



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

Návrh měřicího zařízení na třibodový závěs

**Design of a measuring device for a three-
point hitch**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Petr DLOUHÝ

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŠROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Martin Havlíček

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dlouhý** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **483258**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh měřicího zařízení na třibodový závěs

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a measuring device for a three-point hitch

Pokyny pro vypracování:

V závěrečné práci proveďte rešerši stávajících možností měření silových a momentových účinků vznikající mezi traktorem a strojem.

Pomocí poznatku z rešerše navrhnete konstrukční řešení měřicího zařízení pro traktory s výkonem motoru 200 kW a více.

Pro navržené řešení zpracujte 3D model, proveďte kontrolní výpočty a pevnostní analýzu pomocí příslušného software. V závěru diskutujte dosažené výsledky pevnostní analýzy a navrhnete případná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

[1] J. Roca, M. Comellas, J. Pijuan a M. Nogués, „Development of an easily adaptable three-point hitch dynamometer,“ ELSEIVER, 2019.

[2] V. Švec, Části a mechanismy strojů - Spoje a části spojovací, Praha: ČVUT, 2008.

[3] M. Novák, Technická měření, Praha: ČVUT, 2018.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Havlíček, ústav konstruování a částí strojů FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **12.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Martin Havlíček
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh měřicího zařízení na tříbodový závěs“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Havlíčka, s použitím literatury uvedené na konci bakalářské práce v seznamu literatury.

V Praze dne 29. 7. 2021

.....

Petr Dlouhý

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Havlíčkovi za veškeré rady a připomínky k práci, a především za ochotu a trpělivost při konzultacích.

V neposlední řadě také patří velké poděkování mé rodině za podporu po celou dobu studia a za pochopení při tvorbě závěrečné práce.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Petr DLOUHÝ		
Název BP:	Návrh měřicího zařízení na třibodový závěs		
Anglický název:	Design of a measuring device for a three-point hitch		
Rok:	2021		
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství		
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový		
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů		
Vedoucí BP:	Ing. Martin Havlíček		
Konzultant:	Ing. Martin Havlíček		
Bibliografické údaje:	počet stran	75	
	počet obrázků	94	
	počet tabulek	5	
	počet příloh	4	
Klíčová slova:	třibodový závěs, dynamometr, tenzometr, měření sil, rámová konstrukce		
Keywords:	three-point hitch, dynamometer, strain gauge, force measurement, frame construction		

Anotace:

Tato bakalářská práce pojednává o řešení problematiky měření silových účinků, které vznikají ve spojení traktoru a připojeného stroje během provozu. V první části jsou probrány aktuální možnosti měření, na tuto část dále navazuje rozbor měření pomocí jednotlivých typů dynamometrů, z nichž každý typ je vhodný pro určitou aplikaci. V analytické části bakalářské práce je popsán konstrukční návrh dvourámového dynamometru určeného pro měření silových a momentových účinků. Ve třetí části jsou výsledky pevnostní analýzy, ve které byl navržený dynamometr podroben zatížení, simulujícímu možné stavy během provozu.

Abstract:

This bachelor's thesis deals with the solution of the problem of measuring the force effects that arise in the connection of a tractor and a connected machine during operation. The first part discusses the current measurement options, this part is followed by an analysis of measurements using individual types of dynamometers, each type is suitable for a particular application. The analytical part of the bachelor's thesis describes the design of a two-frame dynamometer, designed to measure force and moment effects. In the third part are the results of the strength analysis, in which the designed dynamometer was subjected to a load simulating possible conditions during operation.

OBSAH

Seznam zkratk a symbolů	1
1. Úvod	3
2. Teoretická část práce	4
2.1. Historie.....	5
2.2. Zemědělské stroje.....	5
2.2.1. Typy zemědělských strojů	5
2.2.1.1. Energetické stroje.....	5
2.2.1.2. Traktor.....	6
2.2.2. Rozdělení zemědělských strojů podle způsobu připojení	7
2.2.2.1. Nesený stroj.....	7
2.2.2.2. Polonesený stroj.....	8
2.2.2.3. Návěsný stroj.....	8
2.2.3. Připojování zemědělských strojů.....	9
2.3. Tříbodový závěs	10
2.3.1. Rozdělení kategorií tříbodových závěsů podle výkonu motoru traktoru.....	10
2.3.2. Rozměry tříbodových závěsů podle normy ISO 730:2009	11
2.3.3. Rozměry pro připojení k tříbodovému závěsu dle ISO 730:2009.....	13
2.3.4. Schématické znázornění tříbodového závěsu	15
2.3.5. Hlavní části tříbodového závěsu.....	15
2.3.5.1. Táhlo třetího bodu	15
2.3.5.2. Spodní ramena	16
2.3.5.3. Kloubové oko.....	17
2.3.5.4. Koule.....	18
2.3.5.5. Závěsné háky (rychloupínací)	18
2.3.5.6. Boční stabilizátory	19
2.3.5.7. Zdvihací mechanismus	20
2.3.5.8. Vývodový hřídel.....	21
2.4. Možnosti měření silových účinků.....	22
2.4.1. Výkyvný dynamometr	23
2.4.2. Jednorámový dynamometr	24
2.4.3. Dvourámové dynamometry	24
2.4.4. Měřicí elementy	25
2.4.5. Matematický model	26
2.4.6. Koncepte dynamometru	26
2.4.7. Proces měření a matematický model dynamometru.....	27
2.4.8. Výpočet výsledných silových a momentových účinků	28
2.5. Dynamometr TH 300	31
2.6. Měření sil pomocí tenzometrů	31
2.6.1. Tenzometr	31
2.6.2. Dynamometr	33
3. Praktická část bakalářské práce	34
3.1. Návrh zařízení pro měření sil	34
3.2. Základní popis.....	34

3.3.	Princip měření	36
3.4.	Vnitřní rám	37
3.4.1.	Základny	38
3.4.2.	Ramena lichoběžníku	40
3.4.3.	Úchyty.....	41
3.4.4.	Připojení na traktor	42
3.5.	Vnější rám	43
3.5.1.	Základny	44
3.5.2.	Ramena lichoběžníku	45
3.5.3.	Úchyty.....	46
3.5.4.	Připojování strojů	47
3.6.	Propojovací pruty	47
3.7.	Ocel S355.....	49
4.	Kontrolní výpočty	50
4.1.	Kontrola prutů	50
4.1.1.	Kontrola prutů na tah	50
4.1.2.	Kontrola měrného tlaku v závitu	50
4.2.	Kontrola čepů	51
4.2.1.	Kontrola čepu na otláčení	51
4.2.2.	Kontrola čepu na stříh a ohyb	52
4.2.2.1.	Ohybový moment.....	52
4.2.2.2.	Napětí při ohybu.....	53
4.2.2.3.	Smykové napětí	54
4.2.2.4.	Redukované napětí.....	54
4.2.3.	Kontrola kontaktní plochy čepu a úchyty na otláčení.....	54
4.2.4.	Zhodnocení výsledků	54
4.3.	Kontrola šroubů	55
4.3.1.	Stanovení osově síly	55
4.3.2.	Kontrola měrného tlaku v závitu	56
4.3.3.	Normálové napětí.....	56
4.3.4.	Smykové napětí	57
4.3.5.	Redukované napětí.....	57
4.4.	Kontrola koutových svarů	57
4.4.1.	Kontrola při namáhání tahem	58
5.	Pevnostní analýza.....	60
5.1.	Zatěžovací stav 1 (ZS1)	61
5.2.	Zatěžovací stav 2 (ZS2)	64
5.3.	Návrh doplňkové úpravy	67
6.	Závěr.....	69
	Seznam použité literatury	70
	Seznam obrázků	73
	Seznam tabulek	74
	Seznam příloh.....	75
	Přílohy.....	75

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
A	$[mm^2]$	plocha průřezu
a	$[mm]$	tloušťka svaru
α	$[-]$	koeficient pro příslušnou pevnostní hypotézu
β	$[^\circ]$	úhel boku
γ	$[^\circ]$	úhel stoupání
E	$[N \cdot mm^{-2}]$	modul pružnosti v tahu
ε	$[-]$	poměrná deformace
F	$[N]$	síla
F_x	$[N]$	síla ve směru osy x
F_y	$[N]$	síla ve směru osy y
F_z	$[N]$	síla ve směru osy z
F_o	$[N]$	osová síla vzniklá vlivem utažení šroubu
FSO	$[\%]$	procento z naměřené hodnoty
f	$[-]$	součinitel tření
φ	$[^\circ]$	třecí úhel
g	$[m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení
h	$[mm]$	výška matice
HMH	$[-]$	zkratka pro energ. hypotézu (Huber, von Mises, Hencky)
i	$[-]$	počet chodů závitu
J	$[mm^4]$	kvadratický moment průřezu v ohybu
K	$[-]$	deformační citlivost tenzometru
l	$[m]$	délka
Δl	$[m]$	změna délky způsobená deformací
l_o	$[mm]$	původní délka před deformací
m	$[kg]$	hmotnost
M_d	$[N \cdot m]$	výsledný moment vznikající mezi rámy dynamometru
$M_{x,d}$	$[N \cdot m]$	moment mezi rámy dynamometru vzhledem k ose x
$M_{y,d}$	$[N \cdot m]$	moment mezi rámy dynamometru vzhledem k ose y
$M_{z,d}$	$[N \cdot m]$	moment mezi rámy dynamometru vzhledem k ose z



