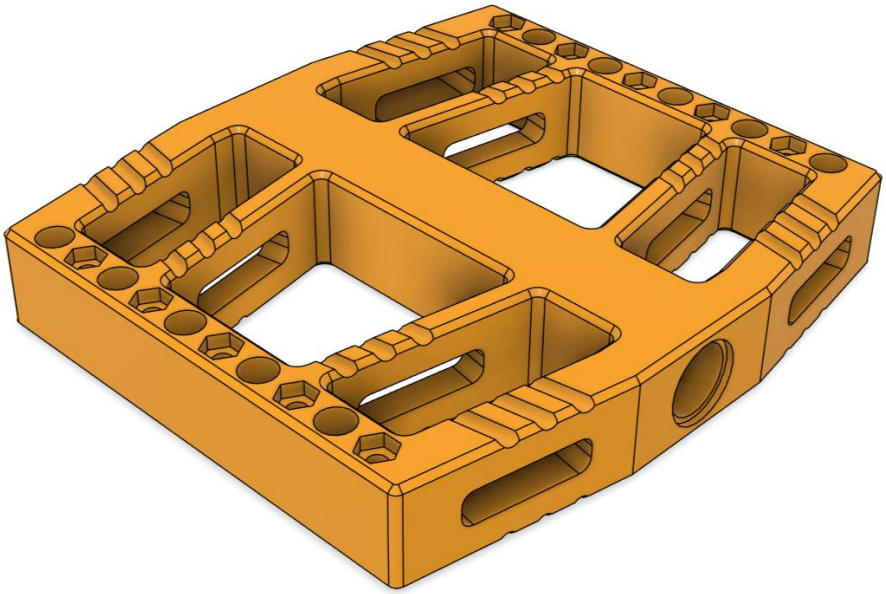
Platforma pedálu je navržena s důrazem na vysokou mechanickou odolnost a efektivní rozložení sil, které působí při šlapání i při dopadech v náročných podmínkách. Umístění otvorů pro piny po obvodu pedálu umožňuje individuální nastavení úrovně přilnavosti podle preferencí jezdce. Díky konvexnímu tvaru je zajištěno, že noha jezdce je vedena do stabilní polohy, což přispívá k lepší kontrole nad kolem a omezuje nechtěné sklouznutí z pedálu.



Obr. 4-21 Zobrazení koncepčního řešení GriPed v modelovacím softwaru Fusion360

4.6.2 GeoPed

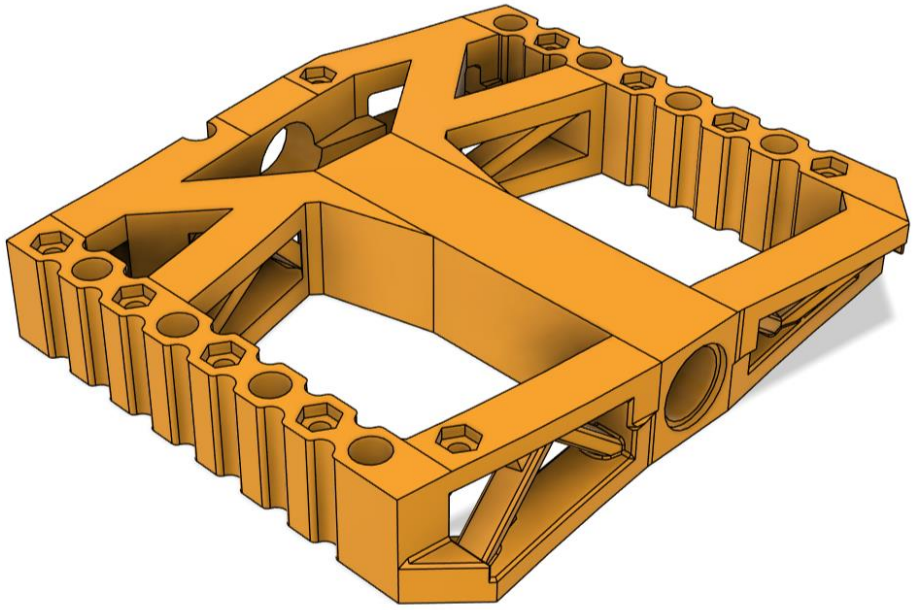
Druhé koncepční řešení nese název GeoPed, který vychází z jeho výrazného geometrického tvarování, viz obr. 4-22. Hlavním cílem tohoto návrhu bylo vytvořit jednoduchý, avšak velmi funkční a odolný pedál s minimalistickým designem. GeoPed je typický čistými liniemi a jednotnou konstrukční myšlenkou, která je uplatňována v celém těle pedálu a dodává mu osobitou eleganci. Tělo pedálu je mírně konvexní, což přispívá k lepšímu kontaktu s podrážkou obuvi a zvyšuje stabilitu při jízdě. Minimalistická výstužná žebra s odlehčovacími otvory dodávají konstrukci dostatečnou pevnost při zachování nízké hmotnosti. Rozmístění otvorů pro piny je navrženo tak, aby zajistilo optimální přilnavost v různých jízdních situacích. Celkový návrh klade důraz na jednoduchost výroby, spolehlivost v terénu a estetickou čistotu.



Obr. 4-22 Zobrazení koncepčního řešení GeoPed v modelovacím softwaru Fusion360

4.6.3 FeetPed

Posledním koncepčním řešením je platformový pedál FeetPed, který – jak již název napovídá – klade důraz na maximální respektování anatomie lidské nohy a využívá její tvar pro dosažení co nejvyšší ergonomie viz obr. 4-23. Charakteristickým rysem konstrukce FeetPedu je vnitřní výztužný systém, který zajišťuje potřebnou tuhost a pevnost při zachování nízké hmotnosti. Výztužná žebra jsou rozmístěna tak, aby efektivně přenášela síly z nejvíce zatěžovaných oblastí pedálu a minimalizovala deformace při zatížení. Rozmístění otvorů pro piny je optimalizováno s ohledem na tělo pedálu a ergonomii, a zajišťuje tak dostatečnou přilnavost v celé kontaktní ploše mezi pedálem a obuví. Otvory a odlehčovací prvky v konstrukci nejen snižují celkovou hmotnost, ale zároveň dodávají pedálu osobitý a jedinečný vzhled.



Obr. 4-23 Zobrazení koncepčního řešení FeetPed v modelovacím softwaru Fusion360

4.7 Hodnotící tabulka

Pro výběr vhodného koncepčního řešení byla vytvořena hodnotící tabulka, která má za úkol přehledně porovnat hlavní parametry jednotlivých řešení a vyhodnotit, které z nich je nejlepší a má největší potenciál pro další vývoj a optimalizaci.

Na základě výsledků uvedených v tabulce byl pro další rozpracování a optimalizaci zvolen pedál s názvem GeoPed. Tato varianta byla vybrána zejména díky velmi dobrým hodnotám ve sledovaných parametrech, především nízké hmotnosti a výšce těla pedálu. Další výhodou je jednodušší tvar GeoPedu, což představuje benefit jak z hlediska výroby, tak i následné údržby a čištění pedálu. Přestože má GeoPed nejmenší styčnou plochu ze všech posuzovaných variant, tato hodnota je stále dostatečná pro komfortní použití a neomezuje funkčnost pedálu. V neposlední řadě nabízí GeoPed značný potenciál pro další zlepšení konstrukce, a především dalšímu snižování hmotnosti.

Tab. 4-3 Hodnotící tabulka předložených variantních řešení

	GriPed	**GeoPed**	FeetPed
Hmotnost těla	118,75 g	**89,76 g**	83,8 g
Hmotnost s osou a piny	201,92 g	**172,93 g**	166,97 g
Styčná plocha	4517,7 mm²	**3819,1 mm²**	4777,4 mm²
Počet pinů na stranu	10	**10**	10
Max. tloušťka	18,4 mm	**18 mm**	18 mm
Min. tloušťka	16,7 mm	**16,99 mm**	17,12 mm
Konvexnost	ano	**ano**	ne
Pohledovost	5/10	**8/10**	3/10

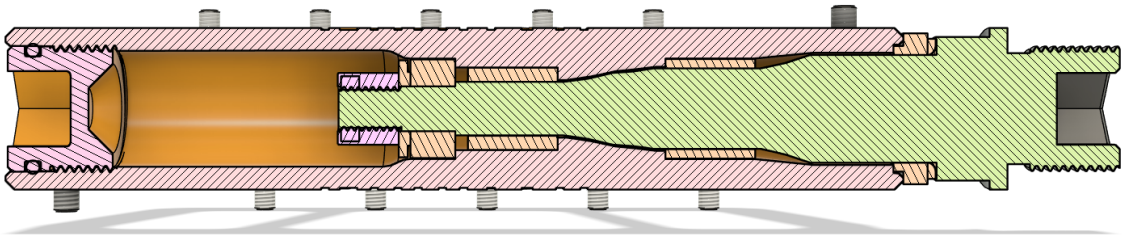
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Konstrukční návrh GeoPedu

Variantní řešení GeoPed bylo zvoleno především díky svým vhodným parametrům, zejména nízké hmotnosti, celkové geometrii a ergonomii pedálu. Toto řešení navíc nabízí značný potenciál pro další snižování hmotnosti a umožňuje se tak přiblížit nejlehčím polymerovým platformovým pedálům určeným pro horskou cyklistiku.

