



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KONCEPCE KOPÍROVACÍHO ZAŘÍZENÍ KOMBINOVANÉHO ZEMĚDĚLSKÉHO STROJE

CONCEPT OF THE COPYING EQUIPMENT OF THE COMBINED AGRICULTURAL MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zdeněk Češpiva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Zeizinger, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Zdeněk Češpiva**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Zeizinger, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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 diplomové práce:

Koncepce kopírovacího zařízení kombinovaného zemědělského stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvoření konceptu kopírovacího zařízení kombinovaného zemědělského stroje. Kopírovací zařízení je hydraulicky ovládané a umožňuje stavitelnou a kontrolovatelnou výšku zemědělského zařízení vůči obdělávanému povrchu pole. Kopírovací zařízení bude možno integrovat na různé typy zemědělských strojů.

Technické parametry:

Hydraulický tlak pro kopírovací zařízení dle doporučeného tlaku hydraulického obvodu traktoru.

Cíle diplomové práce:

Rešeršní studie stavu poznání v obdobné oblasti zemědělské techniky.

Kinematická koncepční rozvaha polonápravy – zdvih pístnice, rozsah hloubkového vedení.

Konstrukční návrh kopírovacího zařízení.

Silová a pevnostní kontrola pístnice a svařence.

Silová a pevnostní kontrola otočného uložení s rámem stroje.

Analýza výrobní a provozní poruchovosti.

Výkresová dokumentace sestavy kopírovacího zařízení.

Výkresová dokumentace svařence kopírovacího zařízení.

Výrobní výkresová dokumentace prvků svařence.

Seznam doporučené literatury:

SYROVÝ, Otakar. Doprava v zemědělství. 1. vyd. Praha: Profi Press, 2008. ISBN 9788086726304.

VLK, František. Dynamika motorových vozidel. 2. vyd. Brno: František VlK, 2003. ISBN 8023900242.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 8086490742.

SVÁČEK, Petr a Miloslav FEISTAUER. Metoda konečných prvků. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03522-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce v úvodu stručně pojednává o problematice zpracování půdy. Následuje rešerše v oblasti kombinovaných kypřičů. Dále jsou popsány možné koncepce kopírovacích zařízení zemědělských strojů. Hlavní část této práce se zaměřuje na vlastní konstrukční návrh kopírovacího zařízení a následnou pevnostní analýzu svařence pomocí metody konečných prvků. Z vyhodnocených výsledků pevnostní analýzy jsou provedeny úpravy svařence. Práce také zahrnuje pevnostní kontrolu náhrad. Závěrečná část se zaměřuje na provozní a výrobní analýzu poruchovosti. Součástí práce je výkresová dokumentace.

KLÍČOVÁ SLOVA

koncepce kopírovacího zařízení, kombinované kypřiče, polonesený zemědělský stroj, MKP výpočet, pevnostní analýza

ABSTRACT

This diploma thesis provides a brief overview of the soil processing issue in the introduction. It is followed by the research review in the field of combined cultivators. Furthermore, the possible concepts of copying devices for agricultural machinery are described. The main part of this thesis focuses on the actual design proposal of a copying device and subsequent strength analysis of the weldment using the finite element method. Adjustments to the weldment are made based on the evaluated results of the strength analysis. The thesis also includes a strength inspection of replacements. The concluding section emphasizes operational and production analysis of failure rates. The thesis is accompanied by engineering drawings.

KEYWORDS

concept of the copying equipment, combination cultivator, semi-mounted agricultural machine, FEM analysis, strength analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČEŠPIVA, Zdeněk. *Koncepce kopírovacího zařízení kombinovaného zemědělského stroje*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Lukáš Zeizinger. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149634>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Zeizingera, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Zdeněk Čěšpiva

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Lukášovi Zeizingerovi, Ph.D. za odborné rady, ochotu, vstřícnost, připomínky a za čas strávený při psaní této diplomové práce.

Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Luboši Binarovi za odborné konzultace, při nichž se se mnou dělil o cenné zkušenosti z oblasti konstrukce zemědělských strojů a také o praktické rady, které mi usnadnily vypracování této práce.

Také bych chtěl poděkovat rodičům za jejich podporu, trpělivost a motivaci, kterou mi po celou dobu studia na VUT FSI v Brně poskytovali.

OBSAH

Úvod	10
1 Půda	11
1.1 Konvenční způsob zpracování půdy	12
1.2 Minimalizační zpracování půdy.....	12
1.3 Přímé setí do nezpracované půdy	13
2 Kombinované kypřiče	14
2.1 Väderstad TopDown 300-700.....	14
2.2 Lemken Karat 12	16
2.3 Hosrch Tigger MT	18
3 Koncepce kopírovacího zařízení	20
3.1 Oboustranně uložené kopírovací kolo	20
3.2 Letmo uložené kopírovací kolo	21
4 Kombinovaný kypřič Triton Heavy	23
4.1 Konstrukční návrh kopírovacího kola.....	24
4.2 Kinematická rozvaha kopírovacího kola	26
4.3 Rozbor zatížení	28
5 Model pro MKP	31
5.1 Geometrie modelu.....	31
5.2 Konečno-prvková síť	32
5.2.1 Náhrada čepů	33
5.2.2 Náhrada přímočarého hydromotoru a čepu	34
5.3 Materiál modelu	35
5.4 Okrajové podmínky	36
6 Pevnostní analýza	38
6.1 Výsledky pevnostní analýzy původního svařence kopírovacího kola	38
6.2 Úpravy svařence kopírovacího kol	40
6.3 Výsledky pevnostní analýzy upraveného svařence kopírovacího kola	41
7 Pevnostní kontrola náhrad	43
7.1 Kontrola čepů.....	43
7.2 Kontrola přímočarého hydromotoru	46
8 Analýza provozní a výrobní poruchovosti	50
Závěr	53
Použité informační zdroje	54
Seznam použitých zkratk a symbolů	56
Seznam příloh	58
Seznam samostatných příloh	58

ÚVOD

Zemědělství patří mezi nejstarší a nejdůležitější činnosti lidstva. Zabývá se pěstováním plodin a chovem zvířete za účelem získání potravin, energie a dalších surovin. Je to jeden z klíčových prvků sloužících k přežití a rozvoji.

Původní zemědělství bylo prováděno ručně nebo za pomoci zvířat, což bylo velmi náročné a zdlouhavé. Díky průmyslové revoluci v 18. a 19. století se to změnilo. Lidé začali využívat stroje a mechanizaci, která jim umožnila zvýšit efektivitu. Používali nové technologie, jako jsou umělá hnojiva či pesticidy, které zvýšily výnosnost. Postupem času se zemědělství stalo ještě více industrializované. Probíhalo zavedení traktorů a chemických hnojiv. Objevovaly se také první problémy, jako znečišťování vodních zdrojů nebo degradace půdy.

V současné době čelí zemědělství novým výzvám a změnám, které vyžadují inovativní přístup a adaptaci na nové podmínky. Mezi hlavní výzvy patří udržitelnost zemědělství, což zahrnuje snahu minimalizovat negativní dopady na životní prostředí a zároveň zajišťovat dlouhodobou udržitelnost zemědělské výroby. Je zde silný konkurenční trh, což velmi ovlivňuje celou oblast. Zemědělci se snaží optimalizovat své postupy a využívat moderní technologie a stroje, které umožňují efektivní zpracování půdy a snižování nákladů.

Mezi tyto stroje, které se využívají v zemědělství, je možné zařadit kombinované kypřiče. Jsou to stroje, které zefektivňují zpracování půdy a také zvládají provést více operací současně. Tyto stroje mají široký záběr, což umožňuje rychlejší a účinnější práci na poli. Jednou z nevýhod kombinovaných kypřičů je jejich celková hmotnost, která může být poměrně vysoká. Proto se na tyto stroje umisťují kopírovací kola, která udržují stabilitu stroje a snižují namáhání hlavní konstrukce tím, že nesou část hmotnosti.

Tato diplomová práce se zaměřuje právě na návrh kopírovacího kola pro kombinovaný zemědělský kypřič. Je realizována ve spolupráci se společností Farnet, a.s., která má dvě divize. Právě jedna z těchto divizí se zaměřuje na výrobu zemědělských strojů, a to již od roku 1992. Druhá divize se zabývá výrobou technologií pro lisování olejnatých semen a extruzi krmiv.

Úvod práce je věnován stručnému uvedení do problematiky zpracování půdy a kombinovaným kypřičům. Následně jsou řešeny možné koncepční varianty kopírovacích kol. Na tuto část navazuje samotný návrh kopírovacího kola. Při návrhu je využita pevnostní kontrola svařence pomocí metody konečných prvků. Na základě pevnostní analýzy jsou provedeny úpravy svařence pro zlepšení jeho pevnosti. Návrh obsahuje i kontrolní výpočty pro zvolené komponenty.

Důležitou součástí práce je také analýza rizik spojených s výrobou a provozem kopírovacího kola. Tím se přispěje k zajištění bezpečnosti, ochraně životního prostředí a snižování rizika při používání. Diplomová práce obsahuje i výkresovou dokumentaci.

1 PŮDA

Půda je jeden z mnoha neobnovitelných přírodních zdrojů, který slouží k pěstování rostlin a chovu zvířat. Je to nejsvrchnější vrstva zemské kůry, o kterou je nutné se starat, aby měla stále stejné vlastnosti či dokonce lepší. Avšak půda je stále více zatěžována výkonnější a větší technikou, na kterou jsou kladeny vyšší požadavky. Tyto požadavky vycházejí z ohledu na to, že v zemědělství v posledních letech ubývá pracovníků. Zemědělská technika se stává těžší než dříve a dochází tedy k většímu ztuhnutí půdy. Při zpracování je třeba se také zaměřit na odplevelení, k čemuž se využívají talířové nástroje. Díky tomu se snížilo množství použitých herbicidů. Povrch se musí udržovat co nejvíce hladký a rovný, což zejména napomáhá ke sklizni s malými ztrátami. Mezi další důležitou oblast, na kterou je nutné se zaměřit patří ochrana před erozí půdy, a to zejména větrnou, která silně závisí na způsobu obdělávání povrchu. [1]
















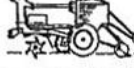

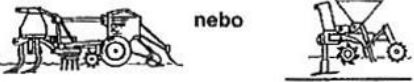




Mezi důležité vlastnosti půdy z hlediska technologie zpracování se řadí některé fyzikální vlastnosti, jako například šterkovitost, přilnavost, struktura, vlhkost, vnitřní a vnější tření a mechanické složení. Šterkovitost má zásadní vliv na volbu materiálů pracovních jednotek, kde se v současnosti využívají nejčastěji otěruvzdorné materiály jako hardox. Struktura půdy má vliv na orební odpor. Při vyšším výskytu částic menších než 0,1 mm roste orební odpor, a se snižujícím se podílem těchto částic a s vyšším výskytem větších částic odpor klesá. Orební odpor závisí také na vlhkosti půdy, kdy při vyšší vlhkosti je odpor vyšší, jelikož se zemina lepí na orební nástroje. Tím se narušuje celý technologický proces a zhoršuje se výsledná kvalita práce. [1]

Podle posledních dat ministerstva zemědělství k 31. 12. 2020 činní zemědělská půda více než polovinu celkové rozlohy ČR, kde největší zastoupení má orná půda. Z rozlohy 53,25 % zemědělské půdy činní orná půda 37,17 %. Z dlouhodobých statistik vyplývá, že od roku 1999 dochází k neustálému úbytku zemědělské půdy, zejména orné. Avšak i přes zmenšení plochy orné půdy dochází k mírnému zvyšování produkce rostlinné výroby. A to i přes občasné výkyvy, které mají za následek proměnlivé a klimatické podmínky posledních let. Proto je zpracování půdy velmi důležité. [4], [18]

Oblasti zpracování půdy se v poslední době věnuje velká pozornost, neboť má podstatný vliv na výnosnost rostlin. Také je snaha omezit její nežádoucí poškození. Novým trendem v této oblasti se stává snižování ztuhnutí, omezení počtu přejezdů traktoru a snížení nadměrného obdělávání, které způsobuje vysychání. Vhodně zvolená technologie závisí též na klimatických podmínkách. V oblastech s chladnějším a vlhčím podnebím se jeví jako nejlepší hlubší zpracování půdy. V oblastech se sušším podnebím je důležité hospodařit s půdní vlhkostí, využívá se technologie s omezeným zpracováním půdy či dokonce přímé setí do nezpracované půdy. [1]

V současné době je možné rozdělit zpracování do tří základních skupin (viz. *Obr. 1*): [2]

- Konvenční způsob zpracování
- Minimalizační způsob zpracování
- Přímé setí do nezpracované půdy

Způsob zpracování půdy a zakládání porostu	Pracovní postupy zpracování půdy			Pracovní operace
	Základní zpracování půdy	Předseťová příprava půdy	Setí	
Konvenční zpracování půdy s orbou		 nebo 		oddělené
		 nebo 		spojená předseťová příprava a setí
				všechny operace spojeny
Konzervační zpracování půdy bez orby s kypřením	 nebo 	 nebo 		oddělené
	 nebo 	 nebo 		spojená předseťová příprava a setí
				všechny operace spojeny
bez kypření		 nebo  nebo 		bez základního zpracování půdy spojená předseťová příprava a setí
Přímé setí bez zpracování půdy				jen setí

Obr. 1 Technologie zpracování půdy [1]

1.1 KONVENČNÍ ZPŮSOB ZPRACOVÁNÍ PŮDY

Jedná se o tradiční a ověřený způsob, který má na našem území velkou tradici. Mezi typické znaky této metody patří každoroční zpracování pomocí radličných nebo dlátových pluhů či podmítačů. Dochází zde ke zpracování ornice a jejího smísení s posklizňovými zbytky, plevely a hnojivy v celé hloubce a je dosaženo čistého povrchu půdy. Orba může být prováděna v několika různých hloubkách, a to od hloubky 7 cm, nazývané též jako podmítka, až do hloubek 100 cm – velmi hluboká orba. Mezi nevýhody je možné zařadit vznik půdní krusty. Tato vrstva půdy je mnohem hůře prostupná pro vzcházející rostliny či pro vodu. Využívá se nejčastěji pro těžké půdy, které je nutno pravidelně kypřit. [1], [3]

1.2 MINIMALIZAČNÍ ZPRACOVÁNÍ PŮDY

Minimalizační či konzervační technologie zpracování je technologie bez orby. Tato technologie zpracování půdy se dále rozděluje. [2]

- Minimalizace s kypřením půdy do malé hloubky – když se vyskytnou případy zhutnění, je možné půdu hlouběji prokypřit bez obracení. [2]
- Půdoochranné zpracování půdy – při tomto zpracování zůstává nejméně 30 % povrchu po zasetí pokryto zbytky mezplodin či předplodin. [2]

U této technologie je půda zpracována do menší hloubky a nedochází k jejímu obracení, používá se zde pouze kypření. Hlavními stroji při této metodě jsou talířové, radličkové či dlátové kypřiče s různými pracovními orgány. Mezi hlavní výhody této metody patří snížení energetické a finanční náročnosti, a to díky spojení několika různých operací, které jsou zvládnuty během jednoho přejezdu. Dochází zde ke snížení půdní eroze a k zvýšení půdní vlhkosti. Nevýhodou této metody je nezpracování plevelů a posklizňových zbytků do půdy, a tudíž je nutné použití herbicidů. [1], [2]

1.3 PŘÍMÉ SETÍ DO NEZPRACOVANÉ PŮDY

Jedná se o technologii, kdy odpadá po sklizni předplodin její zpracování, což je z ekonomického hlediska výhodné. Tato metoda je nejučinnější z hlediska ochrany před erozí a využívá se zejména v oblastech se sušším podnebím. V posledních letech je to i případ střední Evropy, kvůli snižujícímu se počtu úhrnu srážek. Využívá se speciálních secích strojů se secími botkami (*Obr. 2*), které mají za úkol uložit semeno v dostatečné hloubce a přikrýt ho. Avšak tato technologie má i své zápory, a to zejména větší nároky půdy na hnojení. Také je zde zvýšené riziko šíření plevelů, což vede k nutnosti používat více herbicidů. [1], [3]

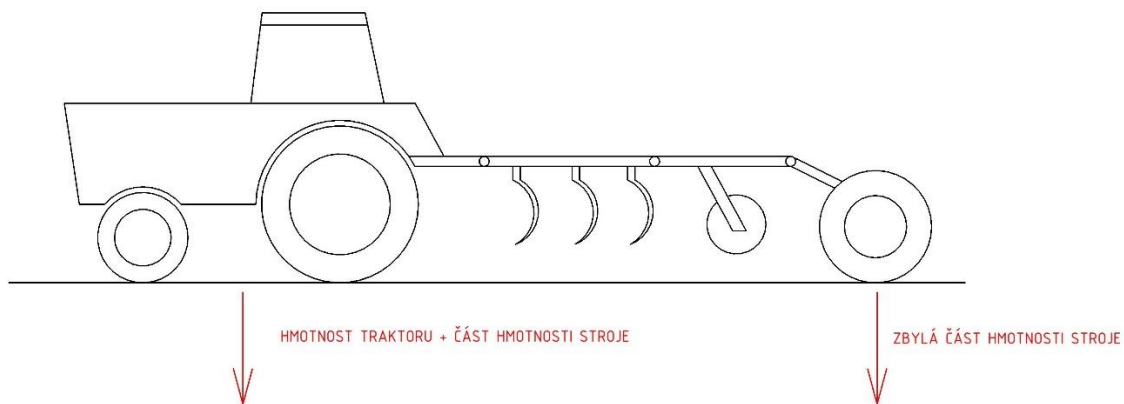


Obr. 2 Jednokotoučová secí botka Väderstad [5]

2 KOMBINOVANÉ KYPŘIČE

Kombinované kypřiče se v některých literaturách mohou vyskytovat i pod názvy intenzivní kypřič či víceúčelový kultivátor. Jsou to stroje, které umožňují provádět více operací během jednoho přejezdu. Využívají se v minimalizačním zpracování půdy, a to zejména pro úpravu strniště a zpracování zbytků předplodin či meziplodin do hloubek až 40 cm.

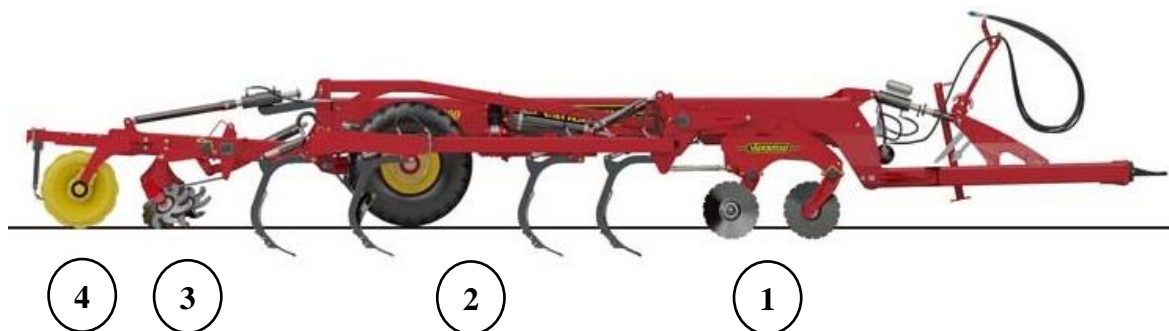
Tyto stroje jsou koncipované jako polonesené. To znamená, že část hmotnosti stroje je nesena jeho podvozkem, zatímco zbytek hmotnosti nese traktor přes dva body tříbodového závěsu. To je vidět na *Obr. 3*. Výhodou tohoto řešení je hlavně snížení namáhání tříbodového závěsu, čímž dochází k výraznému prodloužení jeho životnosti. Mezi nesporné výhody též patří menší zatížení pneumatik zadní nápravy traktoru, které je možné hustit menšími tlaky. Toto opatření přispívá k menšímu utužení půdy a ke snížení spotřeby paliva či k snížení prokluzu kol. [6]



Obr. 3 Polonesený stroj

2.1 VÄDERSTAD TOPDOWN 300-700

TopDown je kombinovaný polonesený kypřič. Stroj se vyrábí v několika různých šířkách a to od 3 do 7 metrů, kde účinný pracovní záběr se pohybuje v rozmezí 2,65–6,75 metrů. Celý stroj se dá rozdělit na čtyři pracovní zóny (*Obr. 4*). [7]



Obr. 4 Väderstad TopDown [7]

V první zóně jsou namontovány disky s roztečí 12,5 cm o průměru 450 (*Obr. 7*) nebo 470 mm. Jsou vyrobeny z oceli V-55, která je přímo patentována firmou Väderstad. Disky slouží k řezání zbytků plodin a jejich zapracování do vrchní půdy. V druhé pracovní zóně se nachází radličky, které mají rozteč 27 cm. [7]

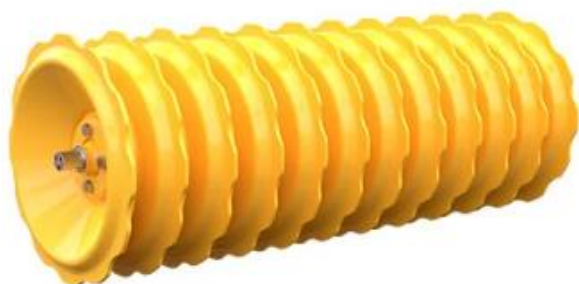
Radličky jsou jištěny proti přetížení v případě najetí na kámen na 700 kg. Tato zóna slouží ke kypření, distribuci a míchání půdy až do hloubek 30 cm. Při použití speciálního ostří DeepLoosing může stroj pracovat až do hloubky 40 cm.