M_i	$[N \cdot m]$	výsledný moment vznikající mezi dynamometrem a strojem
$M_{kš}$	$[N \cdot m]$	utahovací moment šroubu
Mn	$[-]$	chem. značka manganu
M_o	$[N \cdot m]$	ohybový moment
N	$[N]$	vnitřní síla v prutu
p	$[MPa]$	kontaktní tlak
P	$[mm]$	rozteč (stoupání) závitu
P	$[-]$	chem. značka fosforu
p_D	$[MPa]$	dovolený tlak
π	$[-]$	Ludolfovo číslo
Q	$[N]$	osová síla zatěžující prut
R	$[\Omega]$	elektrický odpor
R_e	$[N \cdot mm^{-2}]$	mez kluzu
R_m	$[N \cdot mm^{-2}]$	mez pevnosti
R_o	$[\Omega]$	elektrický odpor při nezatíženém stavu
ΔR	$[\Omega]$	změna elektrického odporu způsobená deformací součásti
ρ	$[\Omega \cdot m]$	měrný elektrický odpor (rezistivita)
S	$[-]$	chem. značka síry
Si	$[-]$	chem. značka křemíku
σ	$[N \cdot mm^{-2}]$	normálové napětí
σ_D	$[N \cdot mm^{-2}]$	dovolené napětí
σ_o	$[N \cdot mm^{-2}]$	napětí při ohybu
σ_{red}	$[N \cdot mm^{-2}]$	redukované napětí
τ	$[N \cdot mm^{-2}]$	smykové napětí
θ_{pitch}	$[\circ]$	úhel stoupání, resp. klesání
θ_{roll}	$[\circ]$	úhel bočního náklonu
W_o	$[mm^3]$	průřezový modul v ohybu
W_k	$[mm^3]$	průřezový modul v krutu
$zč$	$[-]$	počet nosných závitů
z	$[mm]$	šířka svaru

1. Úvod

Zemědělství je v dnešní době jedním z nejdůležitějších pilířů průmyslu a ekonomiky. Je proto pochopitelné, že na jednotlivé stroje jsou kladeny vysoké nároky, ať už se jedná o energetické stroje, tj. traktory nebo přípojné stroje. Z těchto důvodů je velmi důležitá jejich optimalizace, správné konstrukční řešení, odolnost a vysoká životnost. Aby bylo možné dodržet tyto požadavky, je zapotřebí mít pro vývoj strojů vyhovující vstupní parametry. V případě připojovaných strojů to mohou být silové poměry na jejich jednotlivých částech, např. pracovní orgány, které jsou ve styku s půdou, nebo na připojovacích bodech. Valná většina zemědělských strojů, bez ohledu na to jestli jde o traktor nebo přípojný stroj, nedisponuje možností měření silových účinků na jednotlivých částech jejich soupravy. Z těchto důvodů bylo vyvinuto zařízení, které umožňuje tyto účinky zaznamenávat.

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem dynamometru na tříbodový závěs energetických strojů – traktorů, umožňujícího měřit síly a momenty vznikající vlivem provozu v různých provozních podmínkách. Jeho koncepce odpovídá dynamometru TH 300, který byl vyvinut Výzkumným ústavem zemědělské techniky v Praze (VÚZT). Oproti TH 300 je zde ale požadavek především na jeho vyšší zatížitelnost a tudíž možnost použití na nejvýkonnější soupravy traktoru a stroje.

2. Teoretická část práce

Teoretická část bakalářské práce se zaměřuje na rozbor a zhodnocení současného stavu a možností zemědělských strojů. Úvodní část se věnuje rozdělení zemědělských strojů podle účelu využití a dále podle způsobu jejich připojení na energetický stroj – traktor.

Jelikož je hlavním tématem bakalářské práce návrh měřicího zařízení na tříbodový závěs, jsou zde tříbodové závěsy podrobně popsány, jednak jako celek, jednak jejich jednotlivé části. Konstrukce a rozměry tříbodových závěsů podléhají normě ISO 730:2009, ze které bylo pro tuto oblast čerpáno.

Princip a možnosti měření silových účinků jsou zde popsány na prototypovém dvourámovém dynamometru, na jehož principu měření je založen i dynamometr navrhovaný v této práci. V části o prototypovém dynamometru jsou shrnuty všechny požadavky, možnosti a úskalí měření.

Závěrečná část se věnuje snímačům, které jsou pro toto měření využívány. Jedná se především o odporové tenzometry, popř. dynamometry, jsou-li tenzometry aplikovány na příslušný deformační člen.

2.1. Historie

Zemědělské stroje jsou lidmi používány již od dávných dob, byť z dnešního pohledu šlo tenkrát o primitivní nástroje, které měly za účel snížení potřeby lidské síly. Ta byla nahrazena silou zvířat, což byl na tuto dobu významný vliv na zvýšení produktivity, která byla klíčová, jelikož zemědělství představovalo hlavní zdroj obživy. S postupem času lidé vyvíjeli stroje, které byly vzorem pro dnešní, vyspělé. Šlo například o jednoduché pluhy pro orbu půdy, které byly taženy dobyt看em nebo koňmi. V dobách průmyslové revoluce s objevem možností využití páry byl učiněn velký krok vpřed. Dosud využívaná síla zvířat byla nahrazena mnohem výkonnějšími parními stroji. Svoji roli začaly hrát také první mechanizované stroje, které nahradily nutnost ruční sklizně. Příkladem takových strojů mohou být sekačky s poháněnými čepelemi anebo stroje na mlácení obilí. Z parních strojů postupně v průběhu 19. století vznikaly první traktory, které se postupně s příchodem spalovacího motoru vyvinuly do dnešních podob. [1]

2.2. Zemědělské stroje

Zemědělský stroj je zařízení, které je určeno ke zvýšení produktivity a efektivity práce v oblasti zemědělství, zejména při práci na polích. Bývá navržen s ohledem na snižování materiálové a energetické náročnosti. Existuje mnoho různých variant strojů, od ručních, elektrických až po traktory a nespočet přípojných strojů. [2]

2.2.1. Typy zemědělských strojů

Zemědělské stroje lze dělit do několika kategorií podle způsobu jejich využití. [2]

- a) Energetické stroje – jsou určeny především k pohonu nebo tažení přípojných strojů, které následně obdělávají půdu, sklízí úrodu, sečou plodiny na polích
- b) Stroje na zpracování půdy – slouží k přípravě půdy pro další vysetí rostlin, nejpoužívanějším strojem je pluh, dále to jsou stroje na jemné kypření půdy
- c) Secí stroje – slouží k sázení plodin do půdy připravené již zmíněnými stroji
- d) Postřikovací stroje – jejich funkcí je hnojení půdy a ochrana zasazených plodin postřiky
- e) Ostatní stroje – širší spektrum strojů, z nichž každý má své konkrétní využití, do této kategorie lze zařadit např. balíkovač, který slouží ke zpracování sena a slámy

2.2.1.1. Energetické stroje

V zemědělství se pojmem energetický stroj rozumí stroj, který je určen především k pohonu přípojných strojů. Hlavním a základním energetickým strojem je v zemědělství traktor.

2.2.1.2. Traktor

Traktor je motorovým vozidlem, které je určeno především k tažení vozů a dalších přípojných zemědělských strojů. Kromě tažení je také používán pro nesení a tlačení zemědělských strojů, které se k traktoru připojují prostřednictvím tříbodových závěsů. Primární oblast použití pro traktor je zemědělství, konkrétně provoz na polích. Existují ovšem i traktory uzpůsobené do hůře přístupného terénu, např. lesy. V tomto případě jde o tzv. lesní traktor, který se od standardního zemědělského traktoru liší konstrukčně. Ve většině případů má čtyři kola, přední bývají menší než zadní a je poháněn vznětovým spalovacím motorem s hnací přední nebo zadní nápravou (u moderních modelů většinou obě). Lze se setkat i s traktory, které mají kola nahrazena pásy. Toto řešení lze najít u traktorů s velmi vysokým výkonem motoru, kdy již nestačí trakční schopnosti pneumatik a je potřeba zvětšit stykovou plochu s terénem. Výhodou pásového traktoru je také menší zhutňování půdy a menší pravděpodobnost zaboření do terénu díky výrazně větší kontaktní ploše pásů a půdy. Některé zemědělské stroje mohou pro svoji funkčnost vyžadovat kroutící moment, např. rotující nože u sekaček. Z těchto důvodů bývají traktory opatřeny výstupním vývodovým hřídelem v oblasti zadního tříbodového závěsu a zajišťují přenos kroutícího momentu na připojený stroj. U moderních typů traktorů lze najít vývodový hřídel i v přední části, stejně jako tříbodový závěs, který může sloužit pro zavěšení protizávaží. Na světě existuje mnoho výrobců traktorů, mezi nejvýznamnější lze zařadit americké firmy John Deere, Caterpillar (CAT) a New Holland, německý Claas a Fendt. V Česku jde především o firmu Zetor. [3]

Příkladem traktoru klasické koncepce (Obr. 1) je traktor od amerického výrobce John Deere s označením 6090M, disponující výkonem 73 kW (100k), se čtyřválcovým motorem o objemu 4,5l. [4]



Obr. 1: John Deere 6090M [4]

Ukázkou pásového traktoru (Obr. 2) je traktor řady 8RT, firmy John Deere, s odpruženým podvozkem, určený pro nejnáročnější tahové práce. [5]



Obr. 2: Pásový traktor řady 8RT [5]

2.2.2. Rozdělení zemědělských strojů podle způsobu připojení

Stroje lze, mimo jiné, dělit podle způsobu připojení na energetický stroj (traktor) na:

- a) Nesené stroje
- b) Polonesené stroje
- c) Návěsné stroje

2.2.2.1. Nesený stroj

Nesený stroj (Obr. 3) je přípojné zařízení za traktor, které je připojeno pomocí tříbodového závěsu a nedisponuje vlastním podvozkem. Celou jeho hmotnost tedy nese traktor. Hmotnost stroje je v tomto případě klíčovým údajem, pokud je příliš vysoká, dochází k přetěžování zadní nápravy traktoru a odlehčuje se přední, jejíž kola ztrácí trakci. V těchto situacích je třeba osadit na přední tříbodový závěs závaží, které zlepšší rozložení váhy mezi nápravami. Příkladem neseného stroje je např. sekačka, která může být připojena na přední i zadní tříbodový závěs a její nože jsou roztáčeny pomocí vývodové hřídele. [6]