5.1.1 Uložení osy

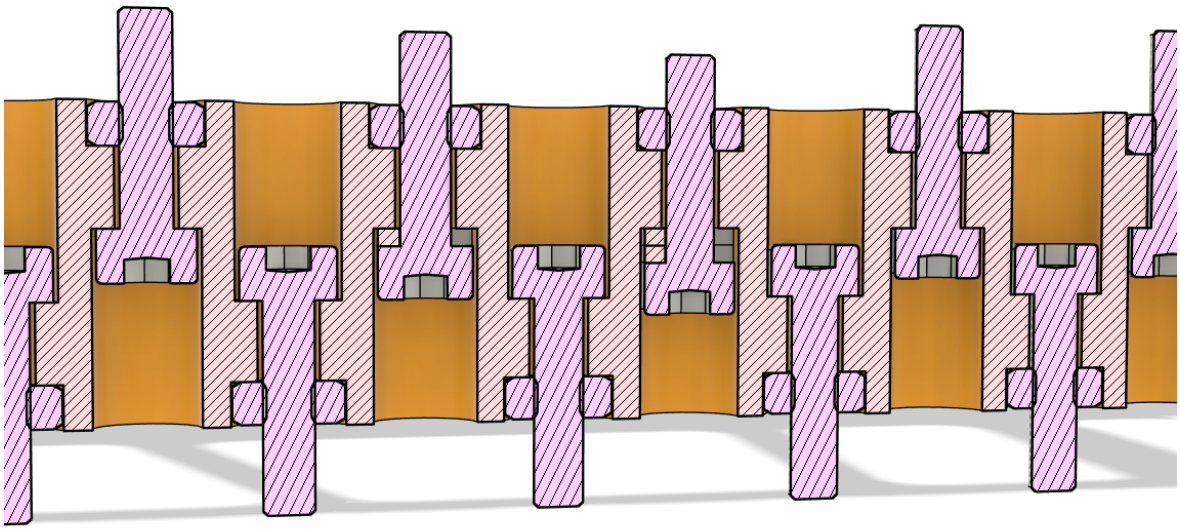
Konstrukce těla pedálu je navržena tak, aby umožňovala uložení pedálové osy společně s ložisky z příslušného rebuild kitu, viz obr. 5-24. Jak bylo zmíněno v kapitole 4.1, kluzná ložiska je třeba zajistit v axiálním směru pomocí vnitřní geometrie těla pedálu. V těle pedálu jsou proto vytvořena osazení, do kterých se kluzná ložiska zasouvají, a díky předpětí od geometrie těla pedálu jsou pevně fixována. V případě opotřebení a ztráty předpětí je uložení navrženo tak, že ložisko může vykonat pouze minimální axiální pohyb, než se opře o kónickou část osy pedálu, případně o axiálně dotažené kuličkové ložisko. Celá osa je v axiálním směru zajištěna pojistnou maticí, která fixuje nejen kuličkové ložisko, ale prostřednictvím geometrie konstrukčního řešení těla pedálu i celou osu pedálu. Důraz byl kladen také na snadnou montáž a servisovatelnost, proto je v těle pedálu navržen válcový otvor o průměru 13 mm, umožňující montáž pojistné matice pomocí nástrčné hlavice velikosti 8 mm (M5). Konec tohoto otvoru je opatřen jemným metrickým závitem M14, který slouží pro montáž krytky zajišťující utěsnění pedálu z druhé strany.



Obr. 5-24 Zobrazení uložení osy v těle pedálu

5.1.2 Piny

Pro zvýšení přilnavosti pedálu k podrážce obuvi obsahuje konstrukční návrh GeoPedu celkem dvacet otvorů situovaných po vnějším obvodu pedálu, což umožňuje montáž až deseti pinů na každé straně. Pro funkci pinů byly zvoleny metrické šrouby M3 × 12 mm, které představují optimální kompromis mezi hmotností a odolností. Jsou tak výbornou volbou pro použití jako piny na pedálu. Šrouby jsou k tělu pedálu fixovány pomocí matic M3, viz obr. 5-25, které jsou umístěny ve speciálních šestihranných otvorech, zajišťujících jejich aretaci. Toto řešení je u pedálů z polymerních materiálů velmi běžné, především pro snadnou vyrobitelnost. Pedál byl navržen také s ohledem na možnost individuálního nastavení výšky pinů. Tato přizpůsobitelnost je zajištěna použitím pružných podložek M3 se čtvercovým průřezem, jak je znázorněno na obrázku 5-25. Uživatel si tak může nastavit výšku každého pinu samostatně podle vlastních preferencí a požadavků na přilnavost. Rozsah nastavení výšky pinů je v tomto řešení 0–5 mm, přičemž pro každý milimetr snížení výšky je potřeba jedna podložka. Na obrázku 5-25 je ilustrována situace, kdy je u druhého pinu zleva a prostředního pinu v horní řadě použita jedna, respektive dvě podložky, a tím snížena výška příslušných pinů. Jelikož jsou piny vystaveny při jízdě v terénu nepříznivým podmínkám, byly zvoleny v nerezové variantě, která zaručuje odolnost vůči korozi, a tedy dlouhou životnost.

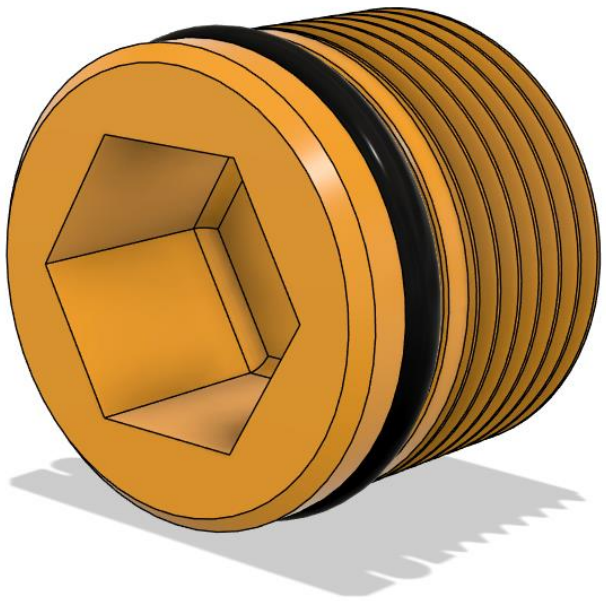


Obr. 5-25 Detailní pohled na uložení šroubů a matic M3 tvořící kovové piny v boční straně pedálu

Dále byly do střední části pedálu přidány plastové výstupky, doplňující kovové piny po okrajích. Tyto výstupky, umístěné po čtyřech kusech na každé straně pedálu (viz obr. 5-27), zajišťují dodatečnou přilnavost mezi pedálem a podrážkou obuvi jezdce. Vzhledem k jejich nižší výšce v porovnání s kovovými piny dále umocňují konvexní povahu pedálu a přispívají k celkově lepší ergonomii.

5.1.3 Krytka

Posledním, přesto velmi významným konstrukčním prvkem je těsnicí krytka, kterou můžeme vidět na obrázku 5-26, zajišťující utěsnění vnější strany montážního otvoru v těle pedálu. Vzhledem k tomu, že krytka nepřenáší žádné významné zatížení, jsou na ni kladeny pouze požadavky týkající se kompatibility se zvoleným závitem M14 v těle pedálu a schopnosti efektivně utěsnit kruhový otvor. Po několika iteracích konstrukčního návrhu a zhodnocení různých rozměrů těsnicích O-kroužků bylo rozhodnuto, že optimálním řešením bude použití O-kroužku o rozměrech 11,5 × 1,5 mm z nitrilkaučukové pryže (NBR 70). Pro zajištění jednoduché montáže a demontáže byla krytka navržena s vnitřním šestihranem velikosti 8 mm. Toto řešení bylo zvoleno s ohledem na skutečnost, že pro montáž samotného pedálu na kliku je zapotřebí stejný imbusový klíč. Tato volba je tedy nejpraktičtější a nejjednodušší z hlediska celkového sestavení pedálu.

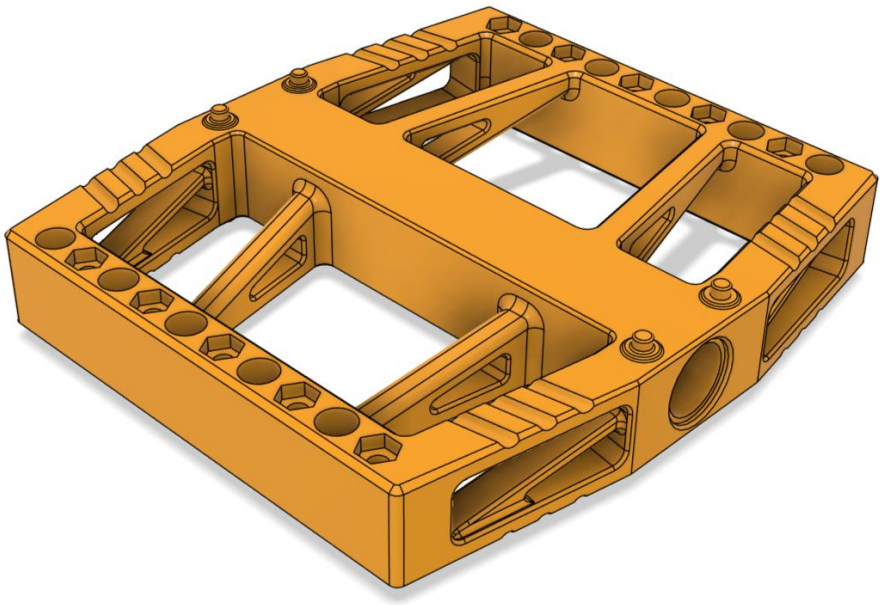


Obr. 5-26 Těsnící krytka společně s O kroužkem

5.1.4 Hmotnostní optimalizace těla pedálu

Pro další optimalizaci bylo nutné přepracovat odlehčovací otvory a geometrii výztužných žeber s cílem dosáhnout efektivnějšího poměru mezi pevností a hmotností. Z tohoto důvodu byly navrženy trojúhelníkové profily vnitřních žeber, které významně snížily celkovou hmotnost pedálu při zachování požadované pevnosti a ergonomických vlastností.