V této zóně se navíc u strojů šířky 6 a 7 metrů montují kopírovací kola (Obr. 5). Ta mají rozměr 400/60-15,5. Kopírovací kola jsou letmo uchycená a směřují proti směru jízdy. Konstrukce kopírovacího kola využívá jeden hlavní svařenec, který obsahuje jak uchycení k rámu stroje, tak i polonápravu. Jejich pohyb a nastavení pracovní hloubky je zajištěno pomocí přímočarého hydromotoru. [7]



Obr. 5 Väderstad TopDown – kopírovací kolo [7]

Třetí zóna slouží k dokonalému urovňání půdy, a to díky použití hydraulicky nastavitelných urovňovacích disků. Ty mají utěsněná ložiska, která nevyžadují údržbu. Poslední pracovní zóna slouží k opětovnému utužení půdy pomocí dvojitých válců s profilem ve tvaru U, nebo je zde možné mít jeden nebo dva za sebou SteelRunners (Obr. 6). To jsou válce, které mají agresivní profil. Díky němu drtí hroudy a zajišťují jejich rovnoměrné utužení. TopDown může být také vybaven o přihnojovací soupravou nebo malou secí soupravou, která umožní rychlý výsev drobnosemenných plodin, meziplodin nebo krycích plodin. [7]



Obr. 6 Single SteelRunner [7]



Obr. 7 Disk 450 mm [7]

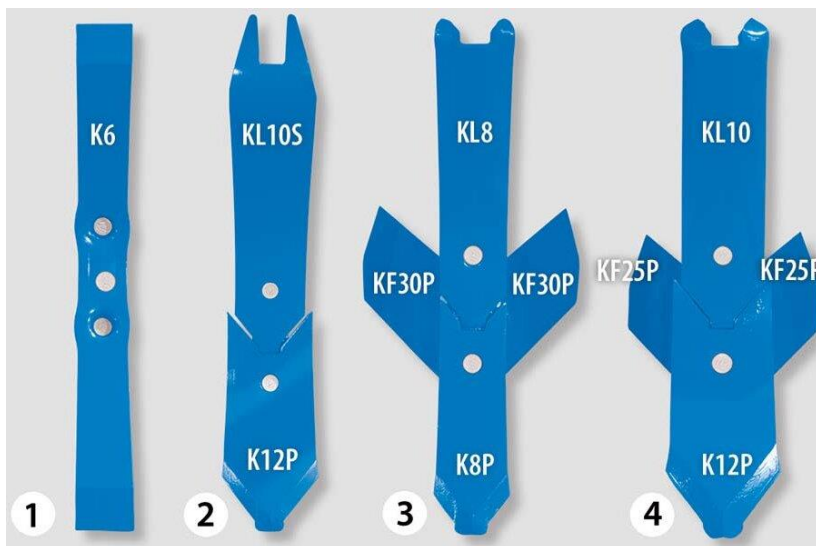
2.2 LEMKEN KARAT 12

Lemken Karat 12 (*Obr. 8*) je kombinovaný kypřič od německé společnosti Lemken. Vyrábí se v rozměrech od 4 do 7 metrů. Na tomto stroji jsou pouze tři pracovní zóny. Chybí zde disky před radličkami. [8]



Obr. 8 Lemken Karat 12 [8]

V první pracovní zóně jsou radličky, které pracují v hloubce od 5 cm do 30 cm. Na *Obr. 9* lze vidět čtyři druhy radliček, které je možné na stroj namontovat. Radlička číslo 1 se používá pro nejhlubší kypření, a naopak radlička číslo 4 je pro mělký. Její výhodou je vysoká intenzita míchání. Radličky lze snadno vyměnit bez použití nářadí, díky speciálnímu klínu s nosem. Radličky mají vypínací sílu 550 kg. Dokážou se vychýlit až o 20 cm směrem vzhůru. [8]



Obr. 9 Radličky - 1. Pro hluboké kypření, 2. Střední kypření, 3. Celoplošné kypření, nízká intenzita míchání, 4. Celoplošné kypření, vysoká intenzita míchání [8]

V této zóně jsou také v první řadě vedle radliček umístěna kopírovací kola o rozměru 11,5/80-15,3. Jsou montována po směru jízdy a jsou letmo uložena (*Obr. 10*). Firma Lemken využila originální konstrukci, která zahrnuje jeden hlavní svařenec. [8]

Ten je vyroben ze silnostěnné trubky a silného plechu, k rámu je přichycen pomocí ok. Polonáprava je připevněna ke konstrukci svařence pomocí šroubů. Nastavení pracovní hloubky a celý pohyb kopírovacího kola je zajištěn přímočarým hydromotorem. V následující zóna jsou umístěny urovnávací disky. [8]



Obr. 10 Lemken Karat – kopírovací kolo [25]

V poslední části stroje mohou být montovány různé typy válců. Nejčastěji se jedná o speciálně vyvinuté packerválce (*Obr. 11*). Ty mají v první řadě válce se speciálním profilem, který dokonale rozdrobí a utuží půdu. Následuje ho zadní válec s W profilem pro urovnání secího lůžka. Tento kypřič je možné použít bez zadních válců, pokud není nutné ztuhnout půdu. [8]



Obr. 11 Packerválec [8]

2.3 HOSRCH TIGGER MT

Polonesený kombinovaný kypřič Tigger MT (*Obr. 12*) je vyráběný v pracovních šířkách 3 až 7,5 metru. V šířce 4 metry se vyrábí dvě varianty, a to buď se sklopným nebo nesklopným rámem. Tento stroj je konstruován se čtyřřadým uspořádáním pracovních nástrojů podobně jako TopDown od firmy Väderstad. [9]



Obr. 12 Horsch Tigger MT [9]

V první části jsou dvě řady disků o průměru 680 mm a rozteči 40 cm. Tyto disky jsou nezávislé na radličkách a je možno jim nastavit zvlášť pracovní hloubku. Disky spolehlivě nařežou zbytky plodin a následně je zamíchají až do hloubky 20 cm. [9]

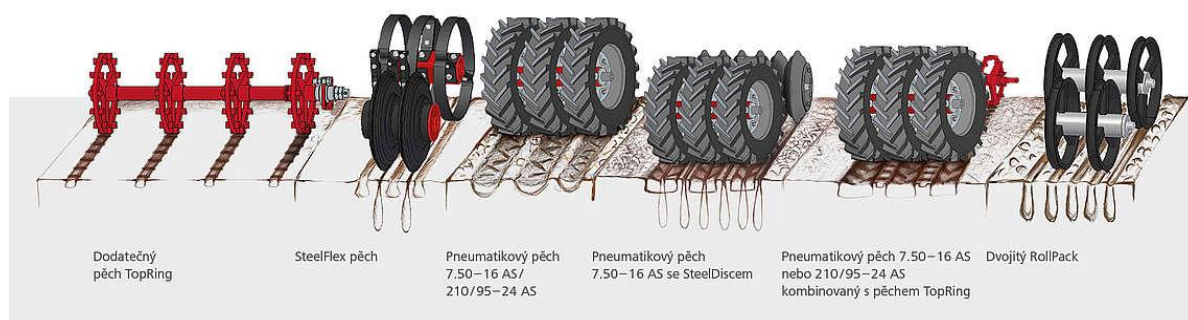
V této části mohou být umístěna kopírovací kola. Firma Horsch ve většině případů k nesení tíhy stroje nevyužívá kopírovací kola, ale zadní válce. Proto je zde konstrukce kopírovacího kola velmi jednoduchá (*Obr. 13*). Nastavení pracovní polohy je zajištěno mechanicky pomocí páky. [9]



Obr. 13 Horsch Tiger MT – kopírovací kolo [9]

Následují dvě řady radliček, které mají vypínací sílu při najetí na kámen až 770 kg a výšku zdvihu 28 cm. Radličky mají rozteč 45 cm. Je možno použít několik druhů radliček, které dosahují pracovní hloubky až 35 cm. [9]

V poslední sekci lze umístit až pět různých druhů válců a jejich volba závisí na typu půdy. Všechny druhy válců je možné vidět na *Obr. 14*. Lze použít volitelný pneumatikový válec o průměru 1 m, což zaručuje spolehlivou únosnost na lehkých půdách. Pneumatiky na těchto válcích jsou vyplněny polyuretanovou hmotou. Toto specifické plnění pneumatik zajistí, menší náchylnost na defekty, díky tomu nedochází ke zbytečným časovým prostojům. [9]



Obr. 14 Typy válců Horsch [9]

Variantu Tigger 4 MT v nesklopné verzi je možné doplnit o nástavbu na přihnojování (*Obr. 15*). Tato nástavba je buď jednokomorová nebo dvoukomorová, kde lze aplikovat dvě různá hnojiva. Tato varianta má vyšší aplikační účinky. Objem zásobníku je 2 800 litrů a hnojivo je přivedeno ke každé radličce. [9]



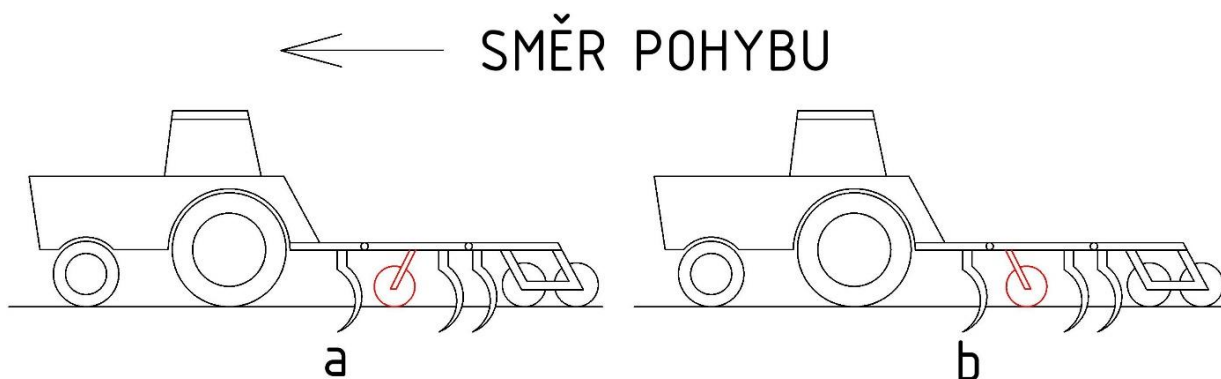
Obr. 15 Dvoukomorový zásobník pro Tigger MT [9]

3 KONCEPCE KOPÍROVACÍHO ZAŘÍZENÍ

V této kapitole jsou představeny dvě základní koncepce kopírovacího zařízení a zároveň jejich funkce.

Kopírovací kola jsou jednou z možných kopírovacích zařízení na zemědělských strojích, jako další se využívají zadní válce. Kopírovací kola se využívají na mnoha strojích, jako jsou kombinované kypřiče, diskové podmiťáče, kultivátory či secí stroje. Důležitá jsou především u strojů s větší šířkou záběru, kde výrazně roste jejich hmotnost. Kola jsou nejčastěji umístěna v přední nebo střední části stroje. Mohou plnit několik různých funkcí. Za prvé zamezují kývání stroje okolo jeho podélné osy, a tím umožňují práci ve vyšších rychlostech. Dále slouží k nesení vlastní tíhy stroje při jeho práci. Umisťují se na boční rámy, čímž zaručují, že nedojde k vyměření nebo zahlubování stroje na jeho krajích. Také garantují, že nastavená pracovní hloubka orby či setí bude v celém pracovním záběru stejná a tím se zvýší výnosnost výsledné úrody. Jejich pracovní poloha může být stálá nebo nastavitelná, a to díky použití přímočarého hydromotoru.

Podle směru pohybu existují dvě základní koncepce uložení, které jsou na *Obr. 16*. V levé části obrázku je kolo umístěno proti směru pohybu, zde dochází k většímu namáhání konstrukce kopírovacího kola. V pravé části obrázku je vidět druhá varianta po směru jízdy. Zde dochází k menšímu namáhání konstrukce kopírovacího kola.



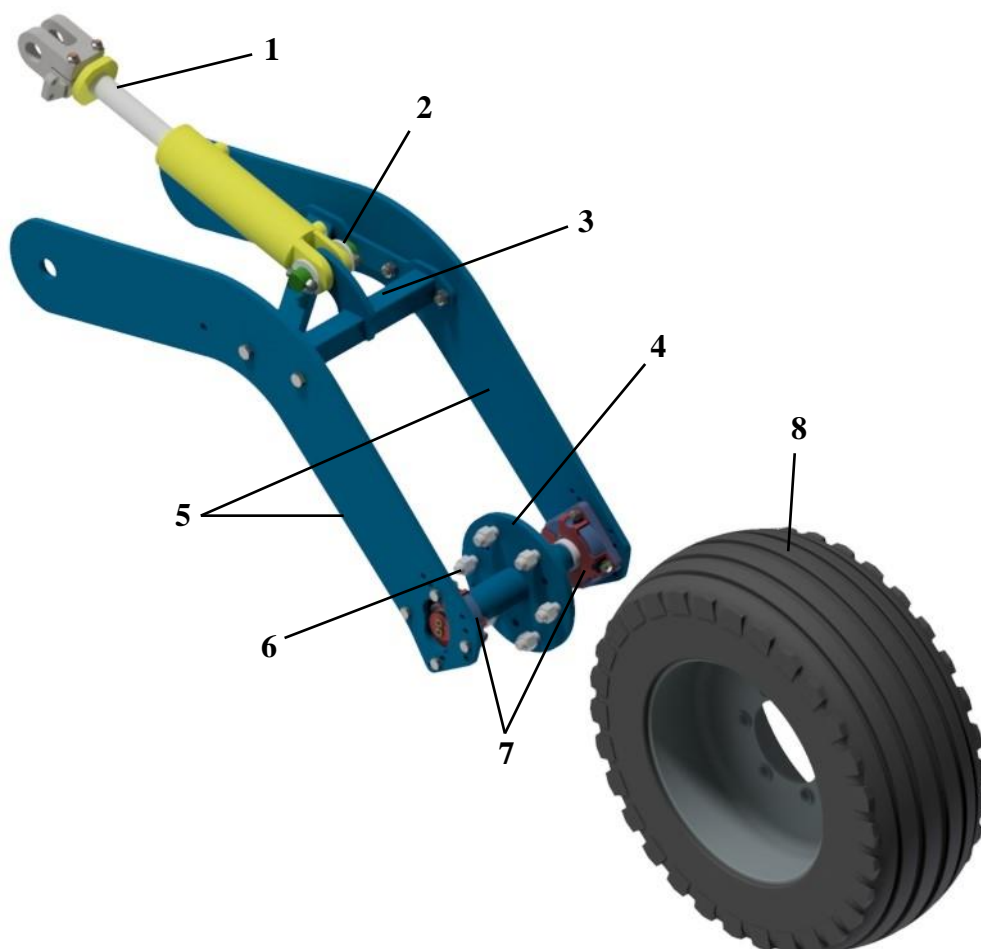
Obr. 16 Kopírovací kolo – a) proti směru jízdy, b) po směru jízdy

Další možné koncepce kopírovacího kola jsou dle typu uložení, a to buď letmo uložené nebo oboustranně.

3.1 OBOUSTRANNĚ ULOŽENÉ KOPÍROVACÍ KOLO

Na *Obr. 17* je vidět koncepční návrh oboustranně uloženého kola. Tato varianta se skládá z několika částí. Hlavními nosnými prvky konstrukce jsou dva nosné plechy do tvaru písmene C. Mezi nimi jsou umístěny dva svařence. První svařenec se skládá z hřídele, k níž je přivařena příruba s dírami pro kolové čepy. Celý svařenec je uložen na každé straně do ložiskového domku, které jsou uchyceny do nosných plechů. Ve střední části nosných plechů se nachází druhý svařenec. Ten zvyšuje tuhost celé konstrukce kopírovacího kola a také slouží k připojení přímočarého hydromotoru ke konstrukci pomocí čepu. Celý svařenec je připevněn k nosným plechům pomocí šroubů.

Pro tento svařenec je klíčová jeho tuhost, aby docházelo ke správnému přenosu sil z přímočarého hydromotoru do zbytku konstrukce. Také zabraňuje nežádoucím deformacím.



Obr. 17 Oboustranně uložené kopírovací kolo, 1 – přímočarý hydromotor, 2 – čep, 3 – svařenec, 4 – svařenec, 5 – nosné plechy, 6 – kolový čep + matice, 7 – ložiskové domky, 8 – disk s pneumatikou

Nedílnou součástí konstrukce je pneumatika s diskem. Disk je přichycen k přírubě pomocí kolových matic a čepů. Celou konstrukci spojíme s rámem stroje pomocí čepů.

Konstrukce může být vyrobena ve dvou variantách, a to buď po směru nebo proti směru jízdy. Tato koncepce kopírovacího kola snáší lépe vyšší zatížení, avšak při přibližné ceně 30 Kč za kilogram oceli vychází celá konstrukce draž. Dále je nutné ještě připočítat cenu spojovacího materiálu a ložiskových domků.

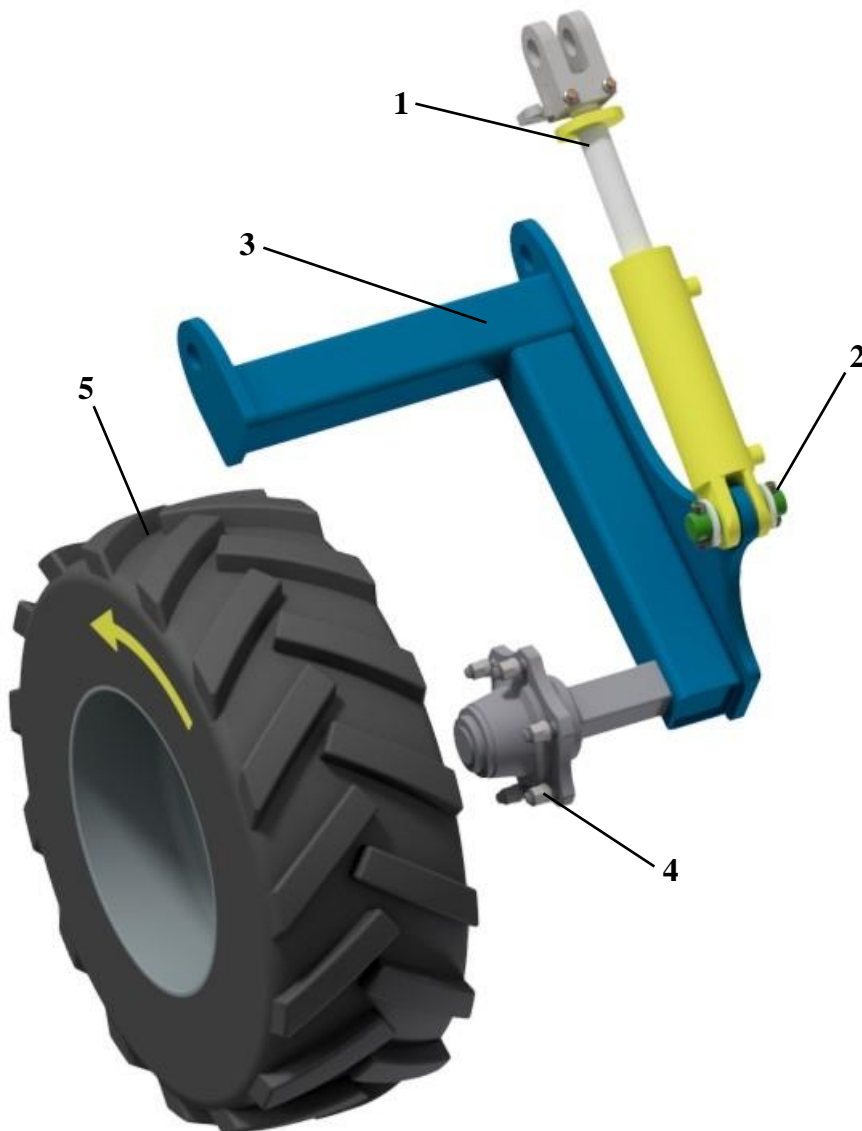
3.2 LETMO ULOŽENÉ KOPÍROVACÍ KOLO

Na *Obr. 18* je vidět varianta letmo uloženého kopírovacího kola. I tato koncepce může být ve dvou variantách jako předchozí.