Obr. 3: Nesená sekačka [7]

2.2.2.2. Polonesený stroj

Polonesený stroj (Obr. 4) se od neseného odlišuje přítomností podvozku, který nese značnou část hmotnosti stroje a odlehčuje tím traktoru, resp. tříbodovému závěsu. Vlastností polonesených strojů je i menší zátěž pneumatik traktoru a tím se dosahuje i jejich delší životnosti. Pneumatiky je možné kvůli menší zátěži hustit na nižší tlak, což zajišťuje i jejich lepší trakční schopnosti a větší kontaktní plochu. Snižuje se i měrný tlak mezi pneumatikou a terénem. To má za následek menší utužení půdy. Díky přítomnosti podvozku na stroji není třeba přídavné protizávaží na přední tříbodový závěs traktoru pro zajištění větší stability soupravy a rovnoměrnějšího rozložení hmotnosti mezi obě nápravy traktoru. Příkladem poloneseného stroje je např. pluh, který je na konci opatřen kolem, sloužícím jako opěrný bod. [6]



Obr. 4: Polonesený pluh [8]

2.2.2.3. Návěsný stroj

Návěsný stroj je z hlediska připojení k traktoru nejjednodušším zemědělským strojem. Disponuje vlastním podvozkem, který nese takřka celou hmotnost stroje. Určitá skupina strojů, které mají pouze jednu nápravu nebo v případě dvou umístěných blíže k sobě, ovšem přenáší část své hmotnosti na závěs traktoru. Jde především o stroje, u nichž je potřeba po odpojení od traktoru použít podpěru pod oj (viz. Obr. 6), kterou se připojují k traktoru. Na rozdíl od předchozích variant se k traktoru nepřipojují prostřednictvím tříbodového závěsu, ale pouze pomocí čepu a oka. Příkladem návěsného stroje je valník (Obr. 5) nebo cisterna (Obr. 6) za traktor, která je v tomto případě opatřena pouze jednou nápravou, a proto část její váhy nese traktor.



Obr. 5: Dvounápravový valník [9]



Obr. 6: Jednonápravová cisterna s podpěrou oje [10]

2.2.3. Připojování zemědělských strojů

Zemědělské stroje se k traktoru připojují dvěma základními způsoby:

- a) Pomocí čepu a oka v případě, že je zapotřebí stroj pouze táhnout
- b) Prostřednictvím tříbodového závěsu, je-li nutné stroj nést nebo během používání měnit jeho výšku nad terénem (např. pluh)

Charakteristickým znakem pro nesené a polonesené stroje je připojování přes tříbodový závěs.

Část strojů může také, nezávisle na způsobu připojení, vyžadovat pro svoji funkci pohon svých rotačních částí. To je zajištěno propojením vývodového hřídele na traktoru a příslušného hřídele na stroji kloubovým (kardanovým) hřídelem. Příkladem takto poháněného stroje jsou např. rotační brány.

2.3. Tříbodový závěs

Tříbodový závěs je zařízení sloužící k připojování neseného nebo poloneseného stroje. Rozměry tříbodových závěsů jsou rozděleny do jednotlivých kategorií podle výkonů traktorů a jsou dány normou ISO 730:2009. Skládá se ze dvou spodních závěsných ramen, která je možné pomocí hydraulických válců zdvihat a spouštět a díky tomu nastavovat požadovanou výšku dvou spodních závěsných bodů od terénu. Dalším prvkem je táhlo třetího bodu, které je na straně traktoru uchyceno pomocí kloubového oka a na jeho druhý konec lze umístit další kloubové oko, které lze nahradit rychloupínacím hákem. Provedení tříbodového závěsu je patrné z Obr. 7. [11] [12]



Obr. 7: Tříbodový závěs [13]

2.3.1. Rozdělení kategorií tříbodových závěsů podle výkonu motoru traktoru

Následující tabulka (Tab. 1) ukazuje rozdělení jednotlivých kategorií podle výkonu motoru traktoru.

Kategorie	Výkon motoru, podle ISO 789-1 [kW]
1N	do 35
1	do 48
2N/2	30 až 92
3N/3	60 až 185
4N/4	110 až 350

Tab. 1: Rozdělení kategorií podle výkonu motoru [14]

2.3.2. Rozměry tříbodových závěsů podle normy ISO 730:2009

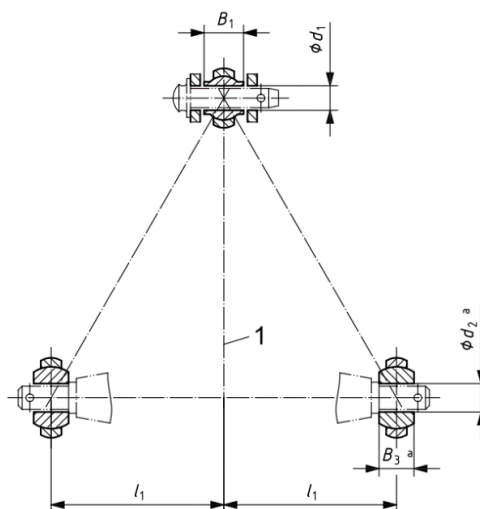
Následující tabulka (Tab. 2) popisuje hlavní rozměry jednotlivých částí a jejich vzdáleností mezi sebou v závislosti na jednotlivých kategoriích.

rozměry v milimetrech

Označení	Název	Kategorie				
		1N	1	2	3	4
Horní závěsný bod						
d_1	Průměr otvoru pro závěsný čep	$19,3^{+0,2}_0$	$19,3^{+0,2}_0$	$25,7^{+0,2}_0$	$32^{+0,25}_0$	$45,2^{+0,3}_0$
B_1	Šířka koule	$44^0_{-0,5}$	$44^0_{-0,5}$	$51^0_{-0,5}$	$51^0_{-0,5}$	$64^0_{-0,5}$
Dolní závěsný bod						
d_2	Průměr otvoru pro závěsný čep	$22,4^{+0,25}_0$	$22,4^{+0,25}_0$	$28,7^{+0,3}_0$	$37,4^{+0,35}_0$	$51^{+0,5}_0$
B_3	Šířka koule	$35^0_{-0,5}$	$35^0_{-0,5}$	$45^0_{-0,5}$	$45^0_{-0,5}$	$57,5^0_{-0,5}$
l_1	Rozteč středu koulí od osy traktoru	218	359	435	505	612
l_2	Minimální výkyv dolních táhel (ramen)	50 min.	100 min.	125 min.	125 min.	125 min.
L	Vzdálenost středu dolních koulí od konce vývodové hřídele	300 až 375	500 až 575	550 až 625	575 až 675	575 až 675

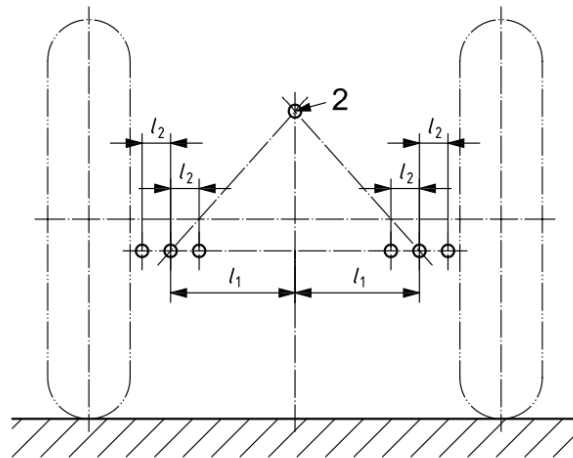
Tab. 2: Hlavní rozměry tříbodových závěsů podle jednotlivých kategorií [14]

Na obrázku (Obr. 8) jsou znázorněny rozměry jednotlivých částí uvedené v tabulce (Tab. 2).



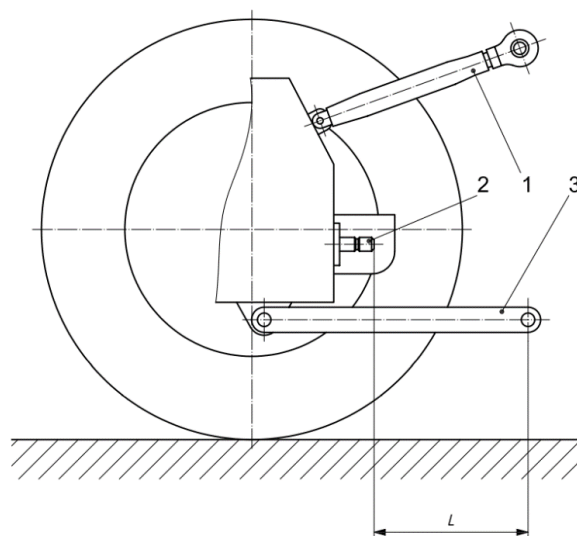
Obr. 8: Připojovací rozměry na traktoru [14]

Obr. 9 doplňuje předchozí obrázek a znázorňuje vzdálenosti výkyvů spodních ramen.



Obr. 9: Připojovací rozměry na traktor [14]

Na Obr. 10 je znázorněna vzdálenost středu dolních připojovacích bodů (koulí) od konce vývodového hřídele. Dále jsou zde popsány další části tříbodového závěsu.