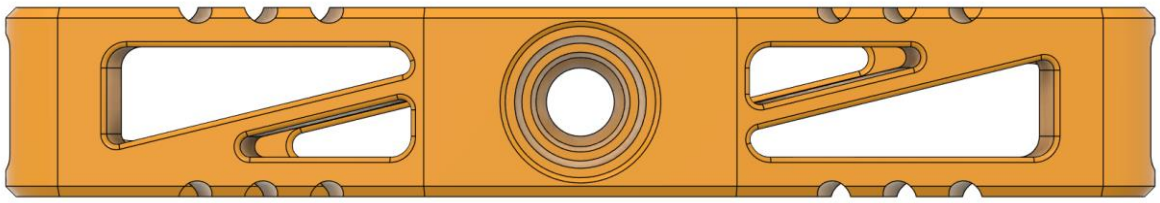
Trojúhelníkovým tvarem výztužných žeber a symetrickou povahou pedálu byla tato žebra odebrána ze zadní části pedálu, viz obr. 5-27. Tato změna v geometrii si stále zachovává skvělou ergonomii a efektivitu přenosu síly na pedál, jelikož lidské chodidlo vykazuje nejvyšší hodnoty planárního tlaku, tedy tlaku chodidla na podložku, v oblasti přední části nohy (mediální a laterální části přednoží) [66].



Obr. 5-27 Zoptimalizované tělo pedálu s trojúhelníkovými žebry a plastovými piny v prostřední části těla

Dále byly zvětšeny odlehčovací otvory na postranních stěnách pedálu, čímž bylo dosaženo dalšího odlehčení. Pro kompenzaci úbytku materiálu a zajištění dostatečné pevnosti těla pedálu byla do tohoto prostoru přidána diagonální podpůrná žebra.

Tato žebra byla navíc konstruována s důrazem na původní myšlenku návrhu, tedy jednoduchý, minimalistický a čistý design. Při pohledu z boku jsou proto středová a podpůrná žebra vzájemně v zákrytu, což po montáži na kolo umocňuje celkový dojem lehkosti pedálu, viz obr. 5-28.

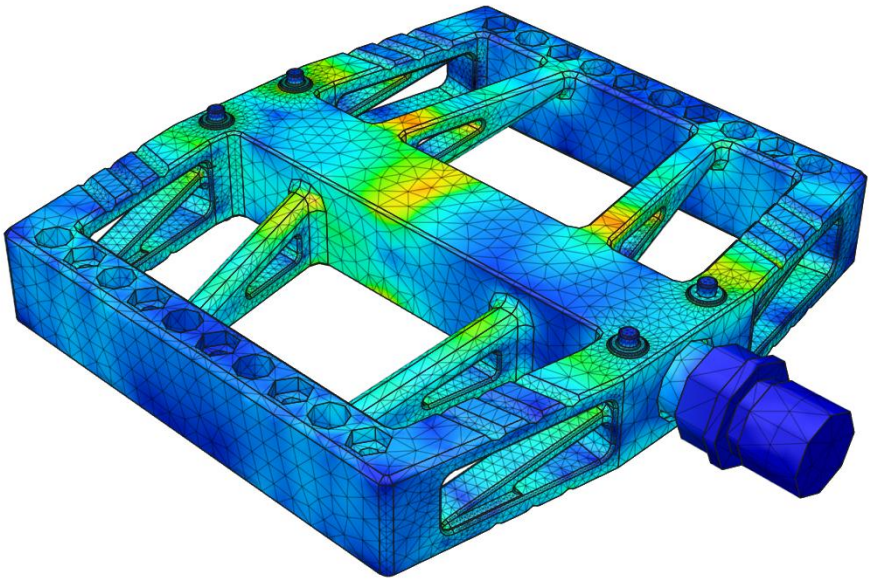


Obr. 5-28 Pohled z boku na pedál GeoPed

5.2 Kontrolní výpočet pedálu pomocí MKP

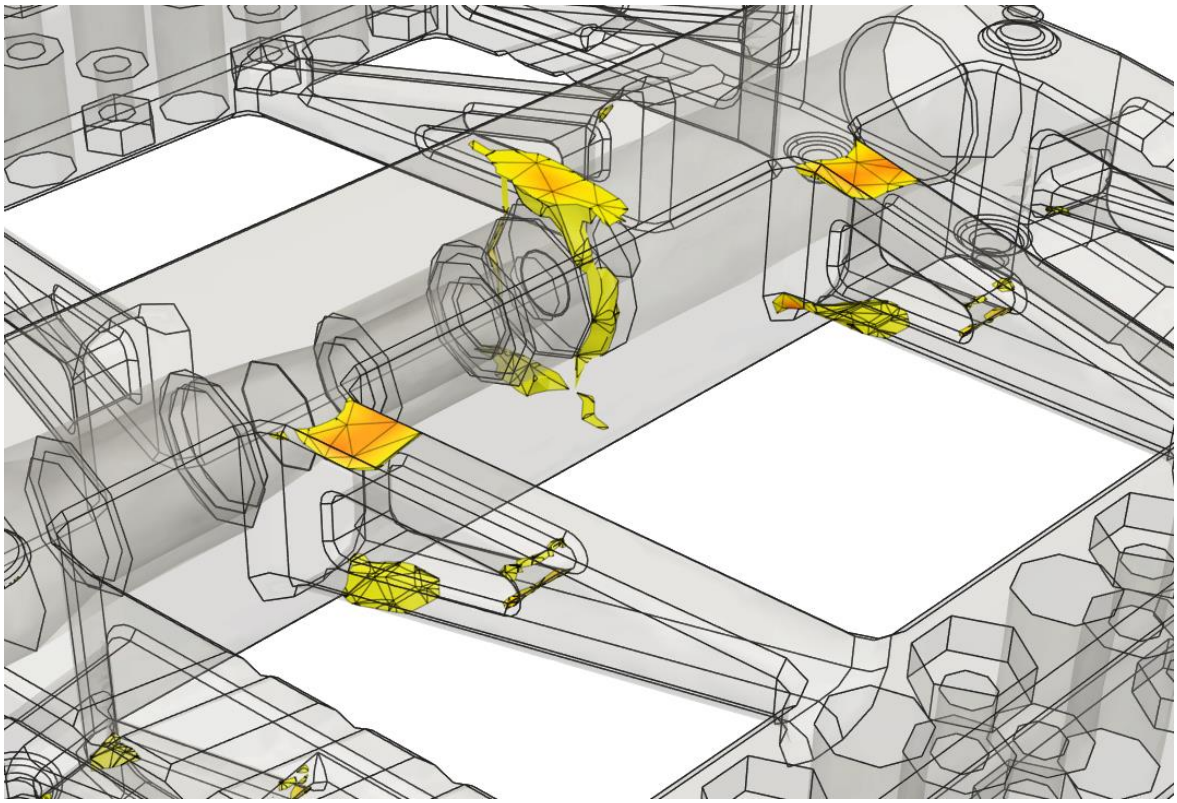
V průběhu návrhu byly všechny konstrukční úpravy průběžně kontrolovány a ověřovány pomocí metody konečných prvků (MKP) přímo v modelovacím softwaru Fusion 360. Cílem kontroly pomocí softwaru MKP byla statická pevnostní analýza, ověření rozložení napětí a kontrola kritických míst. Tato kontrola byla prováděna pro normálové zatížení horní plochy pedálu na námi vypočtené maximální zatížení 1551,35 N působící během jízdy na pedál. Z kapitoly 4.3 víme, že nejkritičtějšímu zatížení dochází v situaci, kdy jezdec dopadá na zem z maximální výrobcem rámu povolené výšky 122 cm, při maximální přípustné hmotnosti jezdce 136 kg. Bylo proto nutno ověřit, že pedál tomuto kritickému zatížení odolá. Vzhledem k tomu, že analýza vychází z nejnepříznivějších podmínek stanovených pro samotný rám kola, byl pro ověření dostatečné bezpečnosti považován za přijatelný součinitel bezpečnosti k > 1 vztažený k mezi kluzu zvoleného materiálu PETG.

V průběhu optimalizačního procesu bylo nezbytné systematicky kontrolovat tři kritické oblasti identifikované pomocí MKP analýzy, které můžeme vidět na obrázku 5-30. Přechodové oblasti mezi středem těla pedálu a oběma středovými žebry, a přechodovou oblast uvnitř těla pedálu mezi zakončením kuličkového ložiska a rozšířením válcového otvoru určeného pro nástrčnou hlavici montážního nástroje. Na obrázku 5-29 můžeme vidět výsledek jednoho z MKP výpočtů, které pomohly s konstrukčním řešením těla pedálu a jeho hmotnostní optimalizací. Na základě těchto výpočtů byla provedena úprava zaoblení v přechodových oblastech středových trojúhelníkových žeber a změna rozměrů odlehčovacích otvorů. Cílem těchto změn bylo dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení napětí v kritických oblastech a minimalizovat vliv koncentrátorů napětí, které by mohly vést k předčasnému porušení konstrukce.