Hlavní a nejdůležitější část této konstrukce tvoří svařenec. Ten se skládá zde dvou čtvercových profilů, které jsou na sebe kolmé. Na čtvercový profil je z boku přivařen nosný plech, který slouží k uchycení přímočarého hydromotoru.

Tento hydromotor je přichycen ke konstrukci pomocí čepu. Dále svařenec obsahuje též nakupovanou polonápravu. Tím odpadá nutnost kupovat ložiskové domky, jelikož polonáprava již obsahuje dvě kuželíková ložiska namontována do O.

Kupovaná polonáprava obsahuje i kolové čepy. Poslední částí svařence je oko, které zároveň slouží i jako ukončení čtvercového profilu, aby tam nezatékala voda. Důležitou součástí konstrukce je pneumatika s diskem přichycena k polonápravě pomocí kolových matic. Konstrukce je spojena s rámem stroje pomocí čepů.



Obr. 18 Letmo uložené kopírovací kolo, 1 – přímočarý hydromotor, 2 – čep, 3 – svařenec, 4 – kolové matice, 5 – disk s pneumatikou

U této koncepční varianty dochází k torzi, kdy síla působící na kolo celý svařenec kroutí a ohýbá. Vzhledem k množství použitého materiálu je celá konstrukce levnější, a to s i cenou za polonápravu. Další výhodou této koncepce je lepší přístupnost k pneumatice, kdy při její výměně nebo opravě není nutné nic rozebírat. Stačí pouze povolit matice a kolo lze sundat z polonápravy.

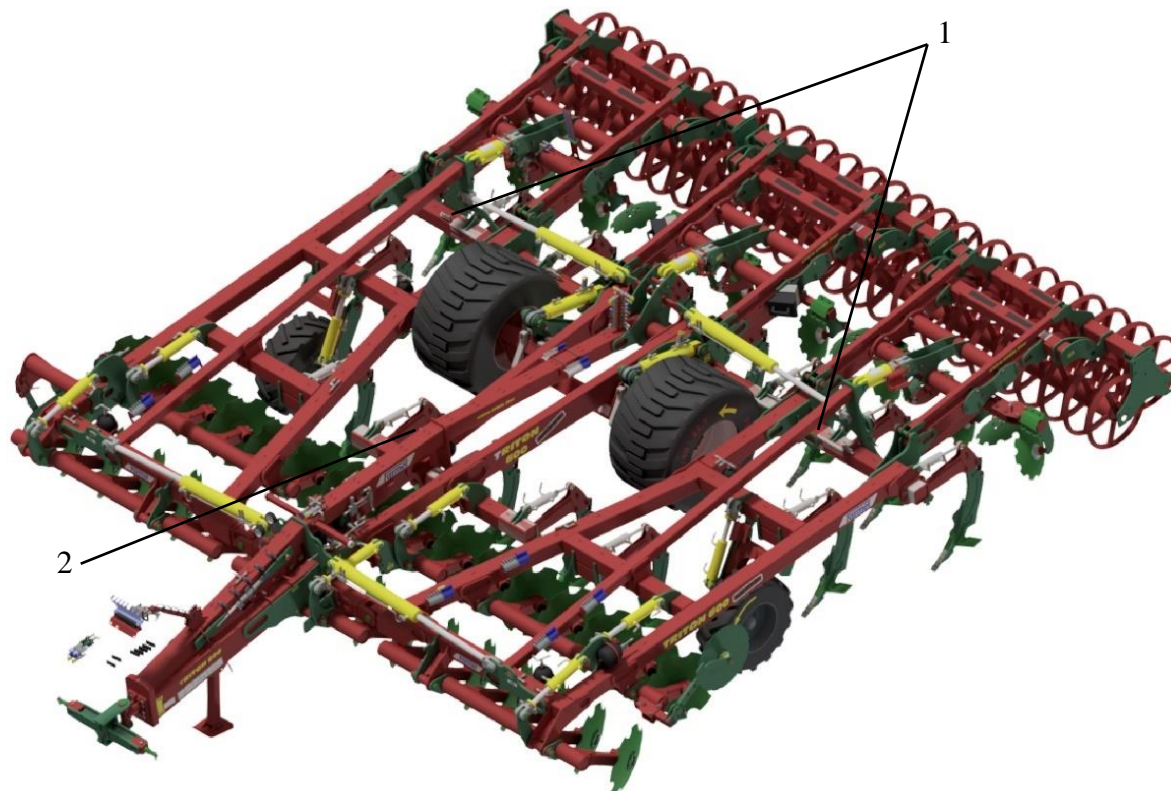
4 KOMBINOVANÝ KYPŘIČ TRITON HEAVY

Triton Heavy 600 je kombinovaný kypřič, používající se při minimalizační technologii zpracování půdy. Stroj se řadí do modelové řady Triton Heavy, která se nabízí v pracovních šířkách od 2,8 do 6 metrů. Stroj se při pracovní šířce 2,8 metru vyrábí jako nesený, ostatní varianty se vyrábí jako polonesené. [10]

Celý stroj je možné rozdělit do čtyř pracovních zón. První pracovní zóna obsahuje dvě řady disků pro rozsekání zbytků plodin a jejich zapracování do svrchní půdy. Obě řady mohou být nastaveny do jiné pracovní polohy pomocí hydrauliky, což například způsobí, že přední řada disků je níž než zadní a dochází k agresivnějšímu zpracování půdy. Disky mohou mít průměr 510 nebo 560 mm. [10]

V další pracovní zóně jsou radličky. Stroj má radličky ve třech řadách, kdy jedna řada má pouze dvě radličky a ty jsou umístěny za kopírovacími koly. Radličky jsou jištěny proti najetí na kámen pomocí hydrauliky. Jsou vyrobeny z ořezuvzdorné a vysokopevnostní oceli. Na špici jsou umístěny plátky se slinutými karbidy pro zvýšení životnosti. Pro další zvýšení životnosti je možné doplnit i horní část radličky o plátky se slinutými karbidy, či návary z tvrdokovu. [10]

Třetí pracovní zóna obsahuje urovňovací disky, které jsou bezúdržbové a slouží k rozmělnění hrud a urovnání povrchu po radličkách. V poslední pracovní zóně jsou válce pro zjemnění a utužení půdy. Je možné použít několik různých typů válců. Určení správného typu válce je velmi důležité, jelikož má velký vliv na výslednou kvalitu zpracování. [10]



Obr. 19 Triton heavy 600, 1 – boční rám, 2 – střední rám

Celý stroj je také možné doplnit o jednotku Micro Drill, která se používá pro výsev jemných semen.

Celý stroj je možné vidět na *Obr. 19*. Triton Heavy 600 se skládá ze dvou bočních rámu, na kterých jsou navěšeny pracovní nástroje. Jsou na nich připevněny rámy pro zadní válce a také kopírovací kola. Boční rámy jsou spojeny pomocí čepů ke střednímu rámu. Jejich sklápění je zajištěno přímočarým hydromotorem. Základem středního rámu je náprava, která slouží pro transport stroje po komunikaci. Náprava je hydraulicky ovládaná a slouží též k otáčení stroje na souvrati. Stroj je možno připojit k traktoru třemi způsoby. Pomocí oka do spodního závěsu, závěsu K80 nebo přes dva body tříbodového závěsu. [10]

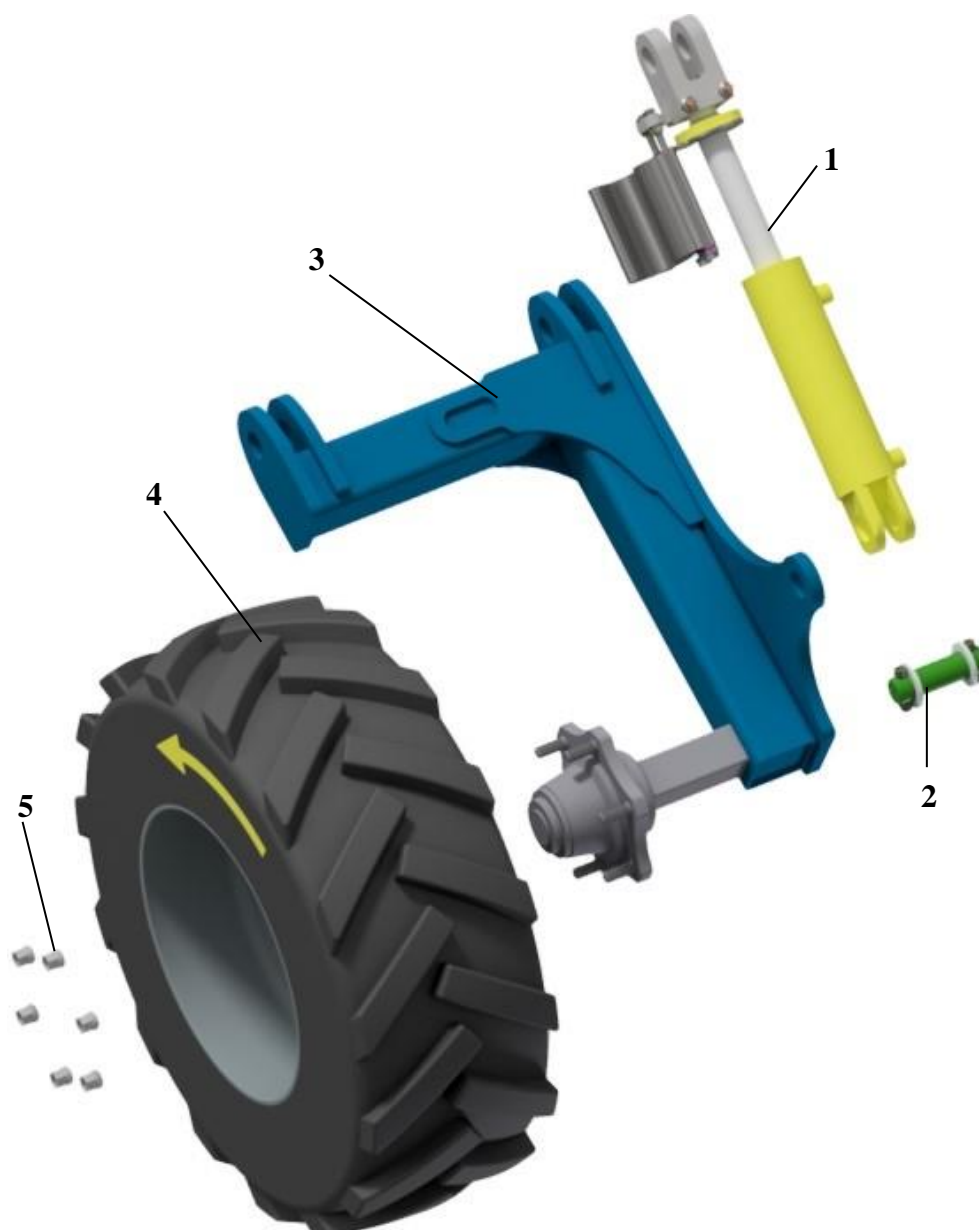


Obr. 20 Závěs K80 [10]

4.1 KONSTRUKČNÍ NÁVRH KOPÍROVACÍHO KOLA

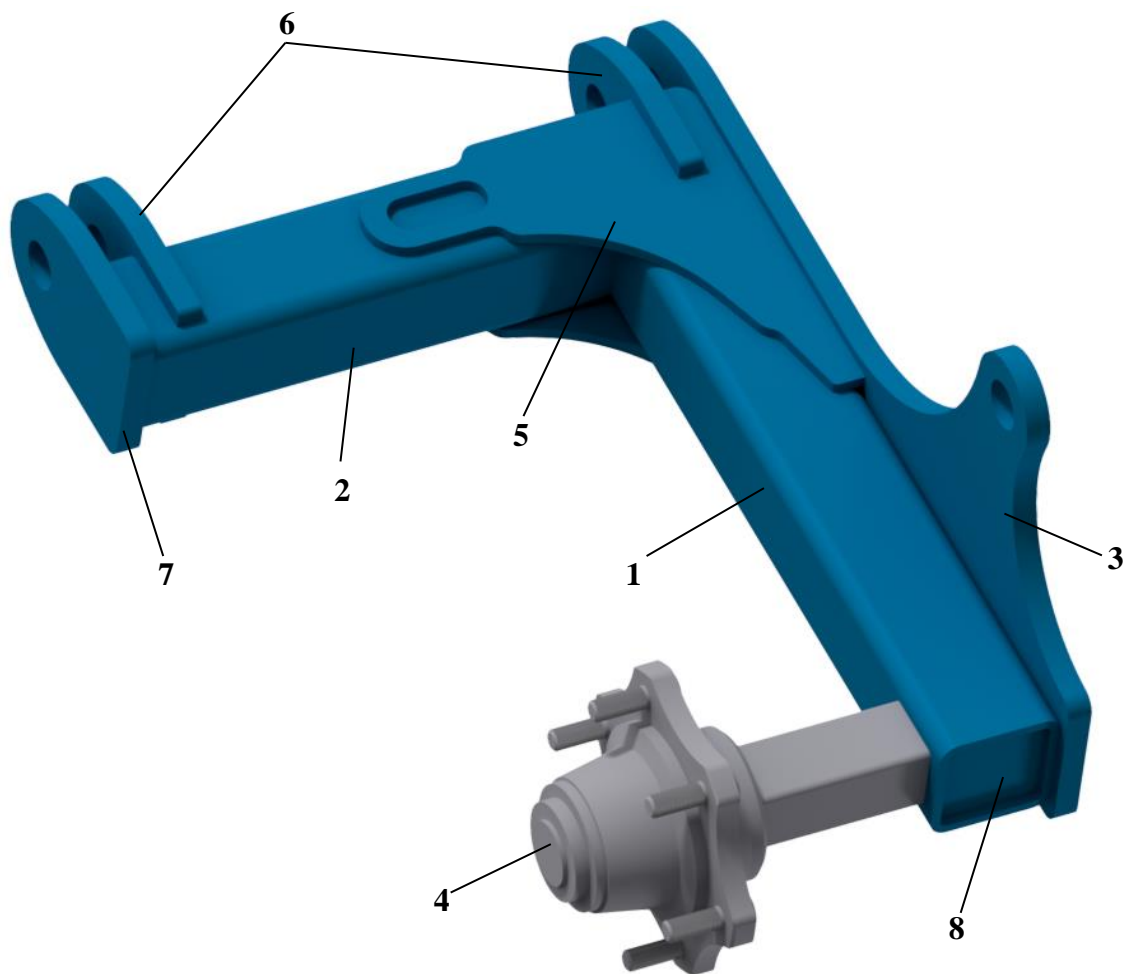
Při samotném konstrukční návrhu kopírovacího kola se vycházelo z předpokladu, že stroj nebude vyráběn ve větším počtu než 20 kusů za rok. S ohledem na tento předpoklad bylo při konstrukci využito co nejvíce nakupovaných dílů, protože konstrukce vlastních by celý stroj prodražila.

Po provedené rešerši bylo jako nejvhodnější řešení zvoleno letmo uložené kopírovací kolo proti směru jízdy, které využívá nakupované součástky a je levnější než kolo uložené oboustranně. Celá konstrukce je na *Obr. 21* a skládá se z několika dílů, jejímž základem je svařenec. Dále byla zvolena pneumatika od firmy BKT, která má vyšší nosnost, než je předpokládané zatížení. Ta je přichycena pomocí kolových matic od firmy ADR. O pohyb kopírovacího kola se stará přímočarý hydromotor od firmy Ponar doplněný o otočné podložky pro případ ztráty tlaku a nastavení pracovní polohy. Pro uchycení hydromotoru ke svařenci a přichycení svařence k rámu stroje byly zvoleny čepy o průměru 40 mm, které jsou zajištěny proti posunu z každé strany pomocí šroubu a matice. Na čepích jsou ještě umístěny plastové distanční podložky, aby nedocházelo k odírání barvy od šroubů.



Obr. 21 Konstrukce kopírovacího kola, 1 – přímočarý hydromotor, 2 – čep, 3 – svařenec, 4 – disk s pneumatikou, 5 – kolové šrouby

Na Obr. 22 jsou vidět hlavní nosné prvky svařence. Jedná se o dva čtvercové profily 100 x 100 s tloušťkou stěny 8 mm. V jednom z těchto čtvercových profilů se nachází vypálený otvor na 3D laseru pro polonápravu. Na bok čtvercového profilu je navařen nosný plech ve tvaru písmene L o tloušťce 20 mm z vysokopevnostní oceli. Ten zároveň slouží pro připevnění přímočarého hydromotoru. Pro zlepšení přenosu napětí z jednoho do druhého profilu jsou na svařenci z obou stran příložné plechy o tloušťce 10 mm z konstrukční oceli. Ty mají v horní části otvor pro svar. V horní části svařence se nachází dvě oka pro uchycení k rámu stroje. Na konci čtvercového profilu je další oko pro uchycení k rámu stroje, které zároveň plní funkci záslepky tohoto profilu a zabraňuje zatékání voda a následné korozi. Všechny oka mají stejnou tloušťku 20 mm. Poslední důležitá část svařence je nakupovaná polonáprava od firmy ADR s označením S60LA600001 s nosností 5 400 kg při rychlostech 25 km/h. I na tomto konci čtvercového profilu se nachází záslepka.