Obr. 10: Vzdálenost spodního bodu od vývodového hřídele [14]

1. Táhlo třetího bodu
2. Vývodový hřídel
3. Spodní závěsná ramena

2.3.3. Rozměry pro připojení k třibodovému závěsu dle ISO 730:2009

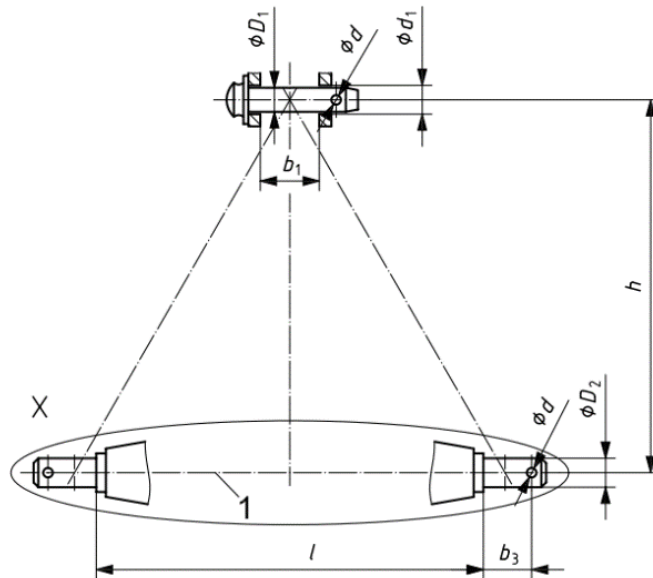
Níže uvedená tabulka (Tab. 3) popisuje jednotlivé rozměry na stroji, vycházející z rozměrů na straně traktoru. Jsou zde uvedeny především rozměry a vzdálenosti připojovacích bodů.

rozměry v milimetrech

Označení	Název	Kategorie				
		1N	1	2	3	4
Horní závěsný bod						
D_1	Průměr u horního táhla	$19_{-0,08}^0$	$19_{-0,08}^0$	$25,5_{-0,13}^0$	$31,75_{-0,2}^0$	$45_{-0,8}^0$
b_1	Šířka uchycení u horního táhla	52 min.	52 min.	52 min.	52 min.	65 min.
Dolní závěsný bod						
D_2	Průměr otvoru u koule dolního táhla	$22_{-0,2}^0$	$22_{-0,2}^0$	$28_{-0,2}^0$	$36,6_{-0,2}^0$	$50,8_{-1,1}^0$
b_3	Vzdálenost díry u dolního kolíku	49 min.	49 min.	49 min.	52 min.	69 min.
b_5	Šířka uchycení u koulí	65_{+2}^0	65_{+2}^0	65_{+2}^0	$72,5_{+2}^0$	$96,5_{+2}^0$
l	Vzdálenost mezi uchycením u koulí	400 $\pm 1,5$	683 $\pm 1,5$	825 $\pm 1,5$	965 $\pm 1,5$	1165,5 $\pm 1,5$
Ostatní rozměry						
d	Průměr otvoru pro závlačku: horní úchyt dolní úchyt	12 min. 12 min.	12 min. 12 min.	12 min. 12 min.	12 min. 17 min.	17 min. 17 min.
h	Vzdálenost mezi dolním a horním uchycením	360 $\pm 1,5$	460 $\pm 1,5$	610 $\pm 1,5$	685 $\pm 1,5$	1100 $\pm 1,5$

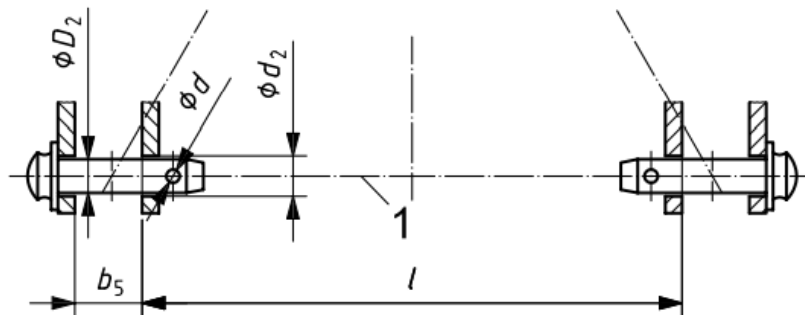
Tab. 3: Připojovací rozměry na stroji [14]

Následující obrázek (Obr. 11) popisuje hlavní připojovací rozměry na straně stroje.



Obr. 11: Připojovací rozměry stroje [14]

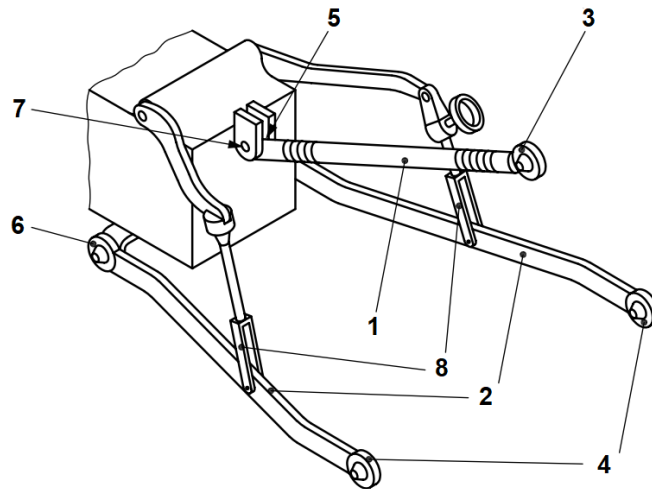
Obr. 12 doplňuje předchozí obrázek a ukazuje především rozměry týkající se připojovacích čepů.



Obr. 12: Připojovací rozměry [14]

2.3.4. Schématické znázornění tříbodového závěsu

Tříbodový závěs, jako celek, je složen z několika částí. Jeho hlavní komponenty jsou znázorněné na Obr. 13.



Obr. 13: Prvky tříbodového závěsu [14]

1. táhlo třetího bodu (horní táhlo)
2. spodní ramena
3. horní závěsný bod
4. dolní závěsné body
5. horní připojovací bod
6. dolní připojovací body
7. horní spojovací čep
8. zvedací táhla/vidlice

2.3.5. Hlavní části tříbodového závěsu

V této kapitole jsou popsány jednotlivé komponenty, které tvoří sestavu tříbodového závěsu. Jde především o prvky vyznačené na Obr. 13.

2.3.5.1. Táhlo třetího bodu

Táhlo třetího bodu je horním spojovacím prvkem mezi traktorem a přípojným strojem. Táhlo bývá opatřeno kloubovými oky na koncích (Obr. 14), aby zde nebyl vliv ohybu, popř. jen minimální a táhlo bylo namáháno pouze na tah, resp. tlak. Další variantou je nahrazení vnějšího kloubového oka závěsným hákem (Obr. 15). [14]

Díky závitovému spojení ok se samotným táhlem je možné nastavovat konečnou délku táhla pro konkrétní připojovaný stroj.



Obr. 14: Horní táhlo s kloubovými oky [15]



Obr. 15: Horní táhlo s rychloupínacím hákem [15]

2.3.5.2. Spodní ramena

Spodní ramena jsou dolními spojovacími prvky mezi traktorem a přípojným strojem. Jejich konstrukce může být obdobná jako u horního táhla, tj. s kloubovými oky na koncích (Obr. 17). Další variantou jsou závěsné háky na vnějších koncích ramen (Obr. 16), do kterých zapadají závěsné koule připojovaného stroje. Na koncích, které náležejí straně traktoru, jsou ramena uchycena pomocí kloubových ok. Díky tomu je umožněn jejich výkyv ve vertikálním i horizontálním směru. Spodní ramena jsou řešena tak, že obsahují otvory pro zvedací vidlice, díky čemuž je možné měnit rozsah zdvihu a samotnou zdvihací sílu. [14]



Obr. 16: Spodní rameno s rychloupínacím hákem [16]



Obr. 17: Spodní rameno s kloubovým okem [16]

2.3.5.3. Kloubové oko

Kloubová oka se u tříbodových závěsů používají u částí, kde je požadavek, aby byly namáhány pouze v osovém směru, tj. tahem, resp. tlakem. Slouží tedy k minimalizaci ohybové složky, k jejímu úplnému odstranění ale nemůže dojít, jelikož v kloubu bude vždy existovat tření. Svoji konstrukcí dovolují drobné výkyvy částí závěsu během provozu. Dalším přínosem kloubových ok je především také snadná manipulace s příslušenstvím tříbodových závěsů, díky možnosti natočení kulové vložky do požadovaného úhlu. Tím je zaručena vyhovující sousost děr a čepů v místě připojení. Existují provedení s vnitřním (Obr. 18) a vnějším závitem (Obr. 19).



Obr. 18: Kloubové oko s vnitřním závitem [17]



Obr. 19: Kloubové oko s vnějším závitem [18]

Poměrně inovativním řešením od společnosti LH Lift jsou oka s vyměnitelnými kulovými vložkami (Obr. 20). Tato varianta řešení je odolnější než klasické provedení ok. A je méně náročná z hlediska výrobních technologií. Inovace od LH Lift využívá dvě půlkulové vložky, které jsou umístěny do kaleného kulového pouzdra, což umožňuje použití výrazně odolnějších materiálů. [19]



Obr. 20: Kloubové oko s vyměnitelnými kulovými vložkami [19]

2.3.5.4. Koule

Koule na tříbodovém závěsu slouží jako alternativa pro kloubová oka. Umisťují se na připojované stroje a spolu se závěsnými háky usnadňují manipulaci a zejména připojování stroje. Význam mají hlavně z hlediska silového působení, chovají se obdobně jako kloubová oka, tzn. přenáší pouze sílu z traktoru na stroj, ale v jednotlivých spojeních koule – hák takřka nezachycují momentové působení. Zůstává pouze malý moment v důsledku tření. Vyrábí se v několika rozměrových třídách, které jsou dány pro příslušnou kategorii normou. Rozlišují se koule pro spodní body (Obr. 21) a pro třetí bod (Obr. 22), varianta pro dolní body se vyrábí bez osazení, pro třetí bod s osazením.