Obr. 5-29 Rozložení napětí v těle pedálu při maximálním zatížení

Díky možnosti průběžných simulací zatížení, bylo možno optimalizovat tělo pedálu na nižší hmotnost při zachování potřebných pevnostních vlastností a bezpečnosti. Je však nutné zdůraznit, že MKP analýza v programu Fusion 360 pracuje s předpokladem homogenního izotropního materiálu, jehož vlastností nelze při výrobě 3D tiskem metodou FDM plně dosáhnout. Technologie FDM funguje na principu postupného nanášení a spékání jednotlivých vrstev materiálu, což vede ke vzniku vrstvené struktury výsledného dílu [67]. Tato struktura má za následek anizotropní mechanické vlastnosti, to znamená, že pevnost a ohybové vlastnosti materiálu se mohou výrazně lišit v závislosti na směru zatížení vzhledem k orientaci samotných tiskových vrstev [38]. V praxi to znamená, že díl může být pevnější v rovině vrstev, a naopak méně odolný ve směru kolmo k těmto vrstvám [67]. Z tohoto důvodu je nutné finální model pedálu nejen numericky ověřit, ale také podrobit praktickému testování v reálných provozních podmínkách, aby byla zajištěna jeho skutečná funkčnost, bezpečnost a odolnost při použití v terénu.

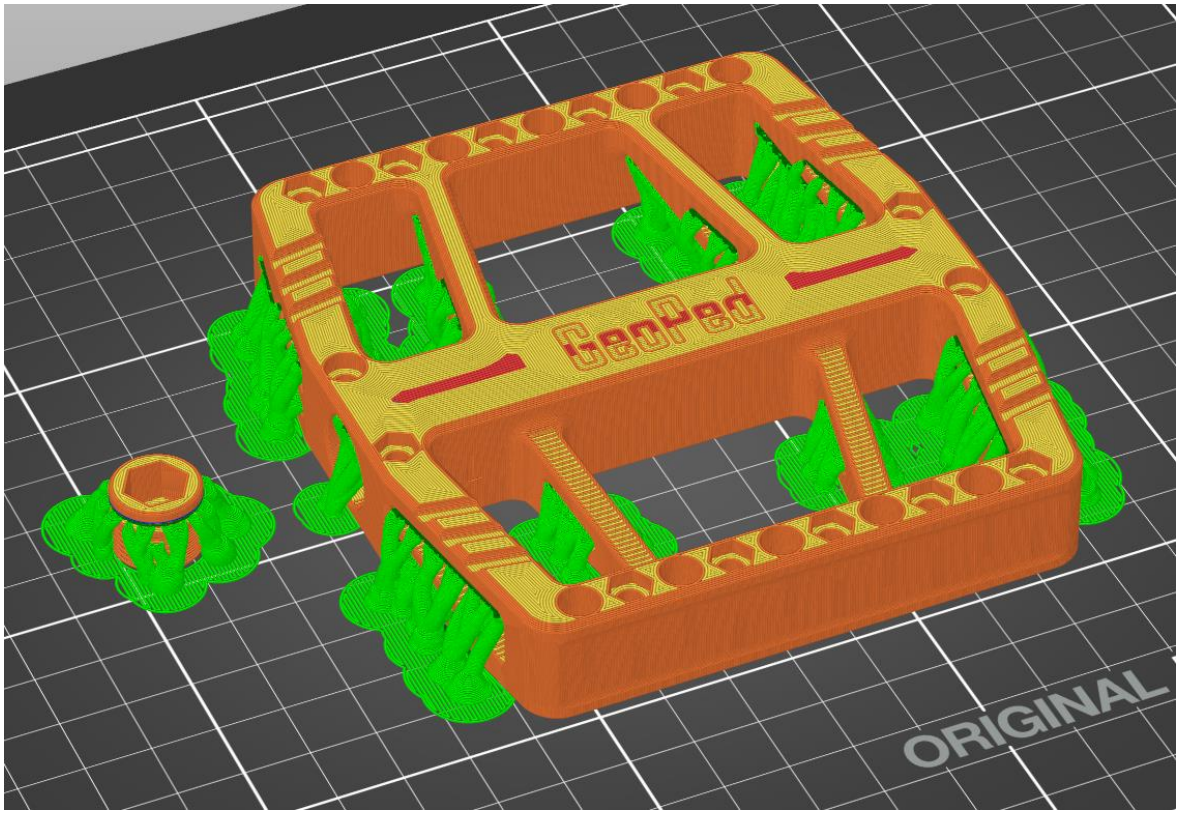


Obr. 5-30 Detail na tři kritická místa při maximálním zatížení

5.3 Nastavení tisku

Před samotným 3D tiskem pedálu byl digitální model nahrán do speciálního slicovacího softwaru, který tento model rozděluje na jednotlivé horizontální vrstvy a na základě těchto dat generuje trajektorii pohybu tiskové hlavy. Takto připravená data je následně možné nahrát do 3D tiskárny a zahájit proces tisku.

Zásadním aspektem ovlivňujícím výslednou pevnost a kvalitu pedálu je orientace modelu na tiskové podložce [38]. Volba orientace přímo určuje množství potřebných podpůrných struktur, rozložení mechanického namáhání v součásti a míru tzv. schodovitého efektu (stair-stepping) na povrchu [38]. Při vertikální orientaci (tisk ve směru osy Z) se sice sníží počet podpor a lze dosáhnout přesnější geometrie v oblasti uložení ložisek, ale zároveň se i sníží pevnost modelu, jelikož hlavní namáhání působí kolmo na směr tisku. Naproti tomu horizontální orientace (tisk v rovině XY), který můžeme vidět na obrázku 5-31, zlepšuje pevnost v směrech zatížení [38], avšak vyžaduje více podpěr a nedosahuje takových přesností na kontaktních plochách s ložisky.



Obr. 5-31 Tělo pedálu s krytkou připraveno na tisk

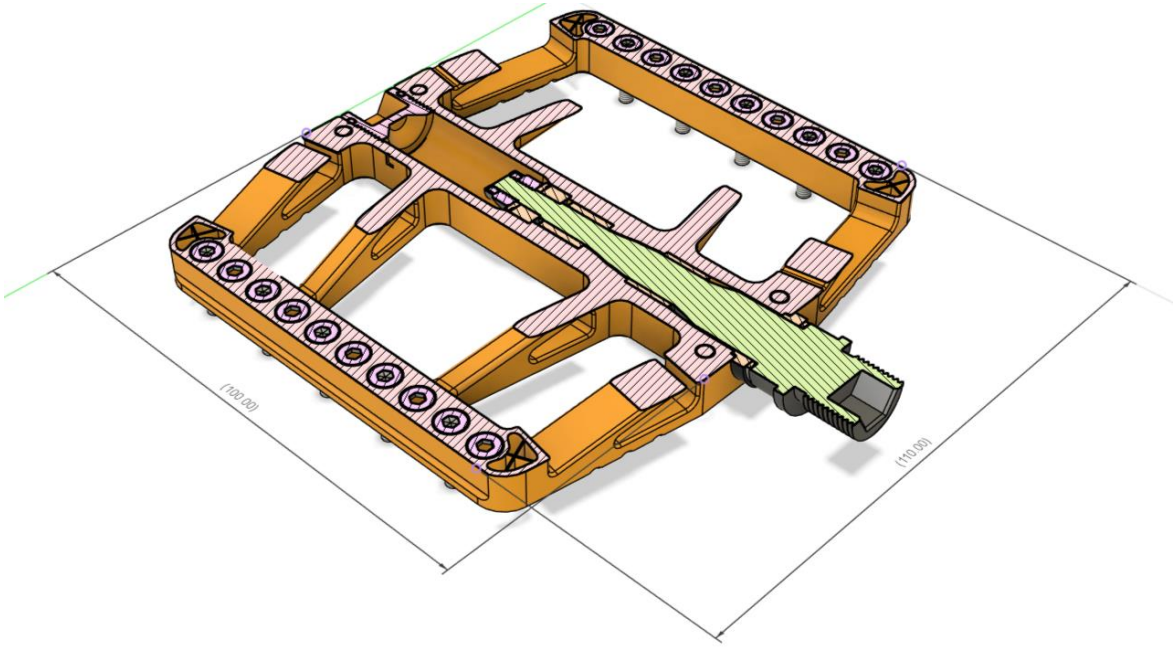
Výška vrstvy, která byla nastavena na 0,2 mm, představuje kompromis mezi kvalitou povrchu a efektivitou výroby. Zmenšení této hodnoty na 0,1 mm sice vede k hladšímu povrchu, ale prodlužuje dobu tisku téměř na dvojnásobek. Hlavním parametrem ovlivňujícím pevnost po orientaci tisku je počet perimetrů, tedy počet obvodových vrstev materiálu směrem od vnějšího okraje do vnitřní struktury těla pedálu. Počet perimetrů byl zvolen zpočátku na 6, později však došlo na zvýšení na finální počet 17 ve všech směrech, pro zvýšení odolnosti a tuhosti těla pedálu. Procento výplně bylo nastaveno na 20 % s využitím mřížkového vzoru, avšak z důvodu vysokého počtu použitých perimetrů je tělo pedálu zcela vyplněno. Pro správnou funkci závitového spojení mezi krytkou a tělem pedálu je nezbytné stanovit vhodné výrobní tolerance. Těchto tolerancí je v tomto případě dosaženo zmenšením modelu krytky o 2 % ve směru os x a y. Toto nastavení lze jednoduše provést přímo ve slicovacím softwaru. Díky této úpravě je zajištěna správná funkčnost závitového spoje a bezproblémová montáž krytky do těla pedálu. Teplotní parametry tisku byly nastaveny dle doporučení výrobce Prusamentu na 240 °C pro trysku a 80 °C pro podložku [40].

5.4 Testování a optimalizace konstrukčního řešení

Pro ověření výsledků získaných pomocí MKP analýzy a zajištění bezpečnosti při použití pedálu v reálných podmínkách bylo nezbytné provést testování vyrobených prototypů. Testování probíhalo v terénu v okolí Brna na různých typech trailů, kde byly pedály vystaveny široké škále jízdních podmínek od technických výjezdů po kamenité sjezdy s kořenovými pasážemi a skoky, viz obr. 5-33.