Obr. 22 Svařenec, 1 – čtvercový profil pro polonápravu, 2 – příčný čtvercový profil, 3 – boční nosný plech, 4 – polonáprava, 5 – příložný plech, 6 – oko pro čep, 7 – krajní oko pro čep, 8 – záslepka čtvercového profilu

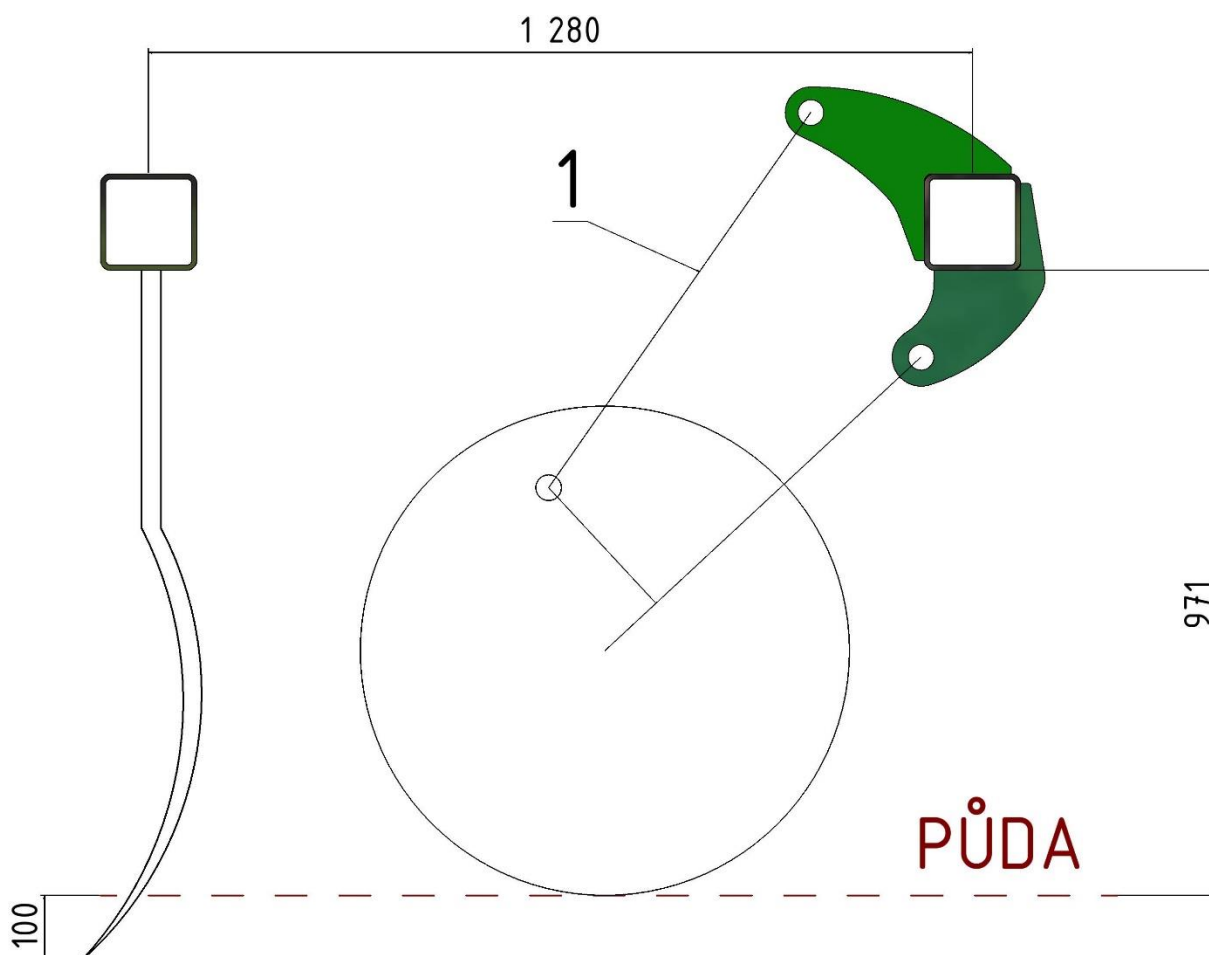
4.2 KINEMATICKÁ ROZVAHA KOPÍROVACÍHO KOLA

Tato kapitola se věnuje kinematické rozvaze navrženého kopírovacího kola, kdy je nutné ověřit, že konstrukce bude sedět v rámu stroje a také, že bude vyhovovat požadovaným pracovním hloubkám.

Hlavním požadavkem na stroj je, aby pracoval v hloubkách 10 až 40 cm. Při konstrukci kinematického schématu bylo nutné odměřit několik vzdáleností v aplikaci Autodesk Inventor 2022.

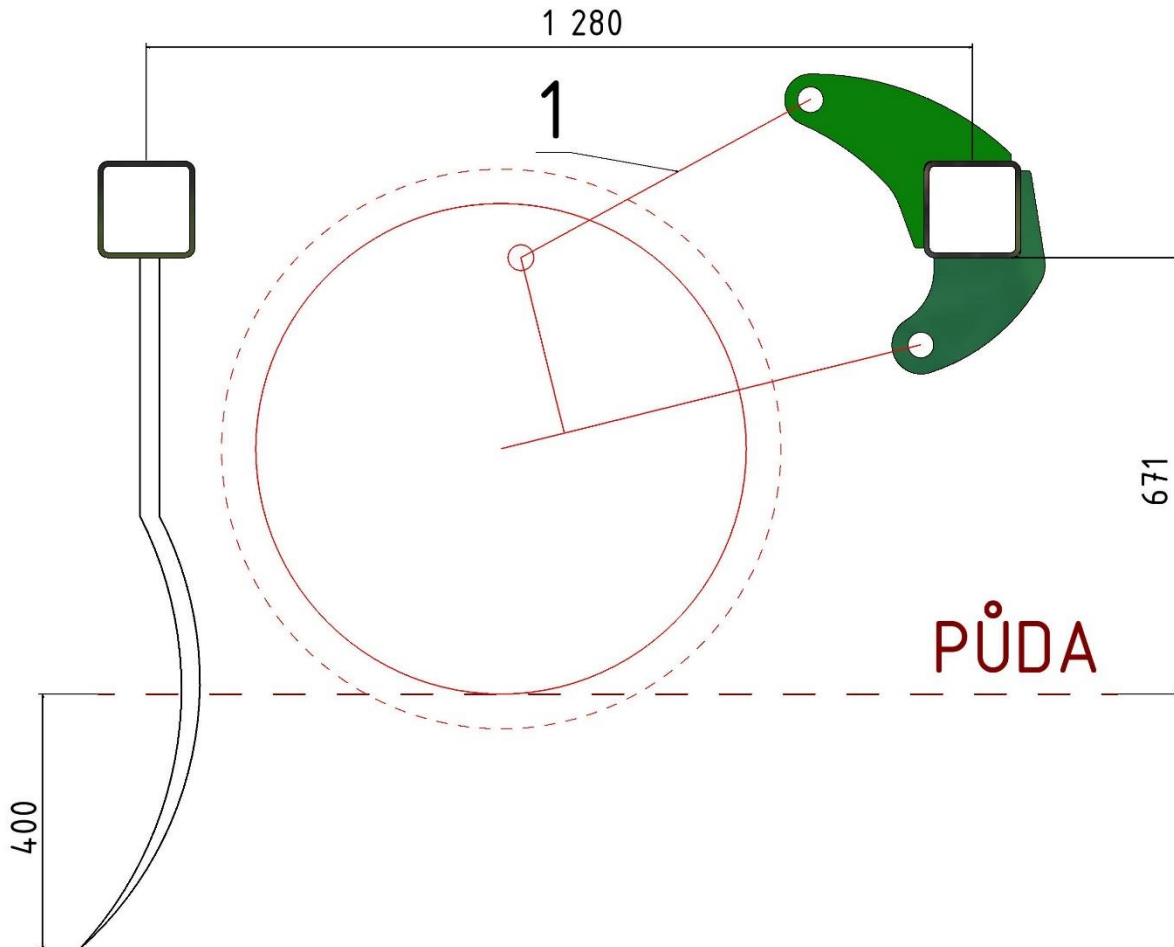
Zaprvé od dolního okraje čtvercového profilu po špici radličky. Tato vzdálenost vyšla 1 073 mm. Dále bylo nutné změřit rozteč čtvercových profilů, mezi kterými bude umístěna konstrukce kopírovacího kola. Tato vzdálenost činí 1 280 mm. Mezi další důležité části v kinematickém schématu se řadí průměr pneumatiky. Byla zvolena pneumatika s označením 11.5/80-15,3 14PR BKT AS504 TL. Ta má nosnost při volném valivém zatížení 3 740 kg. [11] V kinematickém schématu byl použit statický poloměr, který je 380 mm. [11] Jedná se o vzdálenost mezi středem kola a podložím, když je pneumatika maximálně zatížena a je nahuštěna na doporučený tlak. [12]

Na *Obr. 23* je kinematické schéma kopírovacího kola v první krajní poloze, kdy špiče radličky je 10 cm v zemi. V tomto stavu je přímočarý hydromotor (1) vysunut na maximální délku. V schématu je možné vidět, že v této pracovní poloze se konstrukce kopírovacího kola vejde do rámu stroje a vzdálenost mezi spodní hranou čtvercového profilu a půdou činí 971 mm.



Obr. 23 Kinematická rozvaha – poloha kopírovacího kola při pracovní hloubce 10 cm

Na *Obr. 24* je druhá krajní poloha kopírovacího kola. Při této poloze je špiče radličky 40 cm v zemi. Přímočarý hydromotor je zde zasunut. Ze schématu je vidět, že dolní okraj čtvercového profilu je vzdálen od země 671 mm. V této poloze bylo nutné zkontrolovat i jestli se konstrukce vejde do rámu stroje, jelikož je patrné, že celá konstrukce je v této poloze více umístěna v rámu stroje. Kvůli tomu bylo schéma doplněno o vnější průměr pneumatiky, který má hodnotu 867 mm. [11] Tato hodnota je reprezentována v schématu čárkovanou čarou. Při pohledu na schéma je vidět, že od pneumatiky je dostatečná vzdálenost na všech stranách. Nejmenší vzdálenost od pneumatiky k rámu stroje činí přes 50 mm, což je hodnota dostačující. A to i v případě, že se na pneumatiku nalepí hlína.



Obr. 24 Kinematická rozvaha – poloha kopírovacího kola při pracovní hloubce 40 cm

4.3 ROZBOR ZATÍŽENÍ

Pro pevnostní kontrolu svařence, přímočarého hydromotoru a otočných uložení kopírovacího kola s rámem stroje je nutné určit síly které na kolo, ale i na celý boční rám působí při práci. Tato kapitola se věnuje nejhoršímu možnému stavu, který by mohl nastat.

Nejdříve bylo nutné určit všechny hmotnosti, které na boční rám působí. Je to hmotnost samotného bočního rámu i s radličkami a disky. Ta byla zjištěna v aplikaci Autodesk Inventor 2022 a vychází na 1 938 kg. Dále byla také zjištěna hmotnost zadního rámu včetně válců. Tento celek je přichycen k bočnímu rámu a jeho hmotnost je 1 102 kg. K této hmotnosti byla připočtena vtažovací síla od radliček, která je na základě zkušeností a poznatků z provozu od firmy Farmet, a.s. 100 kg na jednu radličku. Na bočním rámu se nachází celkem pět radliček. Poslední důležitá hmotnost je od nečistot, jako je hlína či zbytky plodin, které se na celý boční rám a pracovní nástroje mohou nalepít. Tato hmotnost je také určena dle poznatků firmy a vychází 600 kg.

$$m_C = 5 \cdot m_{VT} + m_R + m_V + m_N, \quad (1)$$

$$m_C = 5 \cdot 100 + 1\,938 + 1\,102 + 600,$$

$$m_C = 4\,140 \text{ kg},$$

- kde: m_C [kg] celková hmotnost,
 m_{VT} [kg] vťahovací hmotnost ve svislém směru od radličky, $m_{VT} = 100$ kg,
 m_R [kg] hmotnost bočního rámu včetně pracovních nástrojů, $m_R = 1\,938$ kg,
 m_V [kg] hmotnost válců včetně jejich rámu, $m_V = 1\,102$ kg,
 m_N [kg] hmotnost nečistot na rámu, $m_N = 600$ kg.

Z této celkové hmotnosti byla vypočtena tíhová síla, která působí na boční rám pomocí rovnice (2).

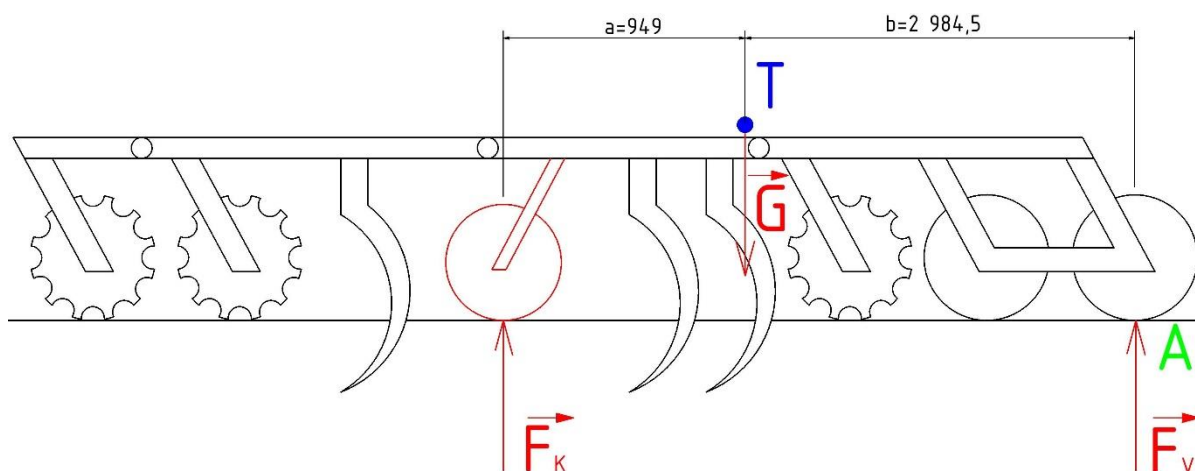
$$G = m_C \cdot g, \quad (2)$$

$$G = 4\,140 \cdot 9,81,$$

$$G = 40\,613,40 \text{ N},$$

kde: G [N] tíhová síla bočního rámu,

g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] tíhové zrychlení Země, $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Obr. 25 Sílové účinky na bočním rámu

Na Obr. 25 jsou vidět síly působící na rám stroje. Je to tíhová síla, která působí v těžišti rámu stroje. To bylo odměřeno v CADU. Tato síla je zachycena pomocí dvojice sil. První síla působí na kopírovací kola a druhá na válce. Síla je uvažována až na zadnější válec, jelikož by mohlo dojít k situaci, kdy je přední válec výš než první a hmotnost tedy případně ve větší míře na ten zadní. Pro nejhorší zátěžný stav se také uvažuje, že přední disky nenadlehčují stroj a chovají se jako by byli na vzduchovém polštáři. V reálném stavu se i přední disky chovají částečně jako kopírovací zařízení. Pro rám stroje byla sestavena momentová rovnováha k bodu A, ze které je následně určena síla působící na kopírovací kolo.

$$\Sigma M_A = F_K \cdot (a + b) - G \cdot b, \quad (3)$$

$$F_K = \frac{G \cdot b}{a + b},$$

$$F_K = \frac{40\,613,40 \cdot 2\,984,5}{949 + 2\,984,5},$$

$$F_K = 30\,814,97 \text{ N},$$

kde: F_K [N] síla působící na kopírovací kolo,

a [mm] vzdálenost od těžiště ke kopírovacímu kolu,

b [mm] vzdálenost od těžiště k bodu A.

Tato síla byla ještě navýšena o 10 %. Což je uvažováno jako vliv dynamických účinků, které na boční rám mohou působit. Jedná se například o účinek kolébání či přejezd nerovností na poli.

$$F_{KD} = 1,1 \cdot F_K, \tag{4}$$

$$F_{KD} = 1,1 \cdot 30\,814,97,$$

$$F_{KD} = 33\,896,47 \text{ N},$$

kde: F_{KD} [N] síla působící na kopírovací kolo zvětšená o dynamické účinky.

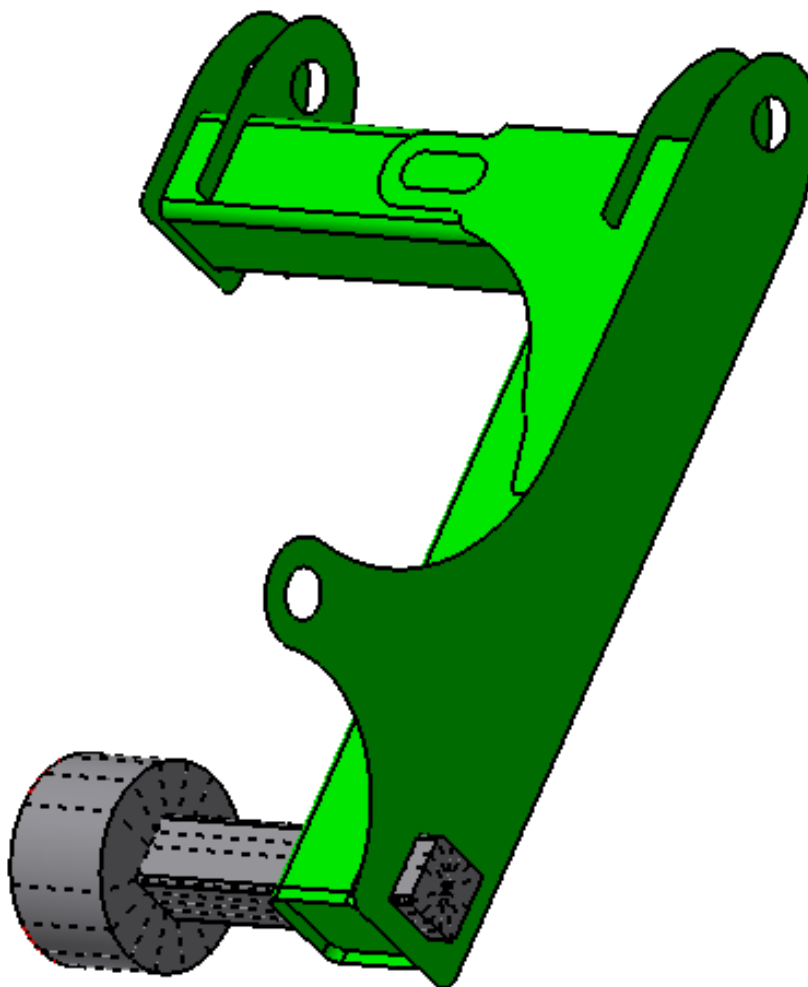
5 MODEL PRO MKP

Pro pevnostní výpočet svařence kopírovacího kola byla zvolena metoda konečných prvků (MKP). Tato metoda se využívá k řešení různých inženýrských a vědeckých problémů. Její největší využití je při navrhování nových zařízení, ale také při optimalizaci stávajících konstrukcí.

Před provedením pevnostní analýzy v programu MSC Apex 2021 bylo nezbytné provést několik důležitých kroků jako součást tzv. pre-processingu. Tento proces zahrnoval několik klíčových částí, včetně vytvoření konečno-prvkové sítě, nastavení materiálu a definování okrajových podmínek. Detailní popis těchto kroků je popsán v následujících kapitolách.

5.1 GEOMETRIE MODELU

Samotný model svařence kopírovacího kola byl vytvořen v aplikaci Autodesk Inventor 2022. Geometrie svařence byla nejprve upravena. Především byla upravena geometrie polonápravy, kdy došlo k jejímu nahrazení elementárními tělesy, které mají odpovídající tloušťky a rozměry. Dále byly z modelu odstraněny výrobní vůle. Po těchto úpravách byl celý model naimportován do prostředí aplikace MSC Apex.



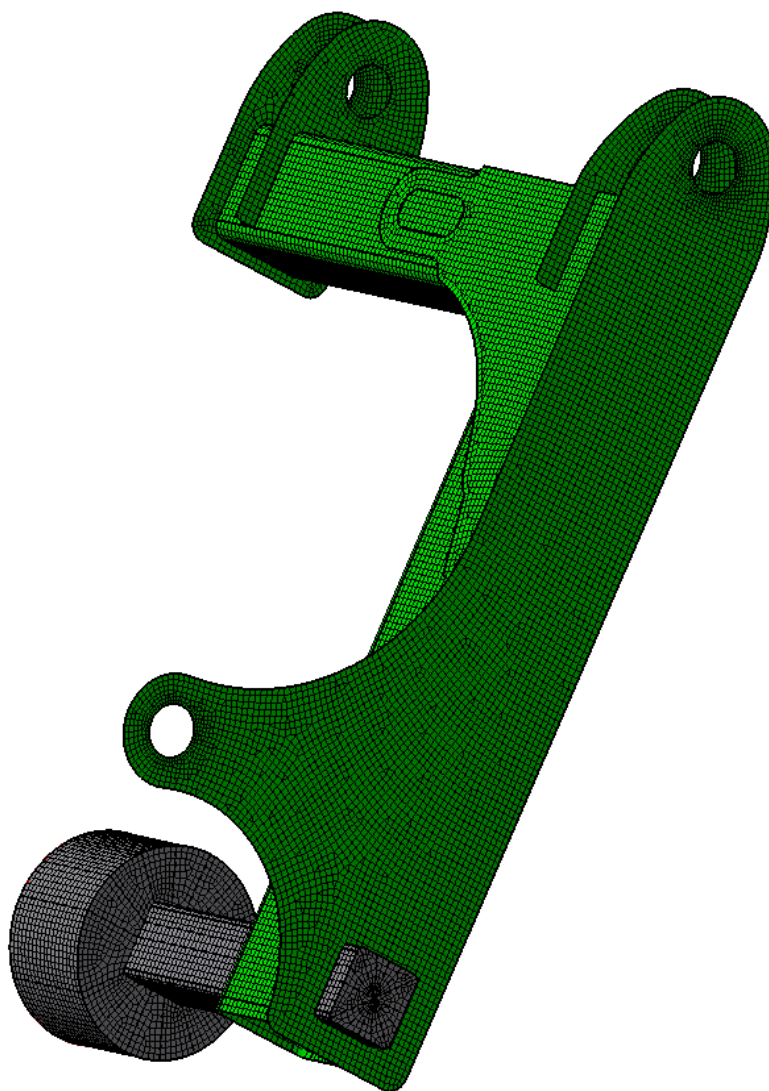
Obr. 26 Zjednodušený model svařence kopírovacího kola

Zde již byl model svařence (*Obr. 26*), kromě polonápravy převeden pomocí příkazu MidSurface na střednicové plochy. Tyto střednice reprezentují jednotlivé plechy, a mají přiřazené správné tloušťky. Plochy byly následně napojeny na sebe, aby byla zachována spojitost konstrukce. Dále byla náhrada polonápravy rozřezána pomocí booleovských operací, aby bylo možné vytvořit co nejlepší konečno-prvkovou síť.