Obr. 21: Koule spodních bodů [20]



Obr. 22: Koule třetího bodu [20]

2.3.5.5. Závěsné háky (rychloupínací)

Závěsné háky slouží k připojení náradí nebo stroje za traktor. Jejich rozměry jsou odlišné pro každou kategorii a určuje je norma. Jsou umístěny na koncích spodních ramen. U některých variant tříbodových závěsů lze najít závěsný hák i jako třetí bod. Háček pro třetí bod se ovšem od háků pro spodní body liší konstrukčně. Háky pro spodní body (Obr. 23) jsou ve většině případů navrženy jako přivařovací, pokud již nejsou součástí samotného spodního ramene. U háku pro třetí bod (Obr. 24) se ve většině případů lze setkat se závitovým připojením na táhlo třetího bodu. Toto konstrukční řešení umožňuje nastavení vzdálenosti třetího bodu od traktoru. Háky jsou samozajišťovací a po zapadnutí koule, která je součástí připojovaného stroje, se automaticky zajistí v dané poloze a za provozu nehrozí jejich nečekané uvolnění, což by znamenalo odpojení stroje od traktoru. Je-li tříbodový

závěs vybaven závěsnými háky, je tím značně zjednodušena obsluha během připojování stroje a z větší části ji lze řídit přímo z kabiny traktoru.



Obr. 23: Rychloupínací spodní hák [21]



Obr. 24: Rychloupínací horní hák [21]

2.3.5.6. Boční stabilizátory

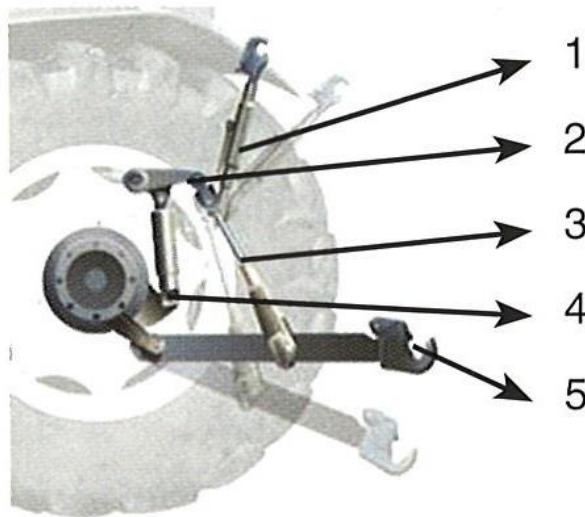
Jelikož jsou spodní závěsná ramena na koncích u traktoru opatřena kloubovými oky, je potřeba je zajistit v dané poloze pomocí bočních stabilizátorů (Obr. 25). Stabilizátory umožňují pomocí děr a čepů nastavit rozevření ramen, resp. boční výkyv na požadovaný rozměr podle použitého stroje. Velikost rozevření ramen je dána normou ISO 730:2009.



Obr. 25: Boční stabilizátory [22]

2.3.5.7. Zdvihací mechanismus

Zdvihací mechanismus (Obr. 26) je část tříbodového závěsu, která slouží pro regulaci výšky spodních závěsných bodů. Mechanismus je tvořen dvěma přímočarými hydromotory, které přes zdvihací ramena přenáší sílu na samotné zdvihací vidlice. Ty jsou pomocí čepu spojeny se spodními závěsnými rameny. Zdvihací vidlice je táhlo (Obr. 27), které je na jednom konci opatřené kloubovým okem, na druhém vidlicí. Součástí může být také stavěcí mechanismus tvořený závitovou dvojicí. Spodní závěsná ramena jsou opatřena několika otvory pro připojení zdvihacích vidlic. Změnou místa uchycení vidlice je možné měnit zdvihací rozsah spodních závěsných bodů a změnou délky ramene měnit velikost síly potřebné pro zdvih. Jednotlivé části zdvihacího mechanismu jsou znázorněny na následujícím obrázku. [23]



Obr. 26: Zdvihací mechanismus [23]

1. Táhlo třetího bodu
2. Zdvihací ramena
3. Zdvihací táhla
4. Přímočarý hydromotor
5. Spodní ramena



Obr. 27: Zdvihací táhlo s možností nastavení délky [15]

2.3.5.8. Vývodový hřídel

Vývodový hřídel (angl. PTO shaft – Power Take Off shaft) slouží u traktorů k pohonu připojených strojů. Na vývodový hřídel na straně traktoru navazuje kloubový hřídel, který je na obou koncích opatřen kardanovými klouby a může být uprostřed dělený. Jeho dvě části jsou spojeny pomocí drážkování. Toto řešení umožňuje posuv v axiálním směru a je díky tomu možnost měnit délku hřídele v závislosti na použitém stroji a traktoru. Hřídel kardanový (Obr. 30) se na vývodový hřídel traktoru připojuje pomocí drážkování, nejčastěji rovnobokého. Vývodové hřídele se u traktorů nacházejí v oblasti zadních tříbodových závěsů, ovšem u většiny dnešních moderních traktorů, disponujících i předním tříbodovým závěsem, lze najít vývodový hřídel i vpředu (Obr. 28). Řešení s předním závěsem a hřídelem se nabízí např. pro použití sekaček.



Obr. 28: Přední tříbodový závěs s vývodovým hřídelem [24]

Na Obr. 29 je ukázka použití vývodového hřídele. V tomto případě je kroutící moment z vývodového hřídele využit pro pohon zemního vrtáku.



Obr. 29: Ukázka použití pohonu vývodovým hřídelem [25]



Obr. 30: Kardanový hřidel [26]

2.4. Možnosti měření silových účinků

Většina traktorů nedisponuje možností měření sil mezi traktorem a strojem, připojeným na tříbodový závěs. Některé moderní modely traktorů mohou disponovat snímači pro měření sil na dvou spodních závěsech (hácích) tříbodového závěsu. Jelikož ale třetí bod závěsu tyto snímače nemá, není možné stanovit výslednou sílu a moment, které vznikají ve spoji traktoru a stroje. [27]

Kvantifikace všech sil a momentů mezi traktorem a strojem, vznikajících v tříbodovém závěsu je důležitá z různých úhlů pohledu. Může jít v první řadě o optimalizaci připojovaných strojů, a to zejména s ohledem na snahu minimalizovat tažnou sílu a spotřebu energie pro daný typ stroje, i s ohledem na terén, ve kterém bude stroj s traktorem použit. [27]

Tato data jsou však důležitá i pro samotný traktor, kde se může jednat o nastavení vhodného tlaku v pneumatikách nebo správného navržení protizávaží v přední části traktoru. Toto závaží bývá často umístěno na předním tříbodovém závěsu, pokud jím traktor disponuje. [27]

V literatuře lze najít mnoho dynamometrů pro tříbodový závěs. Stávající konstrukce lze rozdělit v závislosti na konstrukci rámu a na konfiguraci tenzometrů nebo snímačů síly. Běžnou strategií je umístění snímačů síly nebo tenzometrů přímo do částí tříbodového závěsu. Výhodou tohoto řešení je, že neovlivňuje zatížení traktoru a nemá vliv na výkon nářadí (stroje). Významnou nevýhodou tohoto řešení je, že jakákoli konkrétní implementace takového měřicího systému je vhodná pouze pro jeden konkrétní model traktoru, protože je integrován do vazeb. Další nevýhoda spočívá v tom, že výsledná síla nebo moment na spojovacím zařízení bude záviset na geometrii tříbodového závěsu. Z výše zmíněných skutečností vyplývá, že pro měření je vhodnější použití speciálně zkonstruovaného dynamometru na tříbodový závěs. Dynamometry se od sebe liší svojí konstrukcí a na základě tohoto hlediska je možné rozdělit je do následujících kategorií: [27]

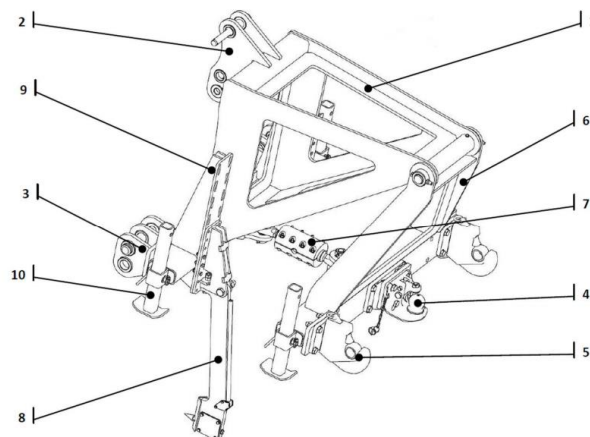
- a) Výkyvný dynamometr
- b) Jednorámový dynamometr
- c) Dvourámový dynamometr

2.4.1. Výkyvný dynamometr

Výkyvný dynamometr (Obr. 31) je nejjednodušším zařízením pro měření sil vznikajících mezi traktorem a strojem. Jeho jednoduchost má ovšem za následek poměrně malé množství měřených veličin – dokáže měřit pouze tah. Pro některé aplikace je ale tento výsledek plně dostačující. Jeho konstrukce spočívá v rámu, který se připojuje na třibodový závěs, ze kterého v horní části vychází kolmo směrem dozadu od traktoru rameno. To je na konci opatřeno otvorem pro připojení druhého rámu, sloužícího pro připojení zemědělského stroje. Jelikož je druhý rám připojen jen pomocí čepu v jednom bodě, je výkyvný. Proto je v úrovni spodních připojovacích bodů umístěné táhlo, které spojuje rám na traktoru s vnějším rámem na stroji. Díky tomu dojde k zajištění vnějšího rámu v požadované poloze. Pro možnost měření tahové síly je součástí spojovacího táhla plně můstkový tenzometrický dynamometr sloužící pro měření tahových sil. Jednotlivé prvky výkyvného dynamometru jsou zobrazeny na Obr. 32. [28]



Obr. 31: Výkyvný dynamometr [28]



Obrázek 13: Celkový pohled na návrh měřicího rámu. 1 - Pevná část rámu. 2 - Třetí bod třibodového závěsu kategorie 3 a 4. 3 - Spodní body třibodového závěsu kategorie 3 a 4. 4 - Kulový závěs K80. 5 - Závěsné háky třibodového závěsu kategorie 3 a 4. 6 - Závěsná část rámu. 7 - Tenzometrické táhlo pro měření tahové síly. 8 - Penetrometr. 9 - Konzola pro připevnění penetrometru. 10 - Odstavné nohy.