Na základě výsledků testování bylo nutné provést několik iterací designu a upravit parametry tisku. První testy potvrdily významnou anizotropii vytištěného modelu. Při původní orientaci tisku (na výšku) došlo během zatěžování k rozlomení těla pedálu přesně v místech největších koncentrátorů napětí, které byly rovněž identifikovány v MKP analýze, viz obr. 5-30.

V dalším iteračním kroku bylo tedy navýšeno počet perimetrů. Toto opatření vedlo k významnému prodloužení životnosti druhé generace prototypu, nicméně z důvodu přetrvávající anizotropie mechanických vlastností tištěného materiálu nebylo dosaženo požadované pevnosti.



Obr. 5-32 Odlehčení v rozích jako důsledek hmotnostní optimalizace se zobrazenými hlavními rozměry

Zásadním krokem pro zlepšení mechanických vlastností byla změna orientace modelu na tiskové podložce z tisku na výšku na tisk na plocho. Tato změna sice částečně negativně ovlivnila kruhovitost otvoru pro osu pedálu, ale výrazně zlepšila celkové pevnostní charakteristiky. Pedál se stal výrazně tužší a méně poddajný, což vedlo ke zvýšení celkové stability a jistoty při jízdě v náročném terénu. Změna orientace tisku si vyžádala úpravy původního modelu. Bylo nutné iterativně stanovit optimální tolerance pro ložiska a samotnou osu pedálu, kvůli mírné deformaci středového otvoru. Dále bylo nutné přehodnotit původní konvexní tvar pedálu s plastovými piny ve středové části, neboť při tisku na plocho by tento design vyžadoval rozsáhlé použití podpor. Tyto podpory by zbytečně spotřebovávali materiál, prodlužovali čas tisku a v neposlední řadě by jejich odstranění mohlo poškodit pohledovou stranu pedálu.

Obr. 5-33 Testování pedálu v terénu

Na základě těchto zjištění bylo rozhodnuto o odstranění plastových pinů společně i s mírným konvexním prohnutím těla pedálu. Plastové piny byly nahrazeny kovovými, které obdobně jako původní jsou na výšku nižší než piny na okrajích, čímž zachovávají původní konvexní charakter pedálu. Stejně jako piny po okrajích jsou i tyto piny rozměru M3, avšak kvůli zachování co nejvíce materiálu těla pedálu jsou tyto šrouby delší o šest milimetrů, tedy M3 × 18 mm. Odstranění konvexnosti překvapivě nevedlo k výraznému zhoršení přilnavosti. Naopak, díky přesnějšímu tisku kontaktních ploch pedálu, na něm neulpívá tolik nečistot a snáze se čistí, což zvyšuje uživatelský komfort.

Pro kompenzaci mírného nárůstu hmotnosti způsobeného odstraněním konvexního prohnutí, byla provedena optimalizace těla pedálu odebráním materiálu v místech, kde nebyl nezbytný. Materiál byl odebrán zejména na straně s piny, v rozích pedálu (viz obr. 5-32) a ve středové části, kde bylo v první a poslední vrstvě tisku vytvořeno zahloubené logo pedálu. Toto logo kromě estetické funkce zároveň slouží jako zdrsnění jinak relativně hladkého povrchu a přispívá k lepšímu kontaktu s podrážkou boty.

Testování tedy přispělo k hmotnostní optimalizaci, zvýšení pevnosti pedálu a vedlo k celkovému zdokonalení modelu, který můžeme vidět na obrázku 5-33 a detailněji potom na obrázcích 5-34 a 5-35. Finální verze pedálu dosáhla hmotnosti 160 g, což znamená celkovou hmotnost 320 g za pár, viz obr. 5-36. Tato hodnota řadí navržený pedál mezi nejlehčí platformové pedály s vyměnitelnými piny v rámci srovnání uvedeného v tabulce 2-1. Ve srovnání s ostatními kompozitovými pedály od renomovaných výrobců dostupnými na trhu představuje tato nízká hmotnost významnou konkurenční výhodu při výběru nového platformového pedálu, a to zejména s ohledem na zachování dostatečné pevnosti a odolnosti konstrukce.

Obr. 5-34 Detail pedálu namontovaného na klice kola

Obr. 5-35 Pohled na finální verzi pedálu GeoPed

Obr. 5-36 Hmotnost finální verze pedálu společně se všemi potřebnými komponenty

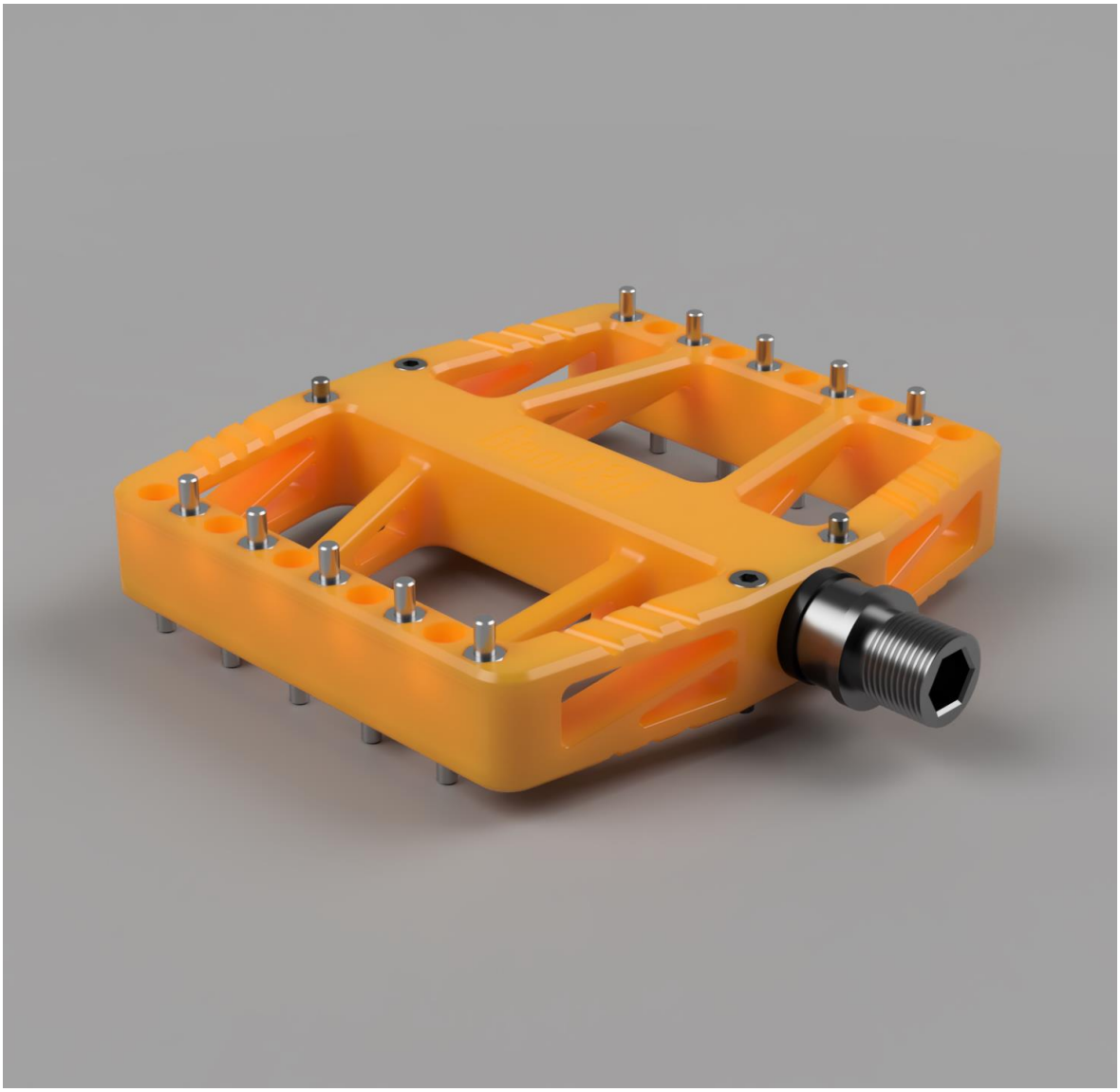
5.5 Analýza výrobních nákladů

Vzhledem k tomu, že navržený pedál je určen pro hobby jezdce, je nezbytné provést i nákladovou analýzu s cílem zjistit, jaké budou celkové pořizovací náklady pro koncového uživatele. Náklady na piny, konkrétně 40 kusů šroubů M3 × 12 mm a 8 šroubů M3 × 18 mm spolu s 48 maticemi M3, činí přibližně 67 Kč. Dvojice těsnění 11,5 × 1,5 NBR 70 stojí přibližně 4 Kč. Pro snížení výšky vnějších pinů je možné pod každou hlavu šroubu umístit až 5 pérových podložek M3 se čtvercovým průřezem. Jedna podložka stojí 0,175 Kč, a tedy cena na snížení všech pinů o jeden milimetr činí 7 Kč. Toto přizpůsobení je ale zcela individuální a není proto započteno v celkových nákladech na sadu pedálů. Osy HT NANO-S ANS10 stojí 541 Kč a ložiska obsažená v rebuild kitu 338 Kč. Pro výrobu těla pedálu byl použit filament PETG od výrobce Prusa v ceně 699 Kč za 1000g cívku. Podle slicerovacího programu činí spotřeba materiálu na jeden pedál včetně krytky 86 g, což umožňuje vyrobit z jedné cívky celkem 11 pedálů. Cena materiálu na jeden pedál tak vychází na 64 Kč.

Celkově tedy kompletní sada pedálů vychází na 1 078 Kč. Výhodou tohoto řešení je možnost opakované výroby těla pedálu v případě jeho poškození. V takovém případě uživatel zaplatí pouze cenu filamentu, tedy 64 Kč za nový pedál. Pokud by bylo potřeba vyměnit i ložiska, přičte se k této částce cena rebuild kitu, což znamená celkové náklady 402 Kč. Tato částka je tedy výrazně nižší než pořizovací cena nových pedálů ve stejné kategorii.