Následně byl model doplněn o náhrady čepů, což zkrátí výpočtový čas modelu. Avšak je nutné následně provést pevnostní kontrolu těchto náhrad zvlášť.

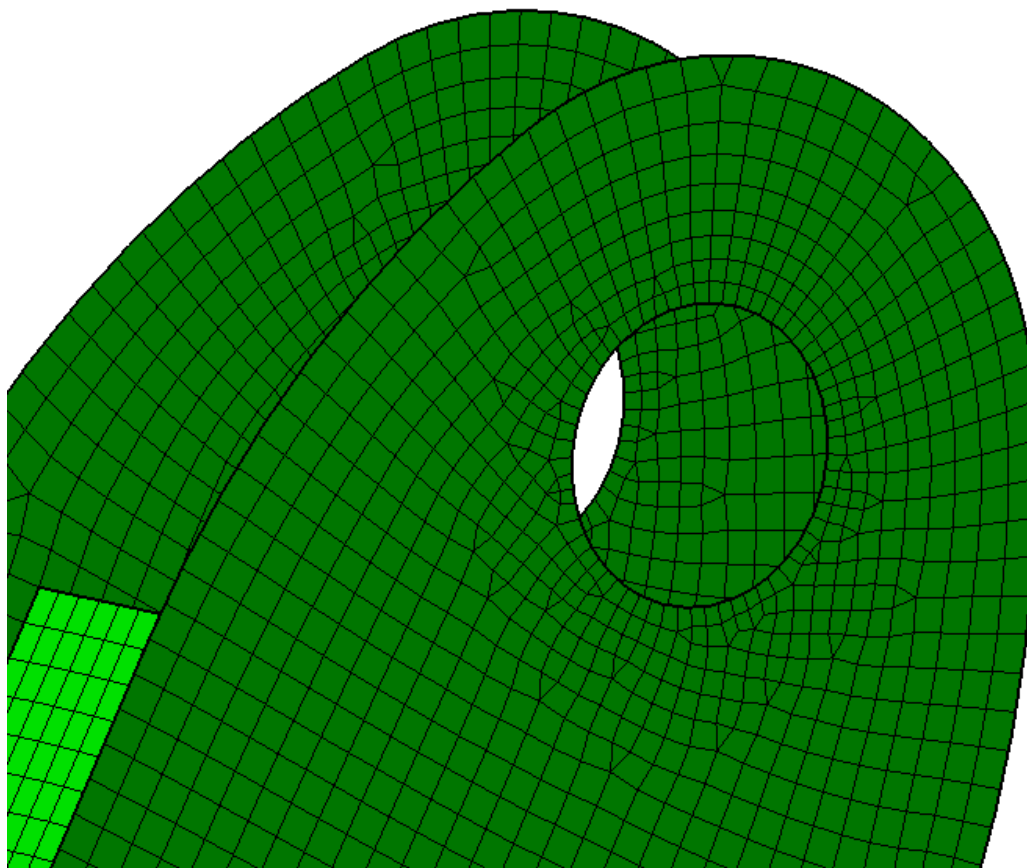
5.2 KONEČNO-PRVKOVÁ SÍŤ

Na připraveném modelu složeného ze střednicových ploch a z 3D modelu polonápravy byla vytvořena konečno-prvková síť viz. *Obr. 27*.



Obr. 27 Konečno-prvková síť

Na střednicových plochách byla vytvořena 2D síť pomocí příkazu Surface mesh, kde byl zvolen čtyřúhelníkový prvek o velikosti 5 mm. Vytvořená síť byla v okolí děr pro čepy zjemněna (*Obr. 28*) příkazem Seeding. To bylo provedeno za účelem optimalizace tvaru a zkvalitnění výsledků v okolí děr.



Obr. 28 Zjemněná konečno-prvková síť v okolí děr pro čepy

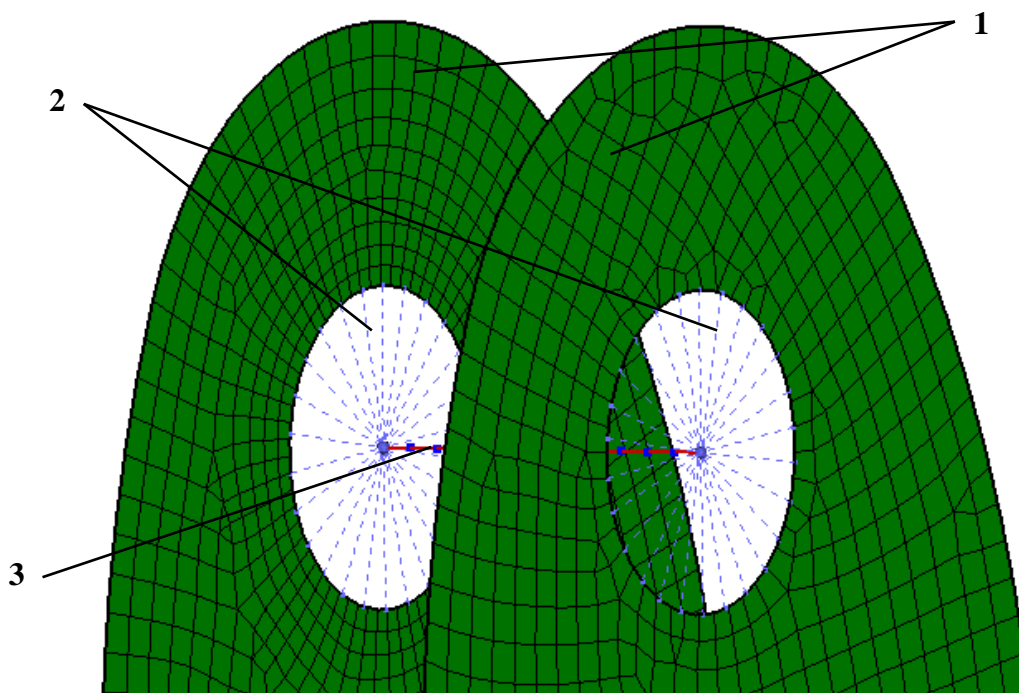
Při vytváření konečno-prvkové sítě na náhradě polonápravy byly voleny 3D prvky, aby bylo možno sledovat dobře výsledky v okolí přechodu napětí z polonápravy do zbytku konstrukce. Byly využity hexaedrické prvky s hranou 5 mm.

V místech kontaktů byly vytvořeny dva typy vazeb. U kolmých vazeb byl použit příkaz Mesch independent tie. V druhém případě, který se týká například bočního nosného plechu přiloženého ke čtvercovému profilu, byla využita vazby Interaction. Díky těmto vazbám došlo k provázání jednotlivých konečno-prvkových sítí.

Program MSC Apex sleduje kvalitu jednotlivých sítí a pokud se vyskytne nějaký prvek invalid, nedovolí pokračovat dále ve výpočtu. V tomto případě se žádný takový prvek nenacházel a celkově lze považovat vytvořenou síť za kvalitní. 2D síť obsahuje celkem 24 945 prvků a hodnota Aspect ratio se pohybuje v rozmezí od 1 do 3. U 3D sítě se Aspect ratio pohybuje také v hodnotách 1 až 3 a je zde vytvořeno celkem 31 499 prvků.

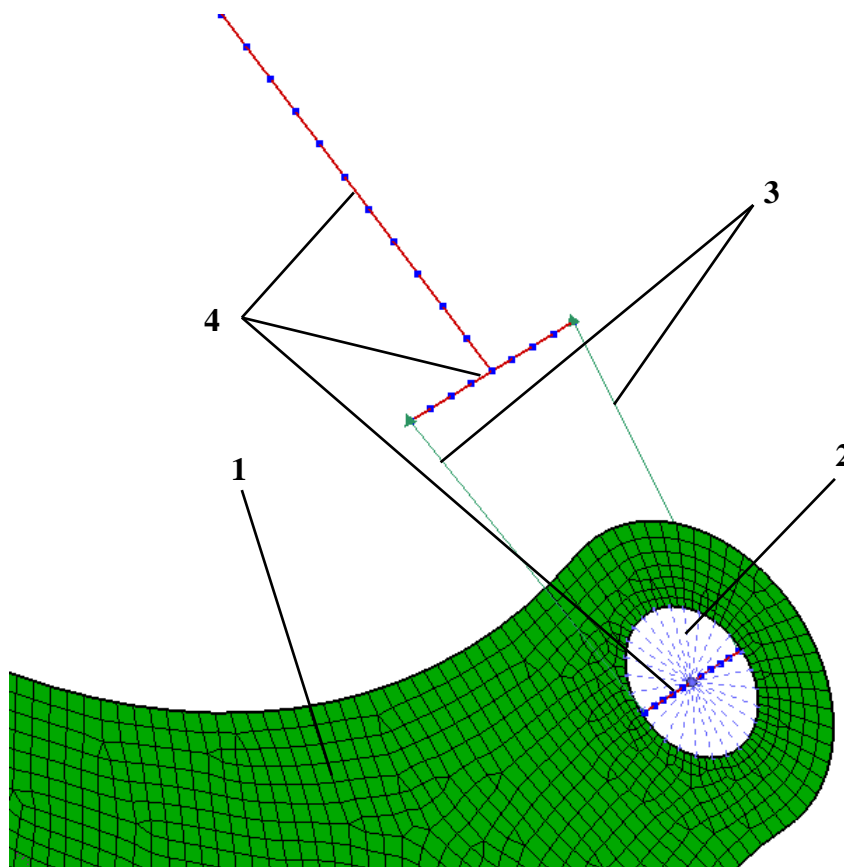
5.2.1 NÁHRADA ČEPŮ

V celé konstrukci jsou dva čepy, které slouží pro přichycení kopírovacího kola k samotnému rámu stroje. U těchto čepů (Obr. 29) byla vytvořena 1D síť, které byl přiřazen nosník. Nosník má stanovené průřezové charakteristiky, které odpovídají čepům. 1D síť je spojena v místech uložení se skořepinovou sítí pomocí příkazu Compliant, což je v podstatě RBE3 prvek. Tento příkaz zaručuje, že spojení svařence s čepem se bude chovat správně a bude odpovídat skutečnosti.



Obr. 29 Náhrada čepů, 1 – oko pro čep, 2 – vazba compliant, 3 – 1D síť

5.2.2 NÁHRADA PŘÍMOČARÉHO HYDROMOTORU A ČEPU



Obr. 30 Náhrada přímočarého hydromotoru a čepu, 1 – boční nosný plech, 2 – vazba compliant, 3 – vazba rigid, 4 – 1D síť

Také je nutné vytvořit náhradu přímočarého hydromotoru a čepu, který spojuje přímočarý hydromotor s kopírovacím kolem. Náhrada tohoto čepu, je trochu odlišná od předchozích dvou, jelikož přímočarý hydromotor má na konci tzv. vidličku.

Na Obr. 30 je vidět celá provedená náhrada. Za přímočarý hydromotor i jeho vidličku byla vytvořena 1D síť, která je vzájemně provázána. Této 1D síti byl přiřazen nosník o stanovených průřezových charakteristikách. Dále byla vytvořena 1D síť za čep, které byl opět přiřazen nosník o stanovených charakteristikách. Čep s přímočarým hydromotorem byl vzájemně spojen pomocí vazby Rigid. Skořepinová síť bočního nosného plechu byla opět spojena s čepem vazbou Compliant.

5.3 MATERIÁL MODELU

Celému modelu se musí přiřadit materiálové charakteristiky. Na celé konstrukci svařence se využila kombinace dvou druhů ocelí. Všechny čtvercové profily a méně namáhané plechy jsou z konstrukční oceli s mezí kluzu 355 MPa. Pro oka čepových uložení a nosné plechy bylo využito pevnostní oceli s mezí kluzu 800 MPa. Celá konstrukce bude svařena za pomoci svařovacího drátu, který má mez kluzu uvolněného napětí 370 MPa. Oba druhy ocelí mají stejné materiálové vlastnosti. [13]

MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

- Modul pružnosti v tahu $E = 210$ GPa
- Modul pružnosti ve smyku $G = 81$ GPa
- Poissonova konstanta $\mu = 0,3$

Pro určení minimálních hodnot dovolených napětí σ_{DK} , σ_{DP} , σ_{DS} u jednotlivých materiálů byl použit prostý vztah. Tyto hodnoty napětí jsou sníženy pomocí statického koeficientu bezpečnosti 1,5. [14] Tento koeficient vychází z legislativního požadavku č. 320/2017 Sb.

KONSTRUKČNÍ OCEL

$$\sigma_{DK} = \frac{R_{eK}}{k_S}, \quad (5)$$

$$\sigma_{DK} = \frac{355}{1,5},$$

$$\sigma_{DK} = 237 \text{ MPa},$$

kde: σ_{DK} [MPa] dovolené napětí konstrukční oceli,

R_{eK} [MPa] mez kluzu materiálu S355, $R_{eK} = 355$ MPa,

k_S [-] koeficient bezpečnosti. [14]

PEVNOSTNÍ OCEL

$$\sigma_{DP} = \frac{R_{eP}}{k_S}, \quad (6)$$

$$\sigma_{DP} = \frac{800}{1,5},$$

$$\sigma_{DP} = 533 \text{ MPa},$$

kde: σ_{DP} [MPa] dovolené napětí pevnostní oceli,

R_{eP} [MPa] mez kluzu pevnostní oceli, $R_{eP} = 800$ MPa.

SVAŘOVACÍ DRÁT

$$\sigma_{DS} = \frac{R_{eS}}{k_S}, \quad (7)$$

$$\sigma_{DS} = \frac{370}{1,5},$$

$$\sigma_{DS} = 247 \text{ MPa},$$

kde: σ_{DS} [MPa] dovolené napětí svařovacího drátu,

R_{eS} [MPa] mez kluzu uvolněného napětí svařovacího drátu, $R_{eS} = 370$ MPa [15].

5.4 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Mezi další důležité parametry, které je potřeba zadat patří okrajové podmínky. Ty lze rozdělit do dvou kategorií na geometrické a silové. Tyto podmínky lze dávat na předem definovanou geometrii modelu či přímo do uzlů konečno-prvkové sítě. Pro správný a přesný výpočet pomocí MKP je důležité zadat okrajové podmínky tak, aby co nejvíce odpovídaly skutečnosti. Pokud by byly zadány nesprávně, mohlo by to vést k nesprávným či chybným výsledkům analýzy.

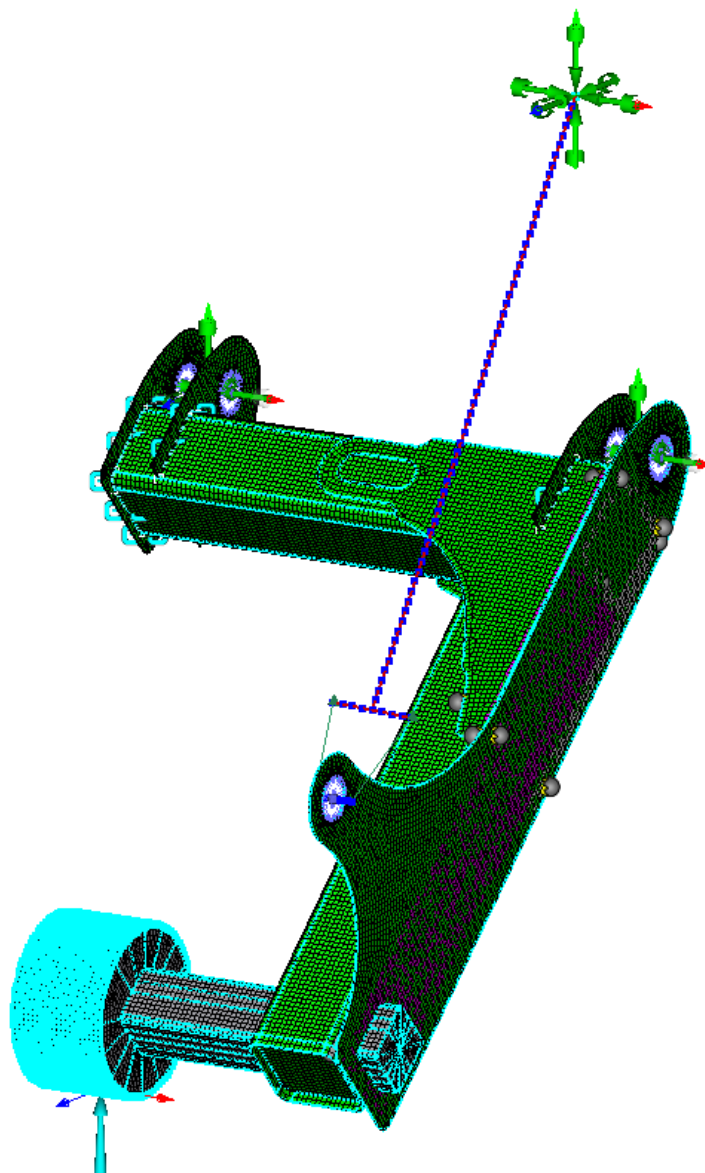
SILOVÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Na model byla aplikována síla vypočítaná v kapitole 4.3, která byla umístěna na model, a to přesněji na polonápravu.

GEOMETRICKÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Na model jsou přidány geometrické okrajové podmínky a to tak, aby bylo zaručeno odebrání všech stupňů volnosti. Tím se zamezí pohybu modelu v prostoru.

Na modelu kopírovacího kola došlo k rozdělení geometrických okrajových podmínek do dvou skupin viz. *Obr. 31*. V první skupině jsou okrajové podmínky, které byly aplikovány do míst, kde je celá konstrukce připevněna k rámu stroje pomocí čepů. Zde bylo zamezeno posuvu v ose X, Y a Z. Také zde bylo zamezeno rotaci kolem os Y a Z. Druhé skupině bylo zamezeno všem posuvům a rotacím.