Obr. 32: Prvky výkyvného dynamometru [28]

2.4.2. Jednorámový dynamometr

Jednorámový dynamometr (Obr. 33) má výhodu v relativně jednoduché konstrukci a možnosti použití na více typů traktorů. Některé existující varianty jednorámových dynamometrů lze upravovat tak, aby vyhovovaly více rozměrům podle zvoleného stroje. Většina těchto dynamometrů dokáže měřit pouze tahové síly v podélném směru na třech závěsných bodech, neumí měřit boční síly, a proto není možné stanovit výsledný moment mezi traktorem a strojem. Samotný dynamometr svojí konstrukcí ovlivňuje zatížení traktoru, a to jednak v důsledku své hmotnosti a jednak proto, že díky jeho použití je stroj posunut dále od traktoru, o podélný rozměr dynamometru. Tím je posunuto dále od traktoru i těžiště stroje a v důsledku toho vzniká větší namáhání ve spojení. [27]

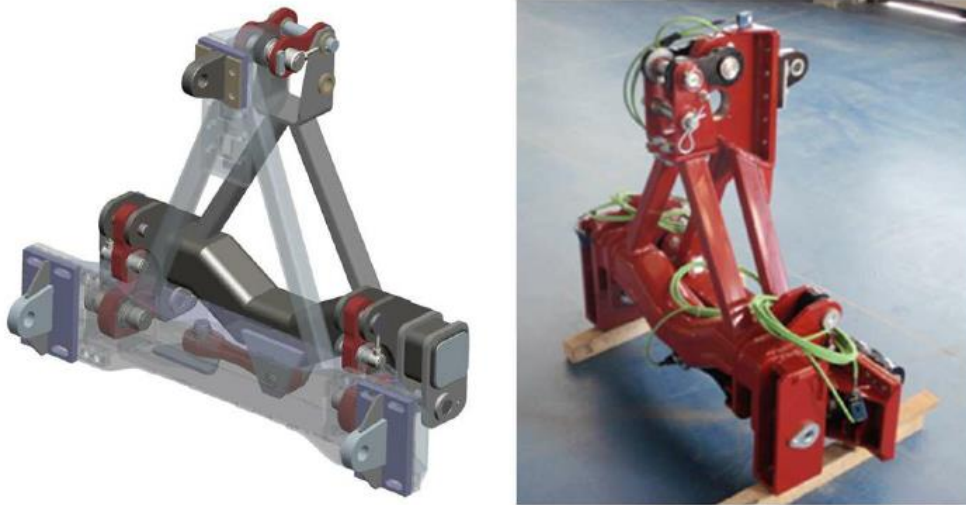


Obr. 33: Jednorámový dynamometr [29]

2.4.3. Dvourámové dynamometry

Dvourámové dynamometry (Obr. 34) umožňují měření všech tří složek výsledné síly (tahové v ose soupravy, dále vertikální i boční síly) a všechny momentové složky ve spoji mezi traktorem a strojem. Jejich konstrukce umožňuje použití pro víc typů traktorů, stejně jako u jednorámových dynamometrů. Na straně k traktoru bývají opatřené standardizovanými součástmi pro upínání, pokud je traktor vybaven závěsnými rychloupínacími háky, tak jsou na rámu upevněny koule. Rám je však možné připojit i pomocí čepů do kloubových ok. Na vnější straně pro stroj jsou ve většině případů rychloupínací háky, tvořící dva spodní závěsné body. Třetí bod stroje může být připojován také pomocí háku, nebo prostřednictvím čepu přes kloubové oko. Konstrukce rámu bývají navrženy tak, aby bylo možné měnit přípojně rozměry v závislosti na kategorii připojovaného stroje. Jejich hlavní nevýhodou je v první řadě robustnost a hmotnost. Tím ovlivňují zatížení traktoru. Další jejich nevýhodou jsou podélné rozměry, které jsou ještě

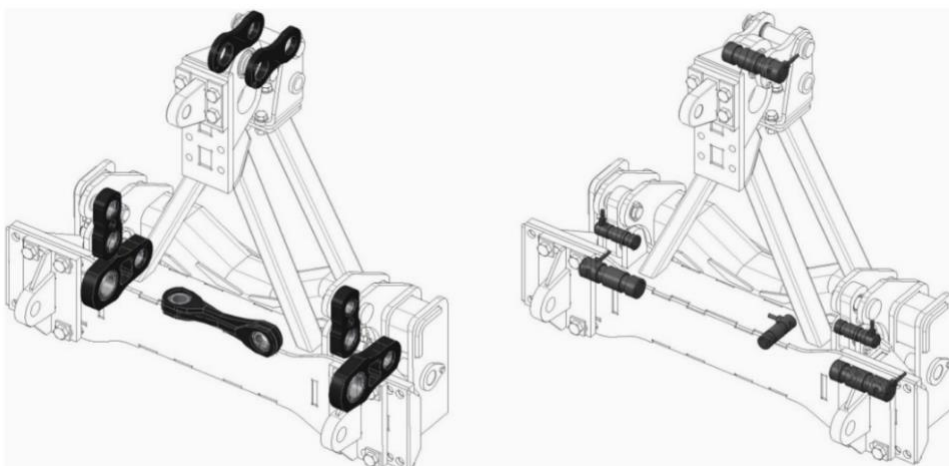
významnější oproti jednorámovému dynamometru. Je kvůli tomu značně posunuto těžiště připojeného stroje od traktoru a proto rostou především momentové účinky ve tříbodovém závěsu. [27]



Obr. 34: Dvourámový dynamometr [30]

2.4.4. Měřicí elementy

Pro většinu měření sil v technické praxi se využívá elektrických odporových snímačů – tenzometrů. Častá je také aplikace tenzometrů zapojených do můstků a jejich následné umístění na vhodné deformační členy. V tomto případě hovoříme o tzv. dynamometrech. Pro měření sil u dvourámového dynamometru, ukázaného na Obr. 34, je využito měřících (vážících) čepů. Jejich konkrétní umístění je patrné z Obr. 35, kde vlevo jsou znázorněny jednotlivé propojovací členy (táhla) mezi oběma rámy a vpravo jsou samotné měřící čepy, kterými jsou táhla připojena k ráům.



Obr. 35: Umístění propojovacích a měřících členů [27]

Samotný měřicí čep je ukázán na Obr. 36. Pro měření sil využívá své deformace, která je měřena pomocí tenzometrů zapojených do plného můstku. Principu měření sil tenzometry se dále podrobněji věnuje kapitola 2.6.



Obr. 36: Měřicí čep [31]

2.4.5. Matematický model

Pro stanovení sil a momentů v jednotlivých vazbách mezi traktorem a strojem byl vyvinut matematický model, který zohledňuje rozměry a hmotnost samotného dynamometru. Je také brán zřetel na provozní podmínky, kde bude traktor se strojem pracovat, a proto je možné dynamometr opatřit sklonoměry pro kompenzaci účinků vlivem sklonu terénu. [27]

2.4.6. Koncepce dynamometru

Během vývoje nového dvourámového dynamometru se pracovalo s několika konstrukčními požadavky, které zaručují dostatečné dimenzování konstrukce z hlediska mechanického namáhání a přitom nevedou k omezení některých funkcí traktoru. Mezi hlavní cíle patří: [27]

- Možnost vyhodnocení výsledné síly ve všech třech složkách dle souřadnicového systému (podélná - tahová, vertikální a boční).
- Zajistit vysokou nosnost dynamometru a možnost zatížení silami až 100 kN. Zároveň ale zaručit použití i pro středně velké traktory při minimalizaci jeho hmotnosti.
- Navrhnout dynamometr tak, aby byla zaručena vyhovující přesnost měření (3 – 5% FSO) při použití různých kategorií traktorů.
- Zachovat možnost použití vývodového hřídele (PTO shaft).
- Zajistit, aby byl použitelný pro široké spektrum traktorů a strojů.

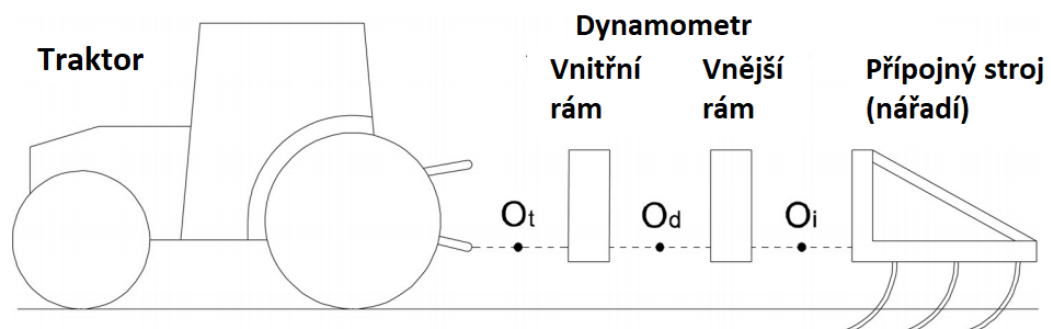
Princip dynamometru je založen na spojení dvou rámců pomocí šesti táhel, které jsou na koncích opatřené kloubovými oky. Úhly a směry táhel mezi oběma rámy zaručují, aby vznikla uzavřená smyčka a rámy se vůči sobě nepohybovaly. Na každém táhlu, které je zde deformačním prvkem, je umístěn snímač síly měřící osovou sílu v táhlu. Síla v táhlu může být tahová či tlaková podle způsobu zatížení dynamometru. Teoreticky v tomto uspořádání není ovlivněna síla v jednom táhle silami v ostatních táhlech. Zadní rám, sloužící pro připojení stroje, je uzpůsoben pro použití více kategorií. Veškeré připojovací rozměry

podléhají normě ISO 730:2009. Vzdálenosti a pozice propojovacích táhel jsou fixní, což je značnou výhodou pro kalibraci dynamometru. Mění se vždy pouze připojovací rozměry dle zvoleného stroje. [27]