Tab. 4-4 Tabulka komponent s cenami

Položka	Počet ks	Cena
Šroub nerezový s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M3 × 12 mm	40	40 Kč
Šroub nerezový s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M3 × 18 mm	8	10 Kč
Matice M3 nerezová	48	17 Kč
Pérová podložka M3 se čtvercovým průřezem (volitelná, snížení 1 mm)	40	7 Kč
O-kroužek 11,5 × 1,5 mm NBR 70	2	4 Kč
Osy HT NANO-S ANS10	1	541 Kč
Rebuild kit pro osy HT NANO-S ANS10	1	338 Kč
Filament Prusament 1kg PETG	1	699 Kč
Tělo pedálu s krytkou	2	128 Kč
Cena celkem (všechny komponenty vč 1kg cívky)	1	1 649 Kč
Cena celkem (materiál pro dva pedály s krytkou)	1	**1 078 Kč**
Cena při tisku nového těla pedálu	1	64 Kč
Cena při tisku nového těla pedálu v výměně ložisek	1	402 Kč



Obr. 5-37 Render finálního pedálu GeoPed

6 DISKUZE

Cílem práce bylo navrhnout platformový pedál, který bude vyroben pomocí 3D tisku, bude vhodný pro trailové použití a zároveň zachová nízkou hmotnost a cenovou dostupnost pro hobby uživatele. Na základě rešerše současného stavu poznání bylo zjištěno, že většina 3D tištěných pedálů dostupných na současném trhu má výrazné limity, často například vysokou hmotnost, absenci pinů a nevhodnost pro náročné terénní použití. Tato práce si proto kladla za cíl překonat tyto nedostatky, a přiblížit se úrovni komerčně vyráběných kompozitových pedálů renomovaných značek.

Výsledky práce prokazují, že konstrukční návrh platformového pedálu GeoPed vyrobeného technologií 3D tisku z materiálu PETG splňuje hlavní požadavky stanovené v zadání práce. Dosažená hmotnost 160 g na pedál (320 g za pár) řadí GeoPed mezi nejlehčí platformové pedály s vyměnitelnými piny v kategorii kompozitových pedálů, což představuje významnou konkurenční výhodu ve srovnání s komerčně dostupným produktům. Hlavní rozměry 100 × 110 mm poskytují dostatečnou oporu pro nohu a díky 12 kovovým, výškově nastavitelným pinům je zajištěn dostatečný grip i v náročných podmínkách. Z hlediska uživatelského komfortu pedál umožňuje, kromě individuální nastavení výšky pinů, také jednoduchou montáž a snadnou údržbu. Díky možnosti barevného přizpůsobení se zároveň zvyšuje jeho atraktivita pro uživatele.

Konstrukční návrh byl ověřen jak numerickou simulací pomocí metody konečných prvků, tak praktickým testováním v terénu. MKP analýza umožnila optimalizovat tvar a rozmístění výztužných žeber, a odlehčovacích otvorů, přičemž výsledky simulací byly potvrzeny i reálným testováním. Testování potvrdilo anizotropní strukturu vytvořenou při 3D tisku technologií FDM s různými pevnostními charakteristikami v závislosti na směru zatížení, První prototypy selhaly v místech předpovězených simulací MKP, zejména kvůli nevhodné orientaci tisku. Teprve změna orientace modelu a zvýšení počtu perimetrů vedly k požadované pevnosti a životnosti.

Analýza výrobních nákladů dále potvrdila, že navržený pedál je pro cílovou skupinu hobby jezdců cenově velmi dostupný. Možnost opakované výroby těla pedálu v případě poškození výrazně snižuje dlouhodobé náklady na údržbu, což je v této kategorii produktů unikátní.

Mezi omezení práce patří především skutečnost, že testování bylo prováděno v omezeném časovém rozsahu, kdy se nestihla projevit únava materiálu. Další slabinou tohoto konstrukčního řešení může být zjednodušení výpočtů zatížení, které může na pedál v terénních podmínkách působit. Tato oblast potřebuje další zkoumání, které však nebylo možné v rozsahu bakalářské práce zajistit.

Do budoucna by bylo vhodné prozkoumat použití pokročilejších materiálů v této aplikaci, například s příměsí karbonových či skelných vláken. Z hlediska konstrukce by bylo možné dále optimalizovat tvar a rozmístění výztužných žeber či testovat alternativní způsoby montáže pinů a dosáhnout tak ještě lepšího poměru hmotnosti a pevnosti.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout, vyrobit a otestovat platformový pedál pro horská kola, který by díky využití technologie 3D tisku splňoval požadavky na nízkou hmotnost, dostatečnou pevnost, snadnou údržbu, cenovou dostupnost a vysokou míru přizpůsobitelnosti pro hobby uživatele. Na základě analýzy současného trhu a vlastních koncepčních návrhů byl vyvinut a optimalizován model pedálu GeoPed, který tyto nároky úspěšně naplňuje.

Významným přínosem této práce je nejen samotný návrh a realizace pedálu vhodného pro trail a enduro disciplíny, ale také ověření konstrukčních a technologických možností aditivní výroby v této specifické aplikaci. Výsledky ukázaly, že správnou volbou materiálu, optimalizací tvaru a vhodným nastavením parametrů tisku lze dosáhnout mechanických vlastností srovnatelných s komerčně vyráběnými kompozitovými pedály. Návrh byl prověřen metodou konečných prvků a následným praktickým testováním, což umožnilo identifikovat a odstranit slabá místa, zejména v souvislosti s anizotropií mechanických vlastností materiálu v závislosti na směru tisku.

Finální model dosáhl hmotnosti 320 g za pár, což jej řadí mezi nejlehčí pedály své kategorie, přičemž testování v reálných podmínkách potvrdilo jeho odolnost a funkčnost. Pedál vyniká příznivou cenovou dostupností pro cílové uživatele, a dlouhodobé náklady na údržbu jsou díky možnosti opakované výroby těla pedálu výrazně nižší než u běžně dostupných produktů. Tato skutečnost společně s vysokou mírou barevné přizpůsobitelnosti dále zvyšuje jeho atraktivitu a konkurenceschopnost na trhu.

Ačkoliv testování probíhalo v omezeném časovém horizontu a nebylo možné plně posoudit dlouhodobou únavu materiálu, výsledky naznačují, že 3D tištěné pedály mohou představovat plnohodnotnou alternativu ke komerčně vyráběným modelům. Do budoucna by bylo vhodné zaměřit se na testování s využitím pokročilejších materiálů a dále optimalizovat konstrukci s cílem dalšího zvýšení poměru hmotnosti ku pevnosti a rozšířit možnosti individuálního přizpůsobení.

Celkově lze konstatovat, že práce naplnila stanovené cíle a přinesla prakticky využitelný výsledek, který rozšiřuje možnosti využití aditivní výroby v oblasti cyklistiky. Získané poznatky mohou sloužit jako inspirace pro další vývoj v této oblasti, ať už v podobě inovací konstrukčních řešení, nebo rozšiřování nabídky komponentů dostupných běžným uživatelům prostřednictvím 3D tisku.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] MORÁVEK, Zdeněk. *Horská kola, hlavní disciplíny a vývoj horského kola*. Online, Bakalářská práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická, 2019. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/1b3f09c3-fda7-4725-8767-a8dda4bafcac/content. [cit. 2025-04-17].

[2] MIKYSKA, Tomáš. *Historie cyklistiky a nastupující trendy MTB*. Online, Bakalářská práce. Brno: Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií, 2006. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/o291q/bakalarska_prace.pdf. [cit. 2025-04-17].

[3] BUREŠ, Petr. *Odpružení #1 - Jak to všechno začalo*. Online. Mtbs. 2016. Dostupné z: https://mtbs.cz/clanek/odpruzeni-1-jak-to-vsechno-zacalo/kategorie/retro-kola-komponenty. [cit. 2025-04-17].

[4] KADEČKA, Jan. *Milníky a omyly bikové evoluce*. Online. Cykloservis. C2025. Dostupné z: https://cykl.cz/milniky-a-omyly-bikove-evoluce. [cit. 2025-04-17].

[5] *Mullet Bike: Pros and Cons*. Online. Canyon. 1 July 2022. Dostupné z: https://www.canyon.com/en-cz/blog-content/mountain-bike-news/mullet-bikes-pros-and-cons/b30062022.html. [cit. 2025-04-18].

[6] *Why dropper posts? And a bit of mountain bike history*. Online. TranzX. 5 June 2020. Dostupné z: https://na.tranzx.com/blogs/news/why-dropper-posts. [cit. 2025-04-18].

[7] LOVERIDGE, Matthew. *Is this the world's first dropper post?* Online. Bikeradar. 4 November 2015. Dostupné z: https://www.bikeradar.com/features/is-this-the-worlds-first-dropper-post. [cit. 2025-04-17].

[8] *Teleskopická sedlovka a její benefity. Kdo ji skutečně využije?* Online. Welovecycling. 2025. Dostupné z: https://www.welovecycling.com/cs/2025/03/06/teleskopicka-sedlovka-a-jeji-benefity-kdo-ji-skutecne-vyuzije/. [cit. 2025-04-18].

[9] KUCHLER, Karel. *Bezdušové pláště – ano, či ne?* Online. IVelo. 2017. Dostupné z: https://www.ivelo.cz/casopis_clanek/cyklo-2017-3-ukazka1/. [cit. 2025-04-18].