Obr. 31 Svařenec kopírovací kola s okrajovými podmínkami

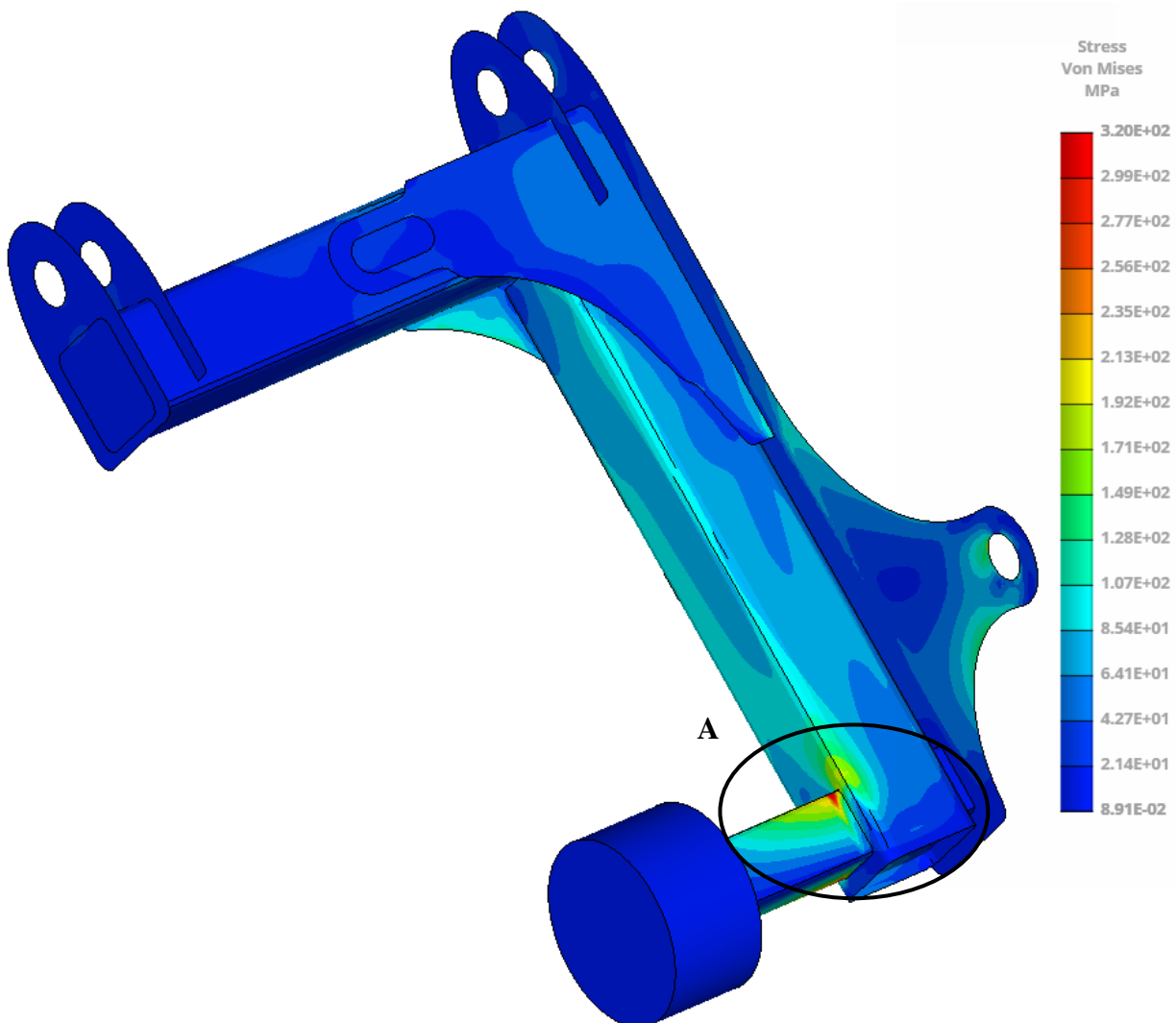
6 PEVNOSTNÍ ANALÝZA

Pevnostní analýza byla provedena v programu MSC Apex, což je program, který lze využít k řešení konečno-prvkové analýzy. Jedná se o statickou analýzu, ve které se nemění zatížení s časem. Napětí je posuzováno k mezím kluzu materiálů použitých na konstrukci, které jsou sníženy o statickou bezpečnost.

6.1 VÝSLEDKY PEVNOSTNÍ ANALÝZY PŮVODNÍHO SVAŘENCE KOPÍROVACÍHO KOLA

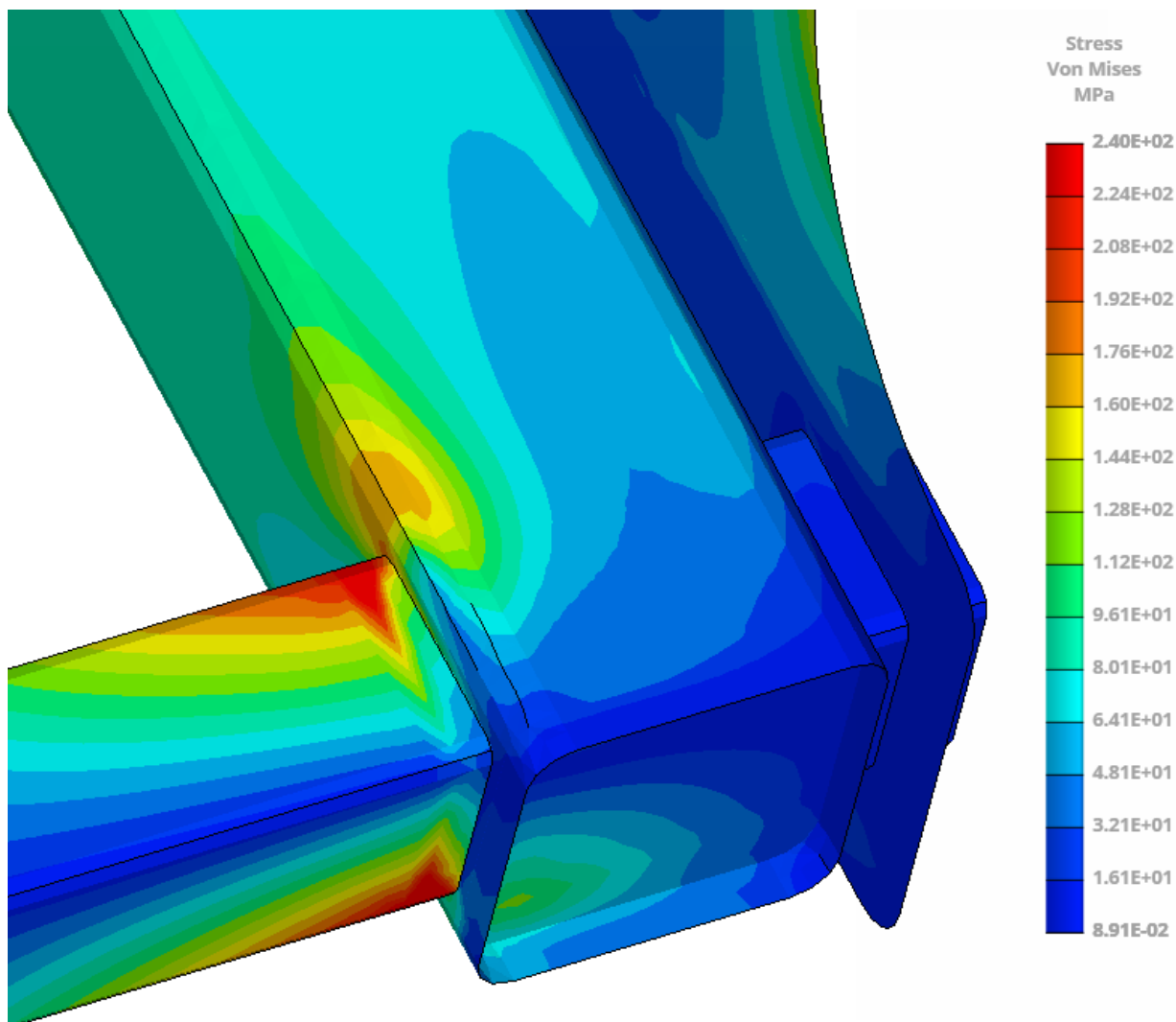
Po všech přípravách modelu a nastavení všech okrajových podmínek, byla provedena simulace. U simulace je vyhodnoceno maximální redukované napětí dle podmínky HMH pro zátěžný stav vypočítaný v kapitole 4.3.

Z Obr. 32 je patrné, že napětí na svařenci kopírovacího kola, výrazně překračuje maximální napětí pro běžnou konstrukční ocel, ale i materiál svaru. Největší koncentrace napětí se vytváří v místě A.



Obr. 32 Koncentrace napětí na původním modelu svařence kopírovacího kola dle podmínky HMH, měřítko deformace 1:1, legenda napětí 0-320 MPa

Obr. 33 zobrazuje místo A. To je místo, kde je náprava přivařena ke zbytku konstrukce svařence kopírovacího kola. Je patrné, že napětí dosahuje vyšších než dovolených hodnot.

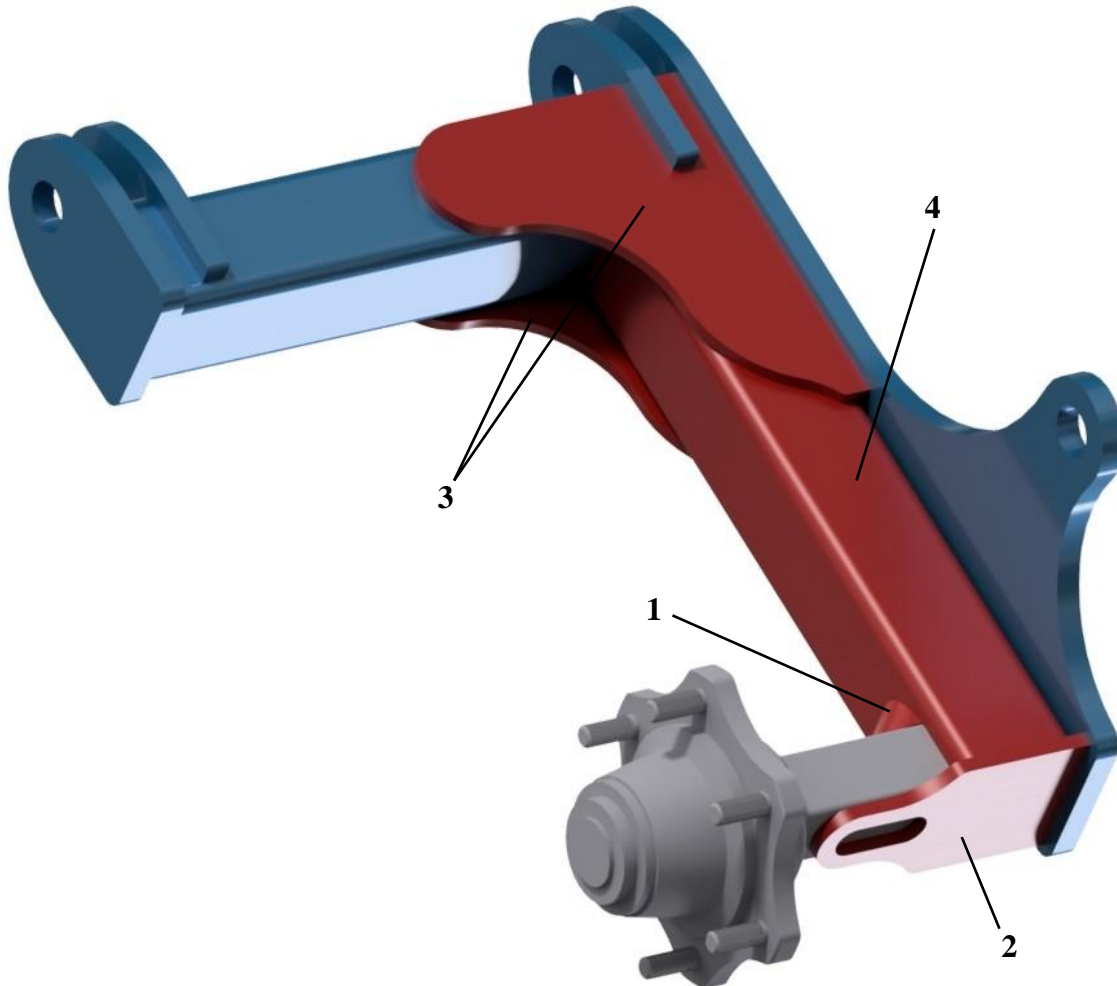


Obr. 33 Detail koncentrace napětí v místě A na svařenci kopírovacího kola dle podmínky HMH, měřítko deformace 1:1, legenda napětí 0-240 MPa

Špičky napětí se vyskytují na polonápravě a na čtvercovém profilu, který je z běžné konstrukční oceli. Tyto špičky dosahují mnohem vyšších hodnot, než vydrží konstrukční materiál i svar. Ve zbytku konstrukce nedosahuje napětí vyšších hodnot, než 237 MPa. To je hodnota maximální pro konstrukční ocel. Přesto musí být konstrukce svařence upravena, a to zejména v místě A. Zde je třeba zajistit lepší přenos napětí z polonápravy do zbytku svařence a špičky napětí roznést dál od místa svaru.

6.2 ÚPRAVY SVAŘENCE KOPÍROVACÍHO KOLA

Při úpravě konstrukce svařence byl kladen největší důraz na úpravu míst, kde docházelo k větší koncentraci napětí zjištěných v první simulaci.

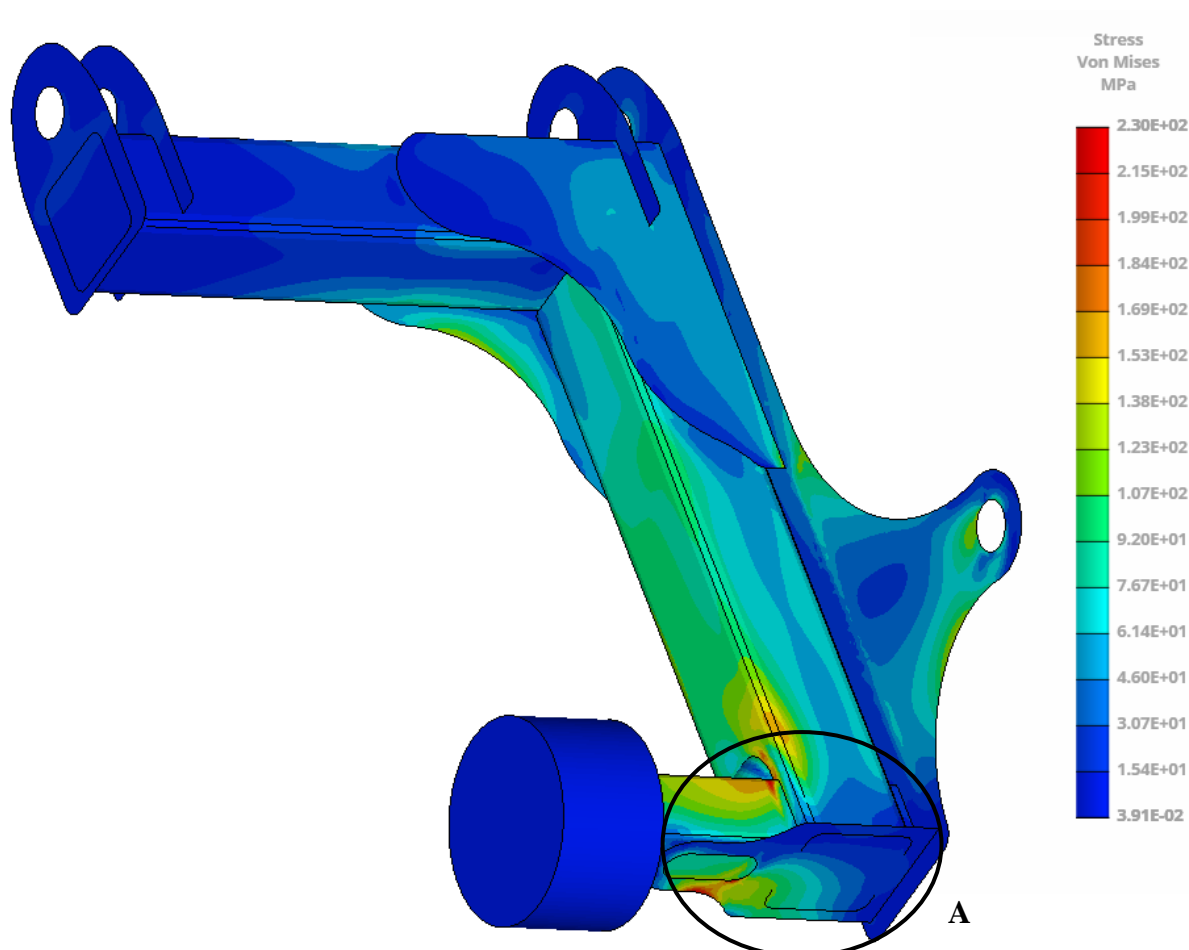


Obr. 34 Upravená konstrukce svařence kopírovacího kola, 1 – přidání žebra, 2 – přidání spodní pásnice, 3 – úprava tvaru příložných plechů, 4 – úprava délky čtvercového profilu

Pro lepší přenos napětí z polonápravy do zbytku konstrukce svařence kopírovacího kola je na spodek polonápravy přivařena pásnice o tloušťce 8 mm z běžné konstrukční oceli. V pásnici je vypálen otvor pro svar. Na opačné straně polonápravy bylo přidáno žebro. Žebro je vyrobeno z trubky, která je uříznuta pod úhlem 90°. Tato trubka je z běžné konstrukční oceli. Tvar žebra je zvolen s ohledem na to, aby nedošlo k případnému kontaktu pneumatiky o svařenec. Dále došlo k úpravě tvaru příložných plechů, jelikož zde nedocházelo ke zvýšené koncentraci napětí. Z plechů byly odstraněny otvory pro svar a byla upravena jejich celá geometrie. Jako poslední byla upravena délka čtvercového profilu pro polonápravu. To bylo nezbytné k přiložení spodní pásnice po celé délce k polonápravě. Provedená úprava zlepšuje i celkové usazení všech dílů svařence. Všechny tyto kroky pomohly k drobnému odlehčení svařence.

6.3 VÝSLEDKY PEVNOSTNÍ ANALÝZY UPRAVENÉHO SVAŘENCE KOPÍROVACÍHO KOLA

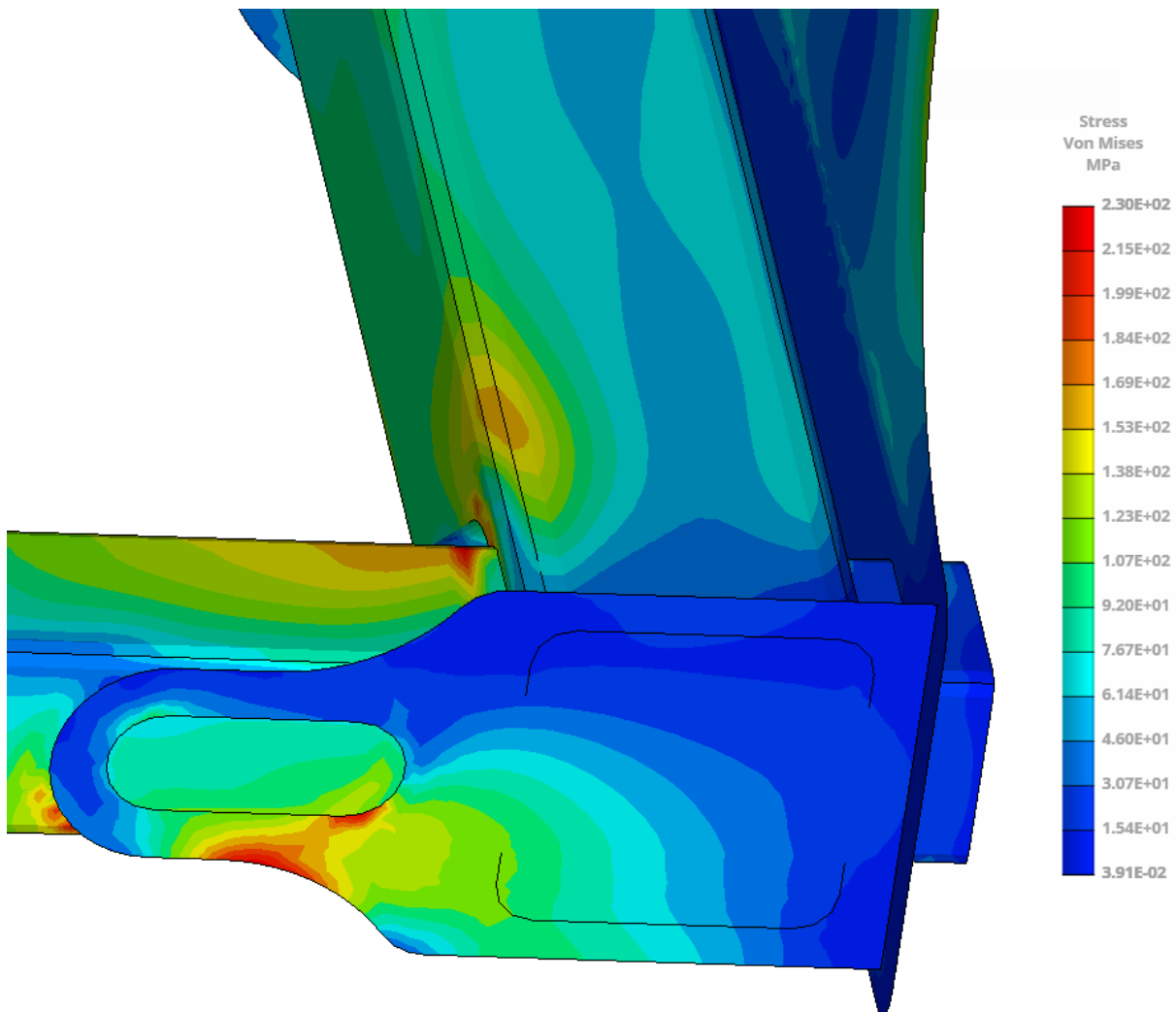
Po úpravě konstrukce svařence a opětovném provedení všech příprav modelu a nastavení všech okrajových podmínek byla provedena znovu statická simulace. U nového modelu došlo k navýšení počtu 2D prvků, avšak jejich kvalita zůstala nadále vyhovující pro správně fungující výpočet a dobré výsledky.