2.4.7. Proces měření a matematický model dynamometru

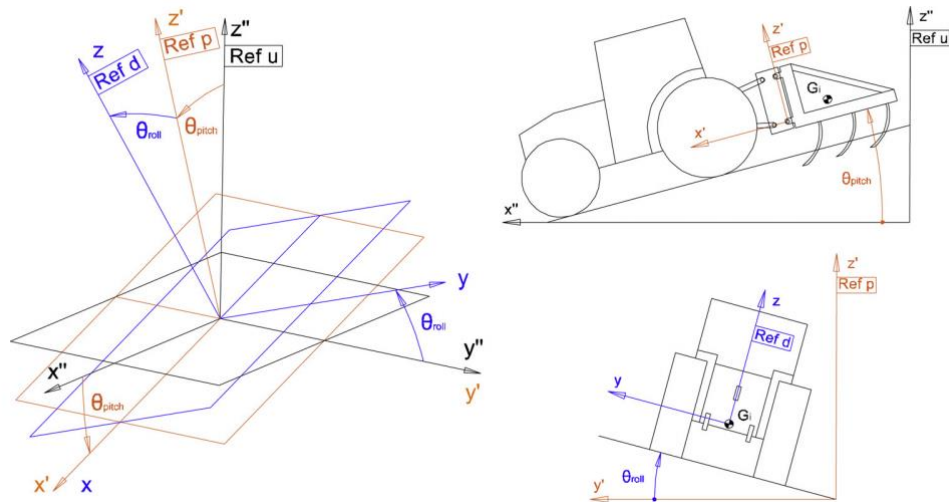
Hlavní funkcí dynamometru je určení výsledné síly ve spojení traktoru a stroje. Síly však lze vyhodnocovat i na jednotlivých táhlech mezi rámy a získané výsledky z měření mohou mít různé aplikace: [27]

- Síla a moment mezi oběma rámy dynamometru (bod O_d na Obr. 37). Jde o jednotlivé síly v táhlech dynamometru získané přímo ze snímačů. Jsou mezistupněm pro další výpočty.
- Síla a moment ve spojovacím zařízení stroje (bod O_i na Obr. 37). Jde o veličiny, hodnotící síly potřebné k řízení stroje. Jsou závislé na vlastnostech použitého stroje, vlastnostech terénu a provozních parametrech (např. pracovní hloubka, rychlost, ...)
- Síla a moment mezi traktorem a dynamometrem (bod O_t na Obr. 37). Umístění dynamometru mezi traktor a stroj mění skutečnou výslednou sílu a moment působící ve tříbodovém závěsu a je proto velmi důležité tyto silové účinky vyhodnocovat, aby mohly být nadále zkoumány odhadované síly na kolech traktoru pro dvě varianty a to použití stroje s nebo bez dynamometru.
- Síly působící v jednotlivých připojovacích bodech. Tyto síly jsou hlavním zatížením stroje a jsou důležité především pro jeho návrh, optimalizaci nebo dimenzování.



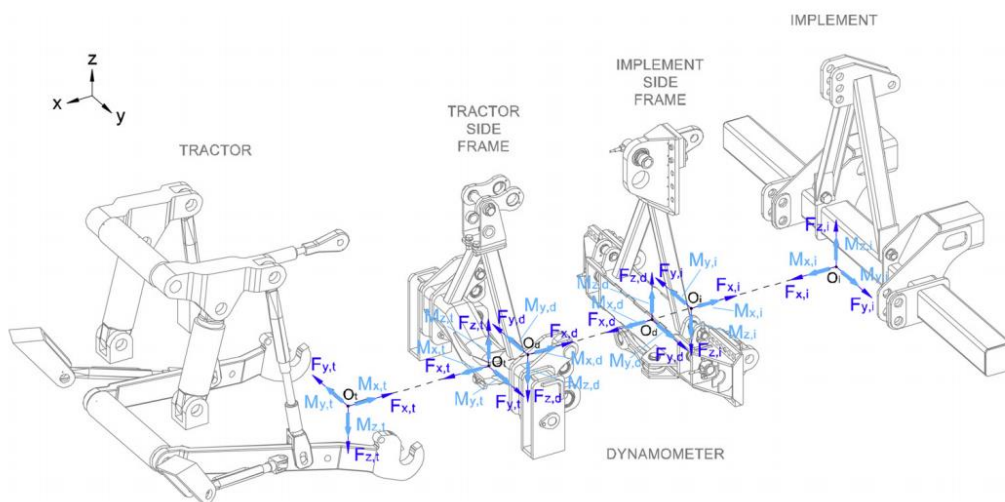
Obr. 37: Schématické znázornění jednotlivých částí měřící soustavy [27]

Vztah mezi výslednou silou a výsledným momentem na jednotlivých táhlech dynamometru závisí na geometrii rámců a jejich hmotnosti. Dále závisí na sklonu terénu, kde traktor pracuje. Do dynamometru jsou proto aplikovány dva inklinometry měřící vliv sklonu terénu na výsledný silový účinek. Zaznamenává se sklon terénu v rovině rovnoběžné s příčnou osou traktoru (boční náklon) a v rovině rovnoběžné s podélnou osou traktoru (stoupání či klesání). Výsledkem jsou dva úhly kolmé na jednotlivé roviny, odchylovající se od referenční roviny, resp. přímky (Ref_u na Obr. 38) soustavy traktoru a stroje, jelikož během provozu mají stejný náklon. [27]



Obr. 38: Znárodnění jednotlivých rovin náklonu [27]

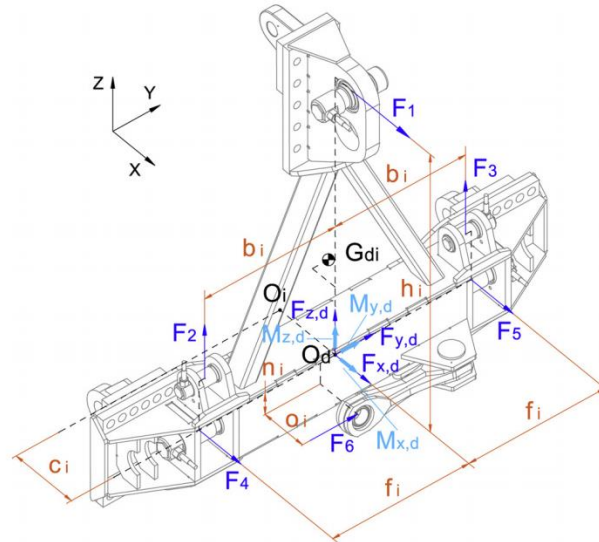
Na Obr. 39 jsou uvedeny všechny výsledné silové účinky vznikající v soustavě, která je tvořena traktorem, oběma rámy dynamometru a strojem.



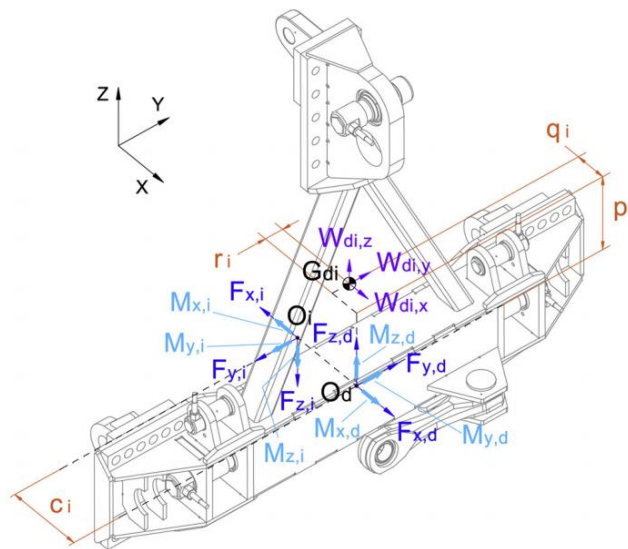
Obr. 39: Hlavní části měřicího systému a výsledné silové účinky mezi nimi [27]

2.4.8. Výpočet výsledných silových a momentových účinků

Při výpočtu jednotlivých složek sil a momentů, které vznikají mezi rámy dynamometru (viz. bod O_d na Obr. 37), vycházíme z metody uvolnění, kdy jednotlivé vazby mezi rámy nahradíme silovými účinky. Uvolnění a jednotlivé silové účinky jsou patrné z následujících obrázků (Obr. 40) a (Obr. 41).