[10] KOVÁŘ, Jakub. *Vývoj MTB maratonů v ČR v posledních deseti letech*. Online, Bakalářská práce. Brno: Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií, 2006. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/vxi8x/hlavni_cast.pdf. [cit. 2025-04-18].

[11] MARTINÁK, Tomáš. *Od základu: XC, TR, AM, EN, DH – kde je rozdíl?* Online. MTBIKER. 2024. Dostupné z: https://www.mtbiker.cz/clanky/127796/od-zakladu-xc-tr-am-en-dh-kde-je-rozdil.html. [cit. 2025-04-19].

[12] *Cannondale Scalpel*. Online. In: Cannondale. C2019-2025. Dostupné z: https://www.cannondalebikes.cz/jizdni-kola/horska-kola/xc-race/scalpel. [cit. 2025-05-08].

[13] *Pivot Switchblade*. Online. In: Pivot cycles. C2025. Dostupné z: https://global.pivotcycles.com/bikes/switchblade. [cit. 2025-05-08].

[14] *Santa Cruz V10*. Online. In: Santa Cruz bicycles. C2025. Dostupné z: https://www.santacruzbicycles.com/en-eu/collections/v10/products/v-10-dh-x-01-2025?variant=50294265053466. [cit. 2025-05-08].

[15] ELISABETH CONROY, Katelyn. *Physiological and Mechanical Comparisons between Clipless and Flat Pedals*. Online, Diplomová práce. Las Vegas: The University of Nevada, Department of Kinesiology and Nutrition Sciences, 2021. Dostupné z: https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5286&context=thesesdissertations. [cit. 2025-04-18].

[16] *Road Vs MTB Clipless Pedals: Which Are Best For You?* Online. 2024. Dostupné z: YouTube, https://www.youtube.com/watch?v=_NTLDlNnHFo. [cit. 2025-05-17].

[17] KUHN, Brandon. *A Comparison Of Three Bicycle Pedal Types And Power Output*. Online, Diplomová práce. Fort Hays: Fort Hays State University, 2012. Dostupné z: https://scholars.fhsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1118&context=theses. [cit. 2025-04-18].

[18] *Shimano PD-M520*. Online. In: Pepebike. C2025. Dostupné z: https://www.pepebike.cz/pedaly-shimano-pd-m520-stribrne/. [cit. 2025-05-08].

[19] NORMAN, Paul. *Flat or clipless pedals: which is right for you?* Online. Bikeradar. 22 May 2023. Dostupné z: https://www.bikeradar.com/advice/buyers-guides/flat-or-clipless-pedals-which-is-right-for-you. [cit. 2025-05-15].

[20] *Pedály Hope F22 Flat*. Online. In: Pepebike. C2025. Dostupné z: https://www.pepebike.cz/pedaly-hope-f22-flat/. [cit. 2025-05-08].

[21] CLAUSS, Paul a BENSON, Jeremy. *The Best Flat Pedal Mountain Bike Shoes of 2025*. Online. Gearjunkie. 9 April 2025. Dostupné z: https://gearjunkie.com/biking/best-flat-pedal-mountain-bike-shoes. [cit. 2025-04-18].

[22] *Canyon MTB Performance Flat Pedals*. Online. In: Canyon. C2025. Dostupné z: https://www.canyon.com/cs-cz/gear/bike-parts/contact-points/pedals-and-cleats/canyon-mtb-performance-flat-pedals/9102110.html. [cit. 2025-05-08].

[23] *DEITY Deftrap pedals*. Online. In: Deity components. C2025. Dostupné z: https://www.deitycomponents.com/store/p354/DEFTRAP_PEDALS.html. [cit. 2025-05-08].

[24] *HT pa03a*. Online. In: Ht components. C2025. Dostupné z: https://htpedalsusa.wpengine.com/product/pa03a/?v=7516fd43adaa. [cit. 2025-05-08].

[25] *LOOK pedály TRAIL ROC Fusion*. Online. In: Pepebike. C2025. Dostupné z: https://www.pepebike.cz/look-pedaly-trail-roc-fusion/. [cit. 2025-05-15].

[26] *DEITY Deftrap pedals*. Online. Deity components. C2025. Dostupné z: https://www.deitycomponents.com/deftrap_pedals.html. [cit. 2025-05-17].

[27] *RaceFace Chester pedals*. Online. RaceFace. C2025. Dostupné z: https://www.raceface.com/products/chester-pedal?variant=41117333094482. [cit. 2025-05-17].

[28] *HT Supreme-C / PA32A*. Online. Ht components. C2025. Dostupné z: https://htpedalsusa.wpengine.com/product/ht-supreme-c-pa32a-2/?v=7516fd43adaa. [cit. 2025-05-17].

[29] *HT pa03a*. Online. Ht components. C2025. Dostupné z: https://htpedalsusa.wpengine.com/product/pa03a/?v=7516fd43adaa. [cit. 2025-05-17].

[30] *Look Trail Fusion*. Online. Look. C2025. Dostupné z: https://www.lookcycle.com/cz-en/products/dh-dirt/trail-fusion. [cit. 2025-05-17].

[31] *Crankbrothers Stamp 1 Gen 2 Small*. Online. Crankbrothers. C2025. Dostupné z: https://www.crankbrothers.com/collections/pedals/products/stamp-1-gen-2-small?_pos=2&_fid=6f85ed4e8&_ss=c. [cit. 2025-05-17].

[32] *Crankbrothers Stamp 1 Gen 2 Large*. Online. Crankbrothers. C2025. Dostupné z: https://www.crankbrothers.com/collections/pedals/products/stamp-1-gen-2-large. [cit. 2025-05-17].

[33] *Burgtec MK4 Composite Pedals*. Online. Burgtec. C2025. Dostupné z: https://burgtec.co.uk/product/mk4-composite-pedals/?srsltid=AfmBOopN58dh8jaNq_x-Xk5DptwlU9ErPIVsEMLpb6BoOpA63YSUm2zS. [cit. 2025-05-17].

[34] *OneUp Composite Pedals*. Online. OneUp Components. C2025. Dostupné z: https://eu.oneupcomponents.com/products/comp-pedal. [cit. 2025-05-17].

[35] *Chromag Synth*. Online. Chromag. C2025. Dostupné z: https://chromagbikes.com/products/pedals-synth. [cit. 2025-05-17].

[36] *Supacaz Smash Pedal – Thermopoly*. Online. Specialized. C1996-2025. Dostupné z: https://www.specialized.com/cz/cs/supacaz-smash-pedal--thermopoly/p/217064?color=350278-217064&searchText=09122-3020. [cit. 2025-05-17].

[37] *Tatze CONTACT Composite - MTB Pedal*. Online. Tatze. C2025. Dostupné z: https://tatze-bike.com/en/products/contact. [cit. 2025-05-17].

[38] KOTOMIN, S. V.; KRAMAREV, D. V.; OBIDIN, I. M. a POLUNIN, S. V. Influence of 3D Printing Conditions of Polyethylene Terephthalate Glycol on the Mechanical Properties of Products Based on It. Online. *Polymer Science, Series A*. 2022, roč. 64, č. 6, s. 617-623. ISSN 0965-545X. Dostupné z: https://doi.org/10.1134/S0965545X22700365. [cit. 2025-04-19].

[39] IFTEKAR, Syed Fouzan; AABID, Abdul; AMIR, Adibah a BAIG, Muneer. Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review. Online. *Polymers*. 2023, roč. 15, č. 11. ISSN 2073-4360. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/polym15112519. [cit. 2025-04-19].

[40] *PETG*. Online. Prusa3d. 2022. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059. [cit. 2025-04-20].

[41] EL MAGRI, Anouar; OUASSIL, Salah-Eddine a VAUDREUIL, Sébastien. Effects of printing parameters on the tensile behavior of 3D -printed acrylonitrile styrene acrylate (ASA) material in Z direction. Online. 2022, roč. 62, č. 3, s. 848-860. ISSN 0032-3888. Dostupné z: https://doi.org/10.1002/pen.25891. [cit. 2025-04-20].

[42] *ASA*. Online. Prusa3d. 2025. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809. [cit. 2025-04-20].

[43] BUREŠ, Petr. *3D tisk revoluci v sedlech přináší Specialized a Fi'zi:k*. Online. Mtbs. 2021. Dostupné z: https://mtbs.cz/clanek/3d-tisk-revoluci-v-sedlech-prinasi-specialized-a-fi-zi-k/kategorie/doplnky-na-kolo. [cit. 2025-04-21].

[44] *Posedla*. Online. Posedla. C2020-2024. Dostupné z: https://posedla.cz/pages/careers. [cit. 2025-04-21].

[45] *Geraint Thomas a jeho cesta od nylonu k polymeru aneb jak 3D tisk naboural cyklistický průmysl*. Online. Welovecycling. 2023. Dostupné z: https://www.welovecycling.com/cs/2023/10/11/geraint-thomas-a-jeho-cesta-od-nylonu-k-polymeru-aneb-jak-3d-tisk-naboural-cyklisticky-prumysl/. [cit. 2025-04-21].

[46] HÁJÍČEK, Štěpán. *Udržitelný 3D tištěný bike od Canyonu (prototyp)*. Online. Bikeandride. 2022. Dostupné z: https://www.bikeandride.cz/2022/05/udrzitelny-3d-tisteny-bike-od-canyonu-prototyp/. [cit. 2025-04-21].

[47] *How We Build Your Bike*. Online. Atherton bikes. C2025. Dostupné z: https://www.athertonbikes.com/technology/build-arange.html. [cit. 2025-04-21].

[48] *Atherton A Range 170*. Online. In: Atherton bikes. C2025. Dostupné z: https://www.athertonbikes.com/a170-frame.html. [cit. 2025-05-08].