Obr. 35 Koncentrace napětí na upraveném modelu svařence kopírovacího kola dle podmínky HMM, měřítko deformace 1:1, legenda napětí 0-230 MPa

Napětí v celé konstrukci svařence kopírovacího kola se snížilo (*Obr. 35*). Nejvyšší hodnota se opět vyskytuje v místě A, což je místo spojení polonápravy se zbytkem svařence. Zde je hodnota napětí maximálně 230 MPa. Pro lepší vyhodnocení je zobrazeno toto místo na *Obr. 36*.

Při bližším pohledu na *Obr. 36* je patrné, že napětí v místech svaru nepřesahuje dovolenou hodnotu, která je 247 MPa. Napětí ve čtvercovém profilu pro polonápravu mírně stouplo, jelikož došlo k jeho lepšímu přenosu z polonápravy, ale stále nepřesahuje maximální stanovenou hodnotu. Koncentrace vyššího napětí se nachází na spodní pásnici v místě rádiusu. Toto napětí je ale nižší než stanovené, a není nutná další optimalizace tvaru pásnice.



Obr. 36 Detail koncentrace napětí v místě A na upraveném modelu svařence kopírovacího kola dle podmínky HMH, měřítko deformace 1:1, legenda napětí 0-230 MPa

Po vyhodnocení poslední provedené simulace je možné konstatovat, že všechny komponenty vyhovují stanovenému zátěžnému stavu.

7 PEVNOSTNÍ KONTROLA NÁHRAD

Po provedeném výpočtu pomocí metody konečných prvků je nutné provést ještě pevnostní kontrolu náhrad. Tato kontrola proběhne, jelikož napětí v náhradách neodpovídá skutečnosti. Pevnostní výpočty byly provedeny u náhrad čepů a přímočarého hydromotoru. Síly v náhradách byly zjištěny z konečno-prvkové simulace.

7.1 KONTROLA ČEPŮ

V celé konstrukci kopírovacího kola se nachází několik čepů. Čepy jsou použity pro uchycení kopírovacího kola k rámu stroje a také jsou použity k uchycení přímočarého hydromotoru ke konstrukci svařence. Pro kontrolu čepů bylo vypočteno ohybové, smykové a redukované napětí. Také proběhla kontrola čepů na otláčení ve stykových plochách. Jelikož byly všude použity čepy o stejném průměru a materiálu, je proveden vzorový výpočet pro jeden čep. U všech ostatních čepů proběhl také výpočet a jejich výsledky jsou v *Tabulka 1*.

Čepy mají průměr 40 mm a jsou z materiálu 16MnCrS5, který je vhodný ke kalení. Materiál dosahuje meze kluzu 490 MPa do průměrů 40 mm. [16]

VÝPOČET OHYBOVÉHO NAPĚTÍ

Výpočet ohybového napětí byl proveden pomocí jednoduchého vzorce, kde se podělí maximální ohybový moment na čepu, který je v půlce délky čepu, modulem průřezu v ohybu.

$$\sigma_{o\check{c}} = \frac{M_{o\check{c}}}{W_{o\check{c}}} = \frac{F_{\check{c}}}{2} \cdot a_B \cdot \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_B^3}{32}}, \quad (8)$$

$$\sigma_{o\check{c}} = \frac{\frac{38\,899}{2} \cdot 24}{\frac{\pi \cdot 40^3}{32}},$$

$$\sigma_{o\check{c}} = 74,29 \text{ MPa},$$

kde: $\sigma_{o\check{c}}$ [MPa] ohybové napětí v čepu,

$M_{o\check{c}}$ [Nmm] ohybový moment na čepu,

$F_{\check{c}}$ [N] síla působící na čep, $F_{\check{c}} = 38\,899 \text{ N}$,

a_B [mm] vzdálenost od podpory k půlce délky čepu, $a_B = 24 \text{ mm}$,

d_B [mm] průměr čepu, $d_B = 40 \text{ mm}$,

$W_{o\check{c}}$ [mm³] průřezový modul v ohybu čepu.

KONTROLA BEZPEČNOSTI NA OHYB

Při kontrole bezpečnosti byla porovnávána mez kluzu daného materiálu s napětím v ohybu, které bylo vypočteno pomocí rovnice (9).

$$k_{o\check{c}} = \frac{R_{e\check{c}}}{\sigma_{o\check{c}}}, \quad (9)$$

$$k_{o\check{c}} = \frac{490}{74,29},$$

$$k_{o\check{c}} = 6,60,$$

kde: $R_{e\check{c}}$ [MPa] minimální mez kluzu oceli 16MnCrS5, $R_{e\check{c}} = 490$ MPa,

$k_{o\check{c}}$ [-] koeficient bezpečnosti ohybu u čepu.

VÝPOČET SMYKOVÉHO NAPĚTÍ

Výpočet smykového napětí je proveden pomocí rovnice (10), která reprezentuje základní výpočet, kde se podělí síla působící kolmo na průřez s velikostí průřezu kolmého k ose, na který působí síla.

$$\tau_{\check{c}} = \frac{F_{\check{c}}}{\frac{\pi \cdot d_B^2}{4}}, \quad (10)$$

$$\tau_{\check{c}} = \frac{38\,899}{\frac{\pi \cdot 40^2}{4}},$$

$$\tau_{\check{c}} = 30,92 \text{ MPa},$$

kde: $\tau_{\check{c}}$ [MPa] smykové napětí v čepu.

KONTROLA BEZPEČNOSTI NA STŘIH

Při výpočtu bezpečnosti na střih se podělí dovolené napětí na střih smykovým napětím vypočteným v rovnici (10). Jelikož pro daný materiál není přesně určena dovolená hodnota na střih a musela by se provést zkouška, tak hodnota dovoleného napětí byla určena analogicky jako u jiných materiálů. Tato hodnota není brána jako striktní, ale pouze jako porovnávací. [17]

$$k_{s\check{c}} = \frac{\tau_{D\check{c}}}{\tau_{\check{c}}}, \quad (11)$$

$$k_{s\check{c}} = \frac{245}{30,92},$$

$$k_{s\check{c}} = 7,91,$$

kde: $\tau_{D\check{c}}$ [MPa] dovolené napětí na střih, $\tau_{D\check{c}} = 245$ MPa,

$k_{s\check{c}}$ [-] koeficient bezpečnosti na střih u čepu.

VÝPOČET REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ DLE HMMH

Redukované napětí bylo vypočteno pomocí rovnice (12), což je výpočet redukovaného napětí dle hypotézy HMMH.

$$\sigma_{red\check{c}} = \sqrt{\sigma_{o\check{c}}^2 + 3 \cdot \tau_{\check{c}}^2}, \quad (12)$$

$$\sigma_{red\check{c}} = \sqrt{74,29^2 + 3 \cdot 30,92^2},$$

$$\sigma_{red\check{c}} = 91,62 \text{ MPa},$$

kde: $\sigma_{red\check{c}}$ [MPa] redukované napětí dle podmínky HMMH.

KONTROLA BEZPEČNOSTI NA REDUKOVANÉ NAPĚTÍ

Kontrola bezpečnosti byla provedena dle základního vzorce. Mez kluzu pro zvolený materiál byl podělen redukovaným napětím.

$$k_{red\check{c}} = \frac{R_{e\check{c}}}{\sigma_{red\check{c}}}, \quad (13)$$

$$k_{red\check{c}} = \frac{490}{91,62},$$

$$k_{red\check{c}} = 5,35,$$

kde: $k_{red\check{c}}$ [-] koeficient bezpečnosti na redukované napětí u čepu.

VÝPOČET TLAKU VE STYKOVÝCH PLOCHÁCH

Tlak ve stykové ploše byl vypočten z jednoduchého vzorce. Síla, která působí na stykovou plochu, byla podělena velikostí stykové plochy.

$$p_{\check{c}} = \frac{F_{\check{c}}}{a_c \cdot d_B}, \quad (14)$$

$$p_{\check{c}} = \frac{38\,899}{20 \cdot 40},$$

$$p_{\check{c}} = 48,62 \text{ MPa},$$

kde: $p_{\check{c}}$ [MPa] stykový tlak v úchytu,

a_c [mm] styková plocha v úchytu.

KONTROLA ČEPY NA OTLAČENÍ

Kontrola bezpečnosti je provedena dle rovnice (15). V rovnici se vyskytuje již vypočítaný tlak ve stykových plochách a dovolený tlak. Tento tlak byl určen obdobně jako dovolené napětí ve stříhu, a to také analogicky jako u jiných materiálů. [17] Hodnota dovoleného tlaku slouží pouze jako porovnávací, protože přesná hodnota není známá a musela by být určena zkouškou.

$$k_{otč} = \frac{p_{čD}}{p_{č}}, \quad (15)$$

$$k_{otč} = \frac{160}{48,62},$$

$$k_{otč} = 3,29,$$

kde: $k_{otč}$ [-] koeficient bezpečnosti na otláčení u čepu,

$p_{čD}$ [MPa] dovolené napětí na otláčení, $p_{čD} = 160$ MPa.

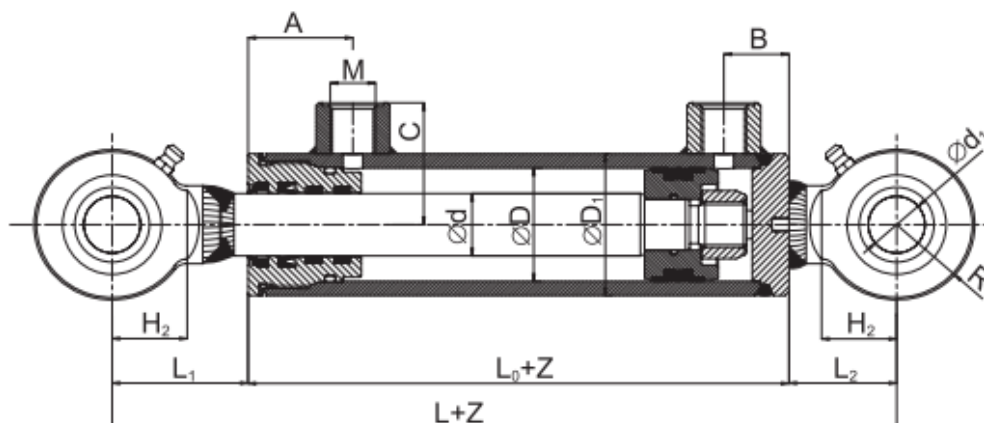
Tabulka 1 Kontrola čepů

Označení čepu	Čep A	Čep B	Čep C	Jednotky
$F_{č}$ [N]	47 902	38 899	24 403	N
$\sigma_{oč}$	91,49	74,29	46,61	MPa
$k_{oč}$	5,36	6,60	10,51	-
$\tau_{č}$	38,12	30,95	19,42	MPa
$k_{sč}$	6,43	7,91	12,62	-
$\sigma_{redč}$	112,82	91,62	57,48	MPa
$k_{redč}$	4,34	5,35	8,53	-
$p_{č}$	59,88	48,62	30,50	MPa
$k_{otč}$	2,67	3,29	5,25	-

Po provedených výpočtech a pohledem do tabulku je možno konstatovat, že všechny čepy jsou dostatečně dimenzovány pro odolání ohybového, smykového a redukovaného napětí. Dále je patrné, že nedojde ani k nepříznivému otláčení stykových ploch.

7.2 KONTROLA PŘÍMOČARÉHO HYDROMOTORU

O pohyb kopírovacího kola se stará přímočarý hydromotor od značky Ponar s označením UCJ2-MZ-20-X5-80/45-200. Pro tento hydromotor byla provedena kontrola vzpěrné stability pístní tyče, která zahrnuje několik důležitých výpočtů. Základní rozměry přímočarého hydromotoru jsou zaznamenány v *Tabulka 2*.



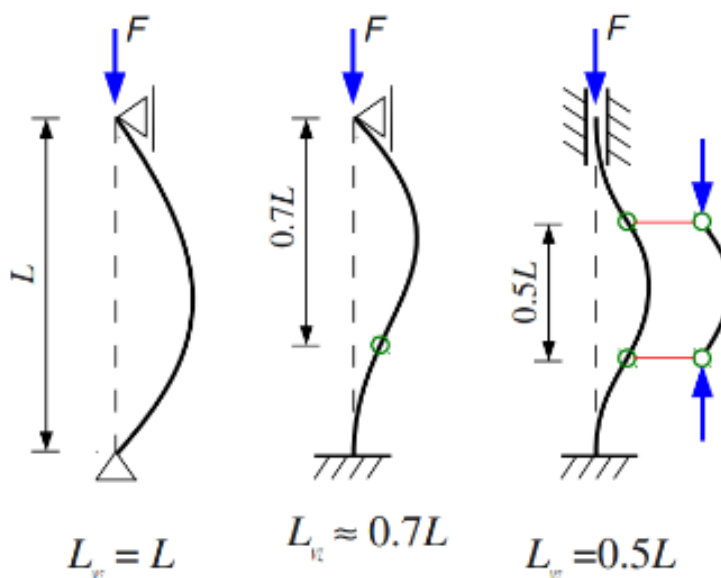
Obr. 37 Přímočarý hydromotor [19]

Tabulka 2 Rozměry přímočarého hydromotoru

Název veličiny	Velikost	Jednotky
Průměr pístní tyče d_p	45	mm
Průměr pístu D_p	80	mm
Vzdálenost mezi oky v zasunutém stavu L	511	mm
Zdvih Z	200	mm
Nominální tlak p_n	20	MPa

REDUKOVANÁ DÉLKA

Redukovaná délka vychází z Obr. 38, kdy z konstrukce vyplývá, že se jedná a první typ uložení přímočarého hydromotoru.



Obr. 38 Typy uložení – vzpěr [20]

$$L_{redp} = L, \quad (16)$$

$$L_{redp} = 711 \text{ mm},$$

kde: L_{redp} [mm] redukovaná délka.

KRITICKÁ ŠTÍHLOST

Kritická štíhlost je určena dle základního vztahu. [13] Pro daný výpočet bylo nutné zjistit materiálové charakteristiky materiálu pístní tyče. Pístní tyč je vyrobená z materiálu 20MnV6, který se nejčastěji používá na pístní tyče hydraulických válců pracujících v běžných podmínkách. Materiál má smluvní mez kluzu 390 MPa a mez pevnosti se pohybuje v rozmezí 600-700 MPa. [21]

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{E_p}{R_{p0,2}}}, \quad (17)$$

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{390}},$$

$$\lambda_m = 72,90,$$

kde: λ_m [-] mezní štíhlost pro pístní tyč,

E_p [MPa] modul pružnosti v tahu pro pístní tyč, $E_p = 2,1 \cdot 10^5$ MPa,

$R_{p0,2}$ [MPa] smluvní mez kluzu pro pístní tyč, $R_{p0,2} = 390$ MPa.

POLOMĚR SETRVAČNOSTI PÍSTNÍ TYČE

Poloměr setrvačnosti pístní tyče je určen dle rovnice (18), ve které se vyskytuje plocha pístní tyče a minimální moment setrvačnosti.

$$i = \sqrt{\frac{J_{pmin}}{S_p}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot d_p^4}{64}}{\frac{\pi \cdot d_p^2}{4}}}, \quad (18)$$

$$i = \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot 45^4}{64}}{\frac{\pi \cdot 45^2}{4}}},$$

$$i = 11,25 \text{ mm},$$

kde: i [mm] poloměr setrvačnosti pístní tyče,

J_{pmin} [mm⁴] minimální kvadratický moment plochy pístní tyče,

S_p [mm²] plocha průřezu pístní tyče,

d_p [mm] průměr pístní tyče, $d_p = 45$ mm.

ŠTÍHLOST PÍSTNÍ TYČE

Štíhlost pístní tyče je určena dle rovnice (19), jako podíl redukované délky a poloměru setrvačnosti.

$$\lambda_p = \frac{L_{redp}}{i}, \quad (19)$$

$$\lambda_p = \frac{711}{11,25},$$

$$\lambda_p = 63,20,$$

$$\lambda_p < \lambda_{mp},$$

kde: λ_p [-] štíhlost pístní tyče.

Jelikož je štíhlost pístní tyče menší než kritická štíhlost, jedná o nepružný vzpěr a výpočet bude proveden dle Tetmajer–Jasinského rovnice.

VÝPOČET KRITICKÉ SÍLY

Pro stanovení kritické síly je nejprve nutné určit kritické napětí. To se vypočítá pro daný materiál pomocí Tetmajer–Jasinského rovnice. [13]

$$\sigma_{kr} = 589 - 3,82 \cdot \lambda_p, \quad (20)$$

kde: σ_{kr} [MPa] kritické napětí v pístní tyči.

Z kritického napětí je možné určit prostým vztahem kritickou sílu a to tak, že se kritické napětí vynásobí plochou pístní tyče.

$$F_{kr} = \sigma_{kr} \cdot S_p = (589 - 3,82 \cdot \lambda_p) \cdot \frac{\pi \cdot d_p^2}{4}, \quad (21)$$

$$F_{kr} = (589 - 3,82 \cdot 63,20) \cdot \frac{\pi \cdot 45^2}{4},$$

$$F_{kr} = 552\,795,74 \text{ N},$$

kde: F_{kr} [N] kritická síla v pístní tyči.

BEZPEČNOST PÍSTNÍ TYČE

Kontrola bezpečnosti pístní tyče je provedena dle rovnice (22), jako podíl kritické síly a síly v přímočarém hydromotoru. Ta byla zjištěna v modelu konečno-prvkové simulace.

$$k_p = \frac{F_{kr}}{F_p}, \quad (22)$$

$$k_p = \frac{552\,795,74}{47\,902},$$

$$k_p = 11,54,$$

kde: k_p [-] koeficient bezpečnosti pro pístní tyč,

F_p [N] síla působí na pístní tyč, $F_p = 47\,902 \text{ N}$.

Z výpočtu je patrné, že pístní tyč vyhovuje z hlediska vzpěrné stability.

8 ANALÝZA PROVOZNÍ A VÝROBNÍ PORUCHOVOSTI

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) je analýza rizik využívaná v předvýrobních etapách stroje, vyvinuta odborníky ze společnosti NASA. [24] Tato analýza umožňuje odhalit nejkritičtější a nejpravděpodobnější místa poruch ve výrobku nebo jeho výrobě. Mezi hlavní cíle analýzy FMEA patří optimalizace návrhu stroje, což vede ke snížení počtu změn ve fázi realizace. Pomáhá také snižovat náklady spojené s nekvalitní výrobou a zkracuje dobu řešení vývojových prací. [22]

Analýza obsahuje několik důležitých kroků: [22], [23]

- 1) stanovení předmětu analýzy
- 2) shromáždění potřebných informací a podkladů o stroji
- 3) analýza vzniku poruch stroje
- 4) stanovení významu poruch
- 5) stanovení bezpečnostních opatření
- 6) zhodnocení zbytkového rizika
- 7) shrnutí výsledků

Pro potřeby této diplomové práce bude vyhotovena analýza rizik pro výrobu a následný provoz kopírovacího kola. Analýza bude provedena s cílem odhalit možné případné poruchy, ať už při výrobě nebo provozu, a minimalizovat tyto poruchy prostřednictvím vhodných opatření.

V rámci analýzy FMEA se využívá takzvaného čísla RPN (Risk Priority Number) k hodnocení rizik. Toto číslo je stanoveno z několika kategorií: významu poruchy, odhalitelnosti poruchy a klasifikace výskytu poruchy. Každá z těchto kategorií je dále rozdělena do stupňů podle významu poruchy, obtížnosti její odhalitelnosti a četnosti výskytu. Pokud hodnota RPN překročí stanovenou mez, jsou zavedena opatření pro její snížení. Po provedení těchto opatření je hodnota RPN znovu vyhodnocena a zkoumá se, zda došlo k jejímu snížení. [23], [24]

VÝZNAM PORUCHY

V_1 – Nízký význam (nedojde k poškození funkce stroje)

V_2 – Střední význam (zhoršení funkce stroje/lehká škoda)

V_3 – Velký význam (vážné zhoršení funkce stroje/velká škoda)

V_4 – Kritický význam (fatální zhoršení funkce stroje/fatální škoda)

ODHALITELNOST PORUCHY

O_1 – Snadno odhalitelná porucha

O_2 – Porucha je odhalitelná za určitých podmínek

O_3 – Obtížně/velmi obtížně odhalitelná porucha

KLASIFIKACE VÝSKYTU PORUCHY

K_1 – Malý výskyt poruchy (nikdy/zřídka)

K_2 – Střední výskyt poruchy (přichází v úvahu)

K_3 – Vysoký/Velmi vysoký výskyt poruchy(často/jistě)

Tabulka 3 přiřazuje kategoriím se svými stanovenými stupni hodnotu RPN. RPN se pohybuje od 0 do 10, kde nižší hodnota značí minimální nebezpečí a vyšší hodnota značí maximální nebezpečí a potenciální riziko smrti. Tato hodnota RPN bude odečtena z *Tabulka 3* a zapsána v *Tabulka 4*.