[49] *Innovative titanium pedal from the 3D printer*. Online. Velomotion. 24 March 2021. Dostupné z: https://velomotion.net/2021/03/myti-innovatives-titan-pedal-aus-dem-3d-drucker/. [cit. 2025-04-24].

[50] *Kickstarter*. Online. 2021, 23 August 2022. Dostupné z: https://www.kickstarter.com/projects/wendelin/titanum-pedals-clipless-3d-printed-aerospace-inspired/description. [cit. 2025-04-24].

[51] *Pinkbike Forum: 3D Printed Flat Pedals - Extremely Lightweight*. Online. In: Pinkbike. 2022, 7 Jan 2022. Dostupné z: https://www.pinkbike.com/forum/listcomments/?threadid=233882. [cit. 2025-04-24].

[52] *Mtb flat pedal bearing multipart*. Online. Printables. 18 December 2023. Dostupné z: https://www.printables.com/model/673804-mtb-flat-pedal-bearing-multipart. [cit. 2025-05-08].

[53] *Bike Pedal*. Online. In: Printables. C2025. Dostupné z: https://www.printables.com/model/589030-bike-pedal. [cit. 2025-05-08].

[54] *ABOUT HT*. Online. Ht components. C2025. Dostupné z: https://www.ht-components.com/ht. [cit. 2025-05-01].

[55] *Supreme ANS10*. Online. Ht components. C2025. Dostupné z: https://htpedalsusa.wpengine.com/product/supreme-ans10/?v=7516fd43adaa. [cit. 2025-05-01].

[56] *HT Components Nano-S Pedal Spindle - ANS10*. Online. In: Worldwide cyclery. C2025. Dostupné z: https://www.worldwidecyclery.com/products/ht-components-nano-s-air-s-pedal-spindle-ans10-chromoly-silver. [cit. 2025-05-08].

[57] JURCA, Ales; ŽABKAR, Jure a DŽEROSKI, Sašo. Analysis of 1.2 million foot scans from North America, Europe and Asia. Online. *Scientific Reports*. 2019, roč. 9, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: https://doi.org/10.1038/s41598-019-55432-z. [cit. 2025-05-01].

[58] *Pedály Chromag Pressure*. Online. In: Pepebike. C2025. Dostupné z: https://www.pepebike.cz/pedaly-chromag-pressure/. [cit. 2025-05-08].

[59] BLONSKY, Marley. *Cycling has a weight problem: a call for the industry to be more transparent about its weight limits*. Online. Cycling weekly. 30 July 2024. Dostupné z: https://www.cyclingweekly.com/news/cycling-has-a-weight-problem-a-call-for-the-industry-to-be-more-transparent-about-its-weight-limits. [cit. 2025-05-01].

[60] BINI, Rodrigo R; HUME, Patria Anne; CROFT, James a KILDING, Andrew Edward. Pedal force effectiveness in Cycling: a review of constraints and training effects. Online. *Journal of Science and Cycling*. 2013, roč. 2, č. 1, s. 11-24. Dostupné z: https://www.jsc-journal.com/index.php/JSC/article/view/32/73. [cit. 2025-05-01].

[61] DEVYS, S.; BERTIN, D. a RAO, G. Does changing the bike frame influence pedal force pattern in mountain bike cyclists? Online. *Science & Sports*. 2019, roč. 34, č. 5, s. e279-e287. ISSN 07651597. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.12.006. [cit. 2025-05-01].

[62] ONASCH, Franziska a HERZOG, Walter. Active control of static pedal force direction decreases maximum isometric force output. Online. *Journal of Biomechanics*. 2024, roč. 163. ISSN 00219290. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.111958. [cit. 2025-05-01].

[63] *ASTM Classification F2043 for Bicycle Rims*. Online. NEXTIE. 2024. Dostupné z: https://www.nextie.com/astm-classification. [cit. 2025-05-01].

[64] BALLIN, Peter. *How Much Do Mountain Bikes Weigh? (Does It Matter?)*. Online. BikeFaff. Dostupné z: https://bikefaff.com/how-much-do-mountain-bikes-weigh/. [cit. 2025-05-01].

[65] MCNITT-GRAY, Jill L. Kinetics of the lower extremities during drop landings from three heights. Online. *Journal of Biomechanics*. 1993, roč. 26, č. 9, s. 1037-1046. ISSN 00219290. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/S0021-9290(05)80003-X. [cit. 2025-05-08].

[66] MOJCHEROVÁ, Andrea. *Kvantifikace distribuce plantárních tlaků a geometrie přednoží v závislosti na charakteru obuvi*. Online, Diplomová práce, vedoucí doc. PaedDr. Karel Jelen, CSc. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Fakulta tělesné výchovy a sportu, 2014. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/70531/DPTX_2013_1_11510_0_390404_0_133462.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2025-05-03].

[67] KABIR, S M Fijul; MATHUR, Kavita a SEYAM, Abdel-Fattah M. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. Online. *Composite Structures*. 1999, roč. 232, s. 5.1-5.2.1. ISSN 02638223. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476. [cit. 2025-05-17].

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Příklady použitých fyzikálních veličin

a	zrychlení
E_k	kinetická energie
E_p	potenciální energie
F	síla
g	tíhové zrychlení
h	výška
m	hmotnost
n	koeficient zatížení během šlapání
t	čas
v	rychlost

9.2 Seznam zkratek

ABS	akrylonitril-butadien-styren
AM	all mountain
ASA	akrylonitril-styren-acrylester
BMX	bicycle motocross
DH	downhill
EN	enduro
FDM	fused deposition modeling
MKP	metoda konečných prvků
MTB	mountain biking
PETG	polyethylentereftalát obohacený o glykol
PLA	polyaktid

TR	trail
XC	cross country

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Horské kolo Kestrel Nitro s první odpruženou vidlicí Rockshox RS-1 [3]…….14

Obr. 2-2 Porovnání první teleskopické sedlovky (dole) s se současným moderním řešením (nahoře) [7]……...15

Obr. 2-3 Časová osa nejdůležitějších milníků při vývoji MTB…….16

Obr. 2-4 Celoodpružené crosscountry kolo Cannondale Scalpel [12]……...17

Obr. 2-5 Celoodpružené Allmontain kolo Switchblade firmy Pivot [13]……..18

Obr. 2-6 Sjezdové kolo Santa Cruz V10 [14]……18

Obr. 2-7 Nášlapný pedál SPD Shimano PD-M520 [18]……19

Obr. 2-8 Platformový pedál Hope F22 s viditelnými kovovými piny po okrajích, upraveno z [20]……...20

Obr. 2-9 Detail kontaktu speciální MTB obuvi Adidas Fiveten s platformovým pedálem [22]……...21

Obr. 2-10 Ukázka plastových platformových pedálů, Deity Deftrap (vlevo) [23] a HT pa03a (vpravo) [24] zahrnutých ve srovnávací tabulce……...22

Obr. 2-11 Pedál Look Trail Fusion zahrnutý ve srovnávací tabulce především kvůli velmi nízké hmotnosti [25]……23

Obr. 2-12 Nabídka barev materiálu PETG v jednom z českých e-shopů……...26

Obr. 2-13 Detail na titanové 3D tištěné spoje rámu Atherton A170 [48]……...27

Obr. 2-14 Představený nášlapný pedál společnosti Titanum GmbH [50]……..28

Obr. 2-15 Ukázka jednoho z modelů pedálů na platformě Printables [53]……29

Obr. 4-16 Použitá osa HT NANO-S ANS10 [56]……..33

Obr. 4-17 Rebuild kit použitý při konstrukci pedálu……34

Obr. 4-18 Osa ložisky, maticí a těsněním……...…34

Obr. 4-19 Popis hlavních rozměrů pedálu, upraveno z [58]……...…35

Obr. 4-20 Symbolický nákres situace při dynamickém zatížení……40

Obr. 4-21 Zobrazení koncepčního řešení GriPed v modelovacím softwaru Fusion360……42

Obr. 4-22 Zobrazení koncepčního řešení GeoPed v modelovacím softwaru Fusion360…...43

Obr. 4-23 Zobrazení koncepčního řešení FeetPed v modelovacím softwaru Fusion360…...44

Obr. 5-24 Zobrazení uložení osy v těle pedálu……..46

Obr. 5-25 Detailní pohled na uložení šroubů a matic M3 tvořící kovové piny v boční straně pedálu ……...47

Obr. 5-26 Těsnící krytka společně s O kroužkem……..48

Obr. 5-27 Zoptimalizované tělo pedálu s trojúhelníkovými žebry a plastovými piny v prostřední části těla……...49

Obr. 5-28 Pohled z boku na pedál GeoPed……49

Obr. 5-29 Rozložení napětí v těle pedálu při maximálním zatížení……...50

Obr. 5-30 Detail na tři kritická místa při maximálním zatížení……..51

Obr. 5-31 Tělo pedálu s krytkou připraveno na tisk……...52

Obr. 5-32 Odlehčení v rozích jako důsledek hmotnostní optimalizace se zobrazenými hlavními rozměry……..54

Obr. 5-33 Testování pedálu v terénu…….55

Obr. 5-34 Detail pedálu namontovaného na klice kola……..56

Obr. 5-35 Pohled na finální verzi pedálu GeoPed…….57

Obr. 5-36 Hmotnost finální verze pedálu společně se všemi potřebnými komponenty…….58

Obr. 5-37 Render finálního pedálu GeoPed……..60

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Srovnání modelů pedálů……24

Tab. 4-2 Tabulka parametrů konstruovaného pedálu……41

Tab. 4-3 Hodnotící tabulka předložených variantních řešení……45

Tab. 4-4 Tabulka komponent s cenami……57

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – 3D model levého pedálu – GeoPed L

Příloha 2 – 3D model pravého pedálu – GeoPed R

Příloha 3 – 3D model krytky – Krytka