Tabulka 3 Tabulka pro získání rizikového čísla podle stanovených kategorií

		Klasifikace výskytu poruchy		
Význam poruchy	Odhalitelnost poruchy	K_1	K_2	K_3
V_1	O_1	0	0	0
	O_2	0	0	0
	O_3	0	0	1
V_2	O_1	0	1	2
	O_2	1	2	3
	O_3	2	3	4
V_3	O_1	3	4	5
	O_2	4	5	6
	O_3	5	6	7
V_4	O_1	6	7	8
	O_2	7	8	9
	O_3	8	9	10

Tabulka 4 zobrazuje vyhotovenou analýzu FMEA pro kopírovací kolo. Analýza se zaměřila na výrobu a následný provoz kola. *Tabulka 4* zobrazuje pouze část celé analýzy. V tabulce jsou vidět především potenciální chyby s jejich možnými následky, ale jsou zde i příčiny těchto chyb. Dále tabulka obsahuje sloupce, kde se hodnotí nebezpečí daných situací dle kategorií a jejich stupňů. Výsledné rizikové číslo odpovídá předchozí tabulce. Jako kritické rizikové číslo bylo zvoleno číslo 5. Pro všechny vyšší hodnoty jsou zavedena potřebná opatření, aby se dosáhlo lepší kvality výroby a snížení zmetkovosti. Dojde k vyšší bezpečnosti při provozu stroje.

RPN dosahuje nejvyšších hodnot v situacích způsobených lidskou chybou. Často se jedná o chyby způsobené nepozorností nebo nedostatečným proškolením obsluhy. Toto je řešeno zavedením vyšších kontrol a také snahou snížit lidský faktor při výrobních operacích, například tím, že při pálení dílu bude program brát aktuální data přímo z modelu. Další opatření, která pomohou, jsou například vyšší míra proškolení zaměstnanců, ale i obsluhy stroje, a vypracování podrobného návodu.

Celá analýza rizik i se zavedenými opatřeními je přiložena v příloze I.

Tabulka 4 Část tabulky FMEA analýzy

Proces	Potenciální chyba	Možný následek chyby	Význam	Příčina chyby	Výskyt	Odhalení chyby	Odhalitelnost	RPM
Výroba kopírovacího kola	Chybně vypálená díra pro čep	Díra nebude odpovídat předepsanému rozměru a toleranci	V ₄	Chyba obsluhy laseru	K ₃	Montážní dělník při montáži	O ₁	8
	Chybné nastehování	Chybné rozměry svařence a nesouosost	V ₄	Chyba svařeče	K ₂	Montážní dělník při montáži	O ₁	7
	Chybně provedený svar	Poškození svařence v provozu	V ₃	Chyba svařeče	K ₂	Náhodná kontrola	O ₃	6
	Chybné dotažení hydraulických komponent	Únik hydraulického oleje	V ₃	Chyba montéra	K ₃	Výstupní kontrola	O ₁	5
	Poškození nakupovaných komponent	Nefunkčnost/omezená funkčnost stroje	V ₄	Skryté poškození nakupovaných komponent	K ₂	Výstupní kontrola	O ₁	7
Provoz kopírovacího kola	Ztráta tlaku v přímočarém hydromotoru	Ztráta funkce	V ₄	Netěsnost hydraulického okruhu	K ₂	Obsluha stroje	O ₂	8
	Nedodržení utahovacích momentů na disku	Uvolnění disku s pneumatikou	V ₃	Nesprávný utahovací moment	K ₂	Náhodná kontrola	O ₃	6
	Defekt pneumatiky	Zničení pneumatiky a ztráta funkčnosti kopírovacího kola	V ₄	Špatný tlak, najetí na ostrý předmět	K ₂	Obsluha stroje	O ₂	8
	Chybně nastavená pracovní poloha	Nadměrná zatěžování rámu stroje	V ₄	Obsluha stroje	K ₁	Náhodná kontrola	O ₂	7

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření kopírovacího kola pro kombinovaný zemědělský stroj. Úvod se zaměřuje na uvedení do problematiky zpracování půdy, následuje rešeršní část zabývající se kombinovanými kypřiči. Jsou zde popsány tyto stroje a představeni jejich zástupci od nejznámějších výrobců na trhu se zemědělskými stroji.

V další kapitole jsou představeny a rozebrány koncepční varianty kopírovacích kol, které byly vyhledány ve valné většině na internetu. Tyto varianty jsou následně zhodnoceny, zejména z hlediska nákladů na výrobu.

Následuje kapitola věnovaná samotnému stroji Farmet Triton Heavy 600, pro který je navrhováno kopírovací kolo. Zde je popsán vlastní konstrukční návrh kopírovacího kola, který zahrnuje i volbu pneumatiky od firmy BKT. Je detailně popsán i samotný svařenec kopírovacího kola a je vytvořena kinematická rozvaha. Bylo ověřeno, že navržené kolo je možno umístit bez problému do rámu stroje. Dále došlo k ověření, že kolo vyhovuje pracovním hloubkám od 10 cm do 40 cm. Poslední část této kapitoly se zaměřuje na rozbor zatížení na celý boční rám stroje. Z tohoto zatížení je dopočtena síla, kterou musí celá konstrukce kola vydržet.

Mezi hlavní části práce patří kontrola svařence kopírovacího kola pomocí metody konečných prvků. Pro potřeby simulace byl vytvořen zjednodušený model v programu Autodesk Inventor, který byl naimportován do programu MSC Apex. Zde již byl převeden na skořepinový model a doplněn o náhrady čepů. Na model byly aplikovány okrajové podmínky. Z výsledků simulace vyplynulo, že nejvyšší napětí se vyskytuje v místě spojení polonápravy se zbytkem svařence. Napětí zde dosahovalo hodnoty přes 300 MPa a konstrukci bylo nutné upravit. Došlo k přidání pásnice na spodek polonápravy z konstrukční oceli. Na druhou stranu bylo přidáno žebro. Byla upravena i geometrie příložených plechů. Poslední úprava spočívala ve zkrácení délky čtvercového profilu, což zlepšilo výrobu svařence. Po těchto změnách byla provedena nová pevnostní analýza se stejnými okrajovými podmínkami. Z výsledků této analýzy vyplynulo, že svařenec již pevnostně vyhovuje. Napětí nepřesahuje hodnotu 230 MPa.

V předposlední části je provedena pevnostní kontrola čepů, které slouží pro uchycení svařence k rámu stroje a pro uchycení přímočarého hydromotoru. U čepů bylo vypočteno ohybové, smykové a redukované napětí. Dále byl vypočten tlak ve stykových plochách. Všechny tyto hodnoty byly porovnány s maximálními hodnotami pro zvolený materiál. Po provedených výpočtech je možné konstatovat, že čepy vyhovují. Došlo také ke kontrole pístní tyče přímočarého hydromotoru na vzpěrnou stabilitu. Z tohoto výpočtu je patrné, že i přímočarý hydromotor vyhovuje.

Poslední část práce se zaměřuje na vytvoření analýzy rizik pro výrobu a provoz kopírovacího kola metodou FMEA. Analýza pomohla odhalit případná rizika, která by mohla nastat při výrobě či provozu. Pro tyto rizika byla navržena opatření, která pomohou ke snížení zmetkovosti při výrobě a také pomohou ke zvýšení bezpečnosti při používání kopírovacího kola.

Na závěr práce byla vypracována výkresová dokumentace. Ta obsahuje výkres sestavy kopírovacího kola, výkres svařence a výrobní výkresy jednotlivých dílů svařence.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KUMHÁLA, František. Zemědělská technika: stroje a technologie pro rostlinnou výrobu. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1701-7.
- [2] HŮLA, Josef a Blanka PROCHÁZKOVÁ. Minimalizace zpracování půdy. Praha: Profi Press, 2008. ISBN 978-808-6726-281.
- [3] HALENKA, Milan. Technologie zpracování půdy a jejich vliv na zaplevelení kukuřice seté. Brno, 2015. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav biologie rostlin. Vedoucí práce Ing. Jan Winkler, Ph.D.
- [4] Situační a výhledová zpráva. [Praha]: Ministerstvo zemědělství České republiky, [2021]. ISBN 978-80-7434-598-2.
- [5] Secí stroje Rapid. Väderstad [online]. c2022 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.vaderstad.com/cz/seti/seci-stroje-rapid/>
- [6] Rozdíly mezi nesenými a polonesenými stroji [online]. PROFIPRESS, c2023 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://mechanizaceweb.cz/rozdily-mezi-nesenymi-a-polonesenymi-stroji/>
- [7] TopDown 300-700 [online]. Väderstad, c2022 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.vaderstad.com/cz/zpracovani-pudy/kombinovane-kyprice/topdown/>
- [8] KARAT 12 [online]. LEMKEN GmbH & Co., c2023 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://lemken.com/de-de/landmaschinen/bodenbearbeitung/stoppelbearbeitung/grubber/karat-12>
- [9] Tiger MT [online]. HORSCH, c2023 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.horsch.com/cs/produkty/zpracovani-pudy/kultivator/tiger-mt>
- [10] Triton [online]. Farmet, c2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.farmet.cz/sk/kombinovany-kypric-triton>
- [11] AS 504 [online]. BKT GROWING TOGETHER, c2022 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.bkt-tires.com/ww/us/as-504>
- [12] Jednotky měření [online]. PNEU PLUS s.r.o. - pneumatiky on-line, c2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.pneuplus.cz/technicky-pruvodce/jednotky-mereni.html>
- [13] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [14] Nařízení vláda č. 320/2017 Sb.: Nařízení vlády o technických požadavcích na strojní zařízení. In: Sbírka zákonů č. 320/2017. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, p. o., 2017, ročník 2017, částka 110, číslo 320.
- [15] OK Autdrod 12.51 [online]. ESAB, c2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-autrod-12-51/

- [16] Přehled vlastností oceli 16MnCr5 [online]. Bohdan Bolzano, c2020 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-cementovani-podle-en-10084/prehled-vlastnosti-oceli-16mncr5>
- [17] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. BUDYNAS a Miloš VLK. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [18] ROZINEK, Jiří. Konstrukční návrh odpružení podvozku dlátového pluhu. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Ústav konstruování a části strojů. Vedoucí práce Roman Uhlíř.
- [19] Výrobní katalog přímočarých hydromotorů 2019. Hydraulics [online]. 2019 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.hydraulics.cz/wcd/pdf/vyrobní_katalog_cz2019.pdf
- [20] Přednáška 05. ČVUT, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://mech.fsv.cvut.cz/~smilauer/teaching/PP_prednaska_05_vzper.pdf
- [21] Chromované tyče – Standardní [online]. Hydraulics, c2017 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.hydraulics.cz/24931-chromovane-tyce-standardni>
- [22] FMEA Analýza příčin a důsledků [online]. Svět produktivity, c2012 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.svetproduktivity.cz/slovník/FMEA-Analyza-pricin-a-dusledku.htm>
- [23] FMEA [online]. Ing. Jiří Chaloupka, c2008-2010 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <http://www.chaloupka-kvalita.cz/fmea>
- [24] FMEA – Vyhodnocení rizik [online]. Lean Six Sigma, c2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://lean6sigma.cz/fmea/>
- [25] Stroje pro podmínku i hlubší kypření [online]. PROFIPRESS, c2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://mechanizaceweb.cz/s-velkymi-taliri-a-velkym-pritlakem/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

2D		Dvojměrný
3D		Trojměrný
FMEA		Failure Mode and Effects Analysis
HMH		Huber, von Mises, Hencky
MKP		Metoda konečných prvků
RPN		Risk Priority Number
a	[mm]	Vzdálenost od těžiště ke kopírovacímu kolu
a_B	[mm]	Vzdálenost od podpory k působení síly
b	[mm]	Vzdálenost od těžiště k bodu A
d_p	[mm]	Průměr pístitní tyče
D_p	[mm]	Průměr pístitu
E	[GPa]	Modul pružnosti v tahu
$F_{\check{c}}$	[N]	Síla působící na čep
G	[N]	Tíhová síla bočního rámu
g	[m·s ⁻²]	Tíhové zrychlení země
G	[GPa]	Modul pružnosti ve smyku
i	[mm]	Poloměr setrvačnosti pístitní tyče
k_S	[-]	Koeficient bezpečnosti
L	[mm]	Vzdálenost mezi oky v zasunutém stavu
L_{REDp}	[mm]	Redukovaná délka
p_n	[MPa]	Nominální tlak
R_{eK}	[MPa]	Mez kluzu materiálu S355
R_{eP}	[MPa]	Mez kluzu pevnostní oceli
R_{eS}	[MPa]	Mez kluzu uvolněného napětí svařovacího drátu
Z	[mm]	Zdvih
E_p	[MPa]	Modul pružnosti v tahu pro pístitní tyč
F_K	[N]	Síla působící na kopírovací kolo
F_{KD}	[N]	Síla působící na kopírovací kolo zvětšena o dynamické účinky
F_{kr}	[N]	Kritická síla v pístitní tyči
F_p	[N]	Síla působí na pístitní tyč
J_{pmin}	[mm ⁴]	Minimální kvadratický moment plochy pístitní tyče

$M_{o\check{c}}$	[Nmm]	Ohybový moment na čepu
$R_{e\check{c}}$	[MPa]	Minimální mez kluzu oceli 16MnCrS5
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu pro pístní tyč
S_p	[mm ²]	Plocha průřezu pístní tyče
$W_{o\check{c}}$	[mm ³]	Průřezový modul v ohybu čepu
a_C	[mm]	Styková plocha v úchytu
d_B	[mm]	Průměr čepu
k_p	[-]	Koeficient bezpečnosti pro pístní tyč
$k_{o\check{c}}$	[-]	Koeficient bezpečnosti ohybu u čepu
$k_{ot\check{c}}$	[-]	Koeficient bezpečnosti na otláčení u čepu
$k_{red\check{c}}$	[-]	Koeficient bezpečnosti na redukované napětí u čepu
$k_{s\check{c}}$	[-]	Koeficient bezpečnosti na stříh u čepu
m_C	[kg]	Celková hmotnost
m_N	[kg]	Hmotnost nečistot na rámu
m_R	[kg]	Hmotnost bočního rámu včetně pracovních nástrojů
m_V	[kg]	Hmotnost válců včetně jejich rámu
m_{VT}	[kg]	Vtahovací hmotnost ve svislém směru od radličky
$p_{\check{c}}$	[MPa]	Stykový tlak v úchytu
$p_{\check{c}D}$	[MPa]	Dovolené napětí na otláčení
λ_p	[-]	Štíhlost pístní tyče
λ_m	[-]	Mezní štíhlost pro pístní tyč
μ	[-]	Poissonova konstanta
σ_{kr}	[MPa]	Kritické napětí v pístní tyči
σ_{DK}	[MPa]	Dovolené napětí konstrukční oceli
σ_{DP}	[MPa]	Dovolené napětí pevnostní oceli
σ_{DS}	[MPa]	Dovolené napětí svařovacího drátu
$\sigma_{o\check{c}}$	[MPa]	Ohybové napětí v čepu
$\sigma_{red\check{c}}$	[MPa]	Redukované napětí dle podmínky HMM
$\tau_{\check{c}}$	[MPa]	Smykové napětí v čepu
$\tau_{D\check{c}}$	[MPa]	Dovolené napětí na stříh

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I Vyhotovená analýza FMEA pro výrobu a provoz kopírovacího kola

SEZNAM SAMOSTATNÝCH PŘÍLOH

DP-2023-001	KOLO K. PRAVÉ
DP-2023-002	SVAŘENEC PRAVÝ
DP-2023-002-01	PROFIL I
DP-2023-002-02	PROFIL II
DP-2023-002-03	VÝZTUHA TRUBKOVÁ
DP-2023-002-04	OKO KRAJNÍ
DP-2023-002-05	NOSNÝ PLECH
DP-2023-002-06	PŘÍLOŽNÝ PLECH
DP-2023-002-07	OKO STŘED I
DP-2023-002-08	OKO STŘED II
DP-2023-002-09	PÁSNICE

Proces	Potenciální chyba	Možný následek chyby	Význam	Příčina chyby	Výskyt	Odhalení chyby	Odhalitelnost	RPM	Zavedená opatření	Význam	Výskyt	Odhalitelnost	RPM
Výroba kopírovacího kola	Chybně vypálená díra pro čep	Díra nebude odpovídat předepsanému rozměru a toleranci	V ₄	Chyba obsluhy laseru	K ₃	Montážní dělník při montáži	O ₁	8	Program si bere NC kód přímo z modelu	V ₂	K ₁	O ₁	0
	Chybné nastehování	Chybné rozměry svařence a nesouosost	V ₄	Chyba svařeče	K ₂	Montážní dělník při montáži	O ₁	7	Použití přípravku na stehování	V ₃	K ₁	O ₁	3
	Chybně provedený svar	Poškození svařence v provozu	V ₃	Chyba svařeče	K ₂	Náhodná kontrola	O ₃	6	Stanovení technologického postupu svařování	V ₃	K ₁	O ₁	3
	Chybné dotažení hydraulických komponent	Únik hydraulického oleje	V ₃	Chyba montéra	K ₃	Výstupní kontrola	O ₁	5	Zdůraznění utažení v postupu montáže, průběžná kontrola	V ₃	K ₂	O ₁	4
	Poškození nakupovaných komponent	Nefunkčnost/omezená funkčnost stroje	V ₄	Skryté poškození nakupovaných komponent	K ₂	Výstupní kontrola	O ₁	7	Kontrola komponent při příjmu	V ₁	K ₁	O ₁	0
	Chybně nanesená barva na rám svařence	Loupání barvy a následná koroze	V ₃	Chybné otryskání	K ₂	Náhodné	O ₃	6	Proškolení obsluhy tryskače a namátková kontrola	V ₂	K ₂	O ₁	1

Výroba kopírovacího kola	Záměna materiálu polotovaru	Nižší životnost/poškození stroje	V ₄	Chybné vychystání polotovarů	K ₂	Náhodné	O ₃	8	Označení polotovarů barvou a přesně definované místo uskladnění	V ₂	K ₁	O ₃	2
Provoz kopírovacího kola	Ztráta tlaku v přímočarém hydromotoru	Ztráta funkce	V ₄	Netěsnost hydraulického okruhu	K ₂	Obsluha stroje	O ₂	8	Použití podložek na přímočarém hydromotoru	V ₁	K ₁	O ₁	0
	Kritické silové účinky	Poškození svařence a všech dalších komponent	V ₃	Chybné provozní podmínky	K ₃	Náhodné	O ₂	6	Bezpečnost stroje je dimenzována na větší zatížení než provozní, vypočteno v kapitole 6.3	V ₃	K ₁	O ₂	4
	Uvolnění kopírovacího kola z čepů	Vypadnutí čepu	V ₄	Chybná konstrukce	K ₂	Náhodné	O ₃	9	Použití jisticích prvků na čepy	V ₁	K ₁	O ₁	0
	Nedodržení utahovacích momentů na disku	Uvolnění disku s pneumatikou	V ₃	Nesprávný utahovací moment	K ₂	Náhodná kontrola	O ₃	6	Stanovení utahovacích momentů v návodu stroje	V ₂	K ₂	O ₂	2
	Defekt pneumatiky	Zničení pneumatiky a ztráta funkčnosti kopírovacího kola	V ₄	Špatný tlak, najetí na ostrý předmět	K ₂	Obsluha stroje	O ₂	8	Stanovení doporučeného tlaku v návodu stroje	V ₂	K ₂	O ₂	2
	Chybně nastavená pracovní poloha	Nadměrná zatěžování rámu stroje	V ₄	Obsluha stroje	K ₁	Náhodná kontrola	O ₂	7	Upozornění na nastavení stroje v návodu, upozornění samolepkou na rámu stroje	V ₃	K ₁	O ₂	4