Obr. 40: Vnější rám dynamometru s vyznačením sil na čepech pro táhla [27]



Obr. 41: Vnější rám s vyznačením výsledných silových a momentových účinků mezi rámy (F_d a M_d) a mezi rámem a strojem (F_i a M_i) [27]

Výsledné síly a moment vznikající mezi rámy lze rozepsat do složek podle jednotlivých os souřadnicového systému. Samotné rovnice vycházejí z rovnic statické rovnováhy k jednotlivým osám. Pro silové účinky platí vztah (1), pro momentové (2).

$$F_d = \begin{bmatrix} F_{x,d} \\ F_{y,d} \\ F_{z,d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 + F_4 + F_5 \\ F_6 \\ F_2 + F_3 \end{bmatrix} \quad [27] \quad (1)$$

$$M_d = \begin{bmatrix} M_{x,d} \\ M_{y,d} \\ M_{z,d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b_i \cdot F_2 + b_i \cdot F_3 + n_i \cdot F_6 \\ h_i \cdot F_1 \\ f_i \cdot F_4 - f_i \cdot F_5 + o_i \cdot F_6 \end{bmatrix} \quad [27] \quad (2)$$

Vztahy pro výslednou sílu (3) a moment (4) vznikající na straně stroje (bod O_i na Obr. 37) lze odvodit ze vztahu pro síly mezi rámy se zohledněním konstrukce rámu, tj. s ohledem na jeho hmotnost. Pro výslednou sílu mezi strojem a dynamometrem je potřeba stanovit tíhové síly (W_{di}) (5) vyvolané hmotností rámu, které jsou mj. závislé na provozních podmínkách (boční náklon soustavy traktoru, dynamometru a stroje a stoupání či klesání terénu)

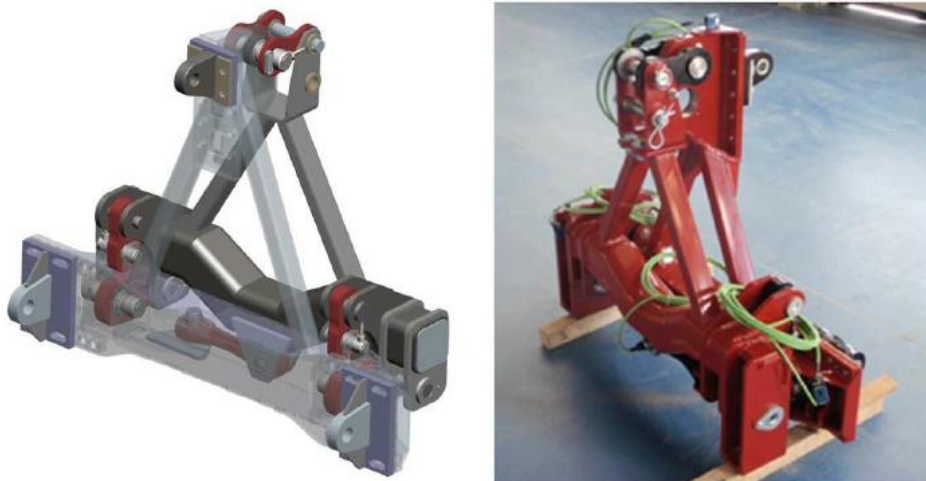
$$F_i = F_d + W_{di} \quad [27] \quad (3)$$

$$M_i = M_d + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_i \\ 0 & c_i & 0 \end{bmatrix} \cdot F_d + \begin{bmatrix} 0 & -p_i & r_i \\ p_i & 0 & -(c_i - q_i) \\ -r_i & (c_i - q_i) & 0 \end{bmatrix} \cdot W_{di} \quad [27] \quad (4)$$

$$W = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix}_{Ref t} = \begin{bmatrix} m \cdot g \cdot \sin\theta_{pitch} \\ -m \cdot g \cdot \cos\theta_{pitch} \cdot \sin\theta_{roll} \\ -m \cdot g \cdot \cos\theta_{pitch} \cdot \cos\theta_{roll} \end{bmatrix} \quad [27] \quad (5)$$

Silové účinky ve spojení traktoru a dynamometru (viz. bod O_t na Obr. 37) lze odvodit obdobným způsobem jako u předchozího případu. Pokud je na traktoru osazen dynamometr, jeho hmotnost a posunutí upínacích bodů pro stroj změní sílu a moment, které skutečně působí na traktor přes tříbodový závěs. [27]

Veškeré výše uvedené výpočty vycházejí z koncepce prototypového dvourámového dynamometru (Obr. 42), který byl pro měření zkonstruován.



Obr. 42: Prototyp popisovaného dynamometru [30]

2.5. Dynamometr TH 300

Dynamometr TH 300 (Obr. 43) svojí koncepcí vychází z modelového dynamometru popisovaného výše. Byl vyvinut Výzkumným ústavem zemědělské techniky v Praze. Konstrukce dynamometru je provedena ze dvou rámců, které jsou k sobě spojeny pomocí snímačů sil, opatřených na koncích kloubovými oky. Jako snímače síly jsou zde použity dynamometry tvořené tenzometrickým můstkem. Umístění jednotlivých snímačů tvoří uzavřenou smyčku a rámy jsou vůči sobě nepohyblivé. Oba rámy jsou zhotoveny z ocelových uzavřených profilů (jeklů), svařených do trojúhelníku. Pro zvýšení tuhosti rámců jsou v jednotlivých rozích umístěny výztuhy. Vnější rám je opatřen rychloupínacími háky, které je možné posouvat v bočním směru v závislosti na kategorii zvoleného stroje. Dynamometr disponuje měřením sil i momentů ve všech třech osách (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z), ze kterých se dopočítávají výsledné účinky. Dynamometr je dimenzovaný na sílu 10 kN ve směru tahu (F_x) a jeho použití na velkých strojích je proto omezené.



Obr. 43: Dynamometr TH 300

2.6. Měření sil pomocí tenzometrů

Tato kapitola se věnuje popisu měření sil v technické praxi. Pro měření se využívají především odporové tenzometry, které lze využívat ve dvojitě provedení. Prvním případem je měření pomocí samostatného tenzometru, kdy jej aplikujeme přímo na povrch měřené součásti. Druhým případem je zapojení více tenzometrů do tzv. můstků a jejich aplikace na příslušný deformační člen. Nyní hovoříme o tzv. dynamometrech.

2.6.1. Tenzometr

Tenzometr (Obr. 44) je pasivní elektrotechnická součástka, která je využívána pro nepřímé měření síly, resp. mechanického napětí na povrchu součásti. Měřenou veličinou je elektrický odpor, resp. jeho změna, který se mění v závislosti na deformaci tenzometru. Při

zatížení součásti osazené tenzometrem dojde k deformaci mřížky tenzometru, tj. mění se délka a průřez jednotlivých drátků, u některých materiálů dochází i ke změně měrného odporu (rezistivity). Odpor vodiče je dán rovnicí: [32] [33]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (6)$$

Podstatou tenzometrického měření je Hookův zákon, který je dán vztahem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (7)$$

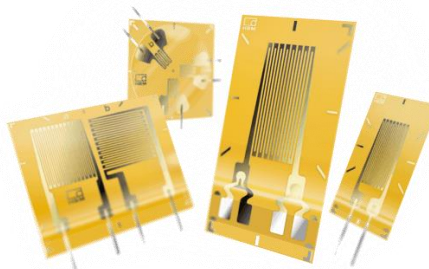
Cílem měření je nalezení závislosti mezi změnou elektrického odporu a deformace měřené součásti. Běžně používané kovové foliové tenzometry mají vodič nejčastěji z konstantanu, který má jen velmi malou změnu elektrického odporu s teplotou. Konstantan je slitina 45 % niklu a 55 % mědi. Často u měření bývá nutná teplotní kompenzace, bez ní by se tenzometr choval spíše jako snímač teploty, resp. vliv teploty na změnu elektrického odporu by byl značně vyšší, než vliv samotné deformace tenzometru. Pokud ovšem měření probíhá za konstantní teploty, kompenzovat není nutné. [32] [33]

Hledaným vztahem popisující závislost změny elektrického odporu na deformaci je:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \cdot \varepsilon \quad (8)$$

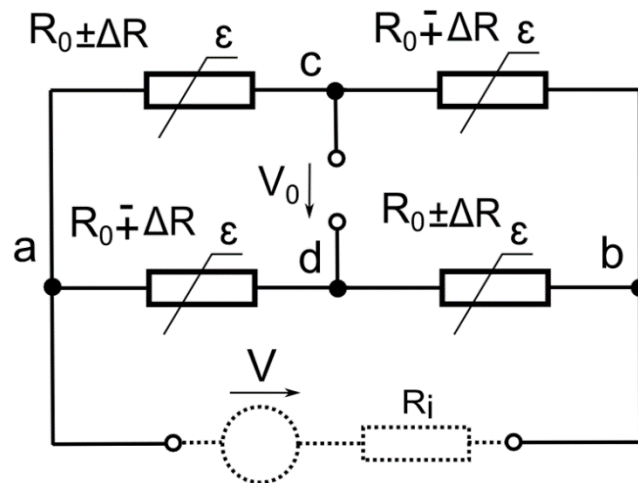
kde K je deformační citlivost tenzometru a ε poměrná deformace materiálu daná vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (9)$$



Obr. 44: Různá provedení tenzometrů [34]

Pro co nejpřesnější měření se používá více tenzometrů zapojených do tzv. můstků, nejčastěji 4 tenzometry do plného můstku (Obr. 45). Tenzometry v plném můstku jsou použity pro měření deformací a zároveň slouží k teplotní kompenzaci. Tenzometry použité pro měření sil, kterým se věnuje praktická část práce, jsou zapojeny do čtvrt můstku. [33]



Obr. 45: Zapojení tenzometrů do plného můstku [33]

2.6.2. Dynamometr

Dynamometr využívá pro měření sil tenzometry, které bývají zapojené do plného můstku. Není zde již třeba pro měření zohledňovat kompenzaci teploty, jelikož je vyřešena samotným můstkovým zapojením. Tato skutečnost má značnou výhodu oproti použití samostatného tenzometru. Naopak ale nevýhodou dynamometru je jeho nemožnost využití pro široké spektrum měření, jako klasický tenzometr. Dynamometr bývá často zkonstruován pro konkrétní aplikaci, např. dynamometr viz. (Obr. 46), slouží pro měření pouze jednoosé napjatosti – tahu nebo tlaku. Bývají napájené napětím v rozsahu přibližně 5 – 15 V, výstupním signálem může být elektrický proud nebo napětí. [33]



Obr. 46: Dynamometr pro měření tahových sil [35]

3. Praktická část bakalářské práce

Praktická část bakalářské práce se věnuje samotnému návrhu měřicího zařízení – dynamometru. Je zde popsán dynamometr jako celek, dále jeho jednotlivé části a popis měřicí metody. Pro ukázkou konkrétních částí jsou použity modely z programu Autodesk Inventor, v některých případech je na ukázkou použita fotografie reálného problému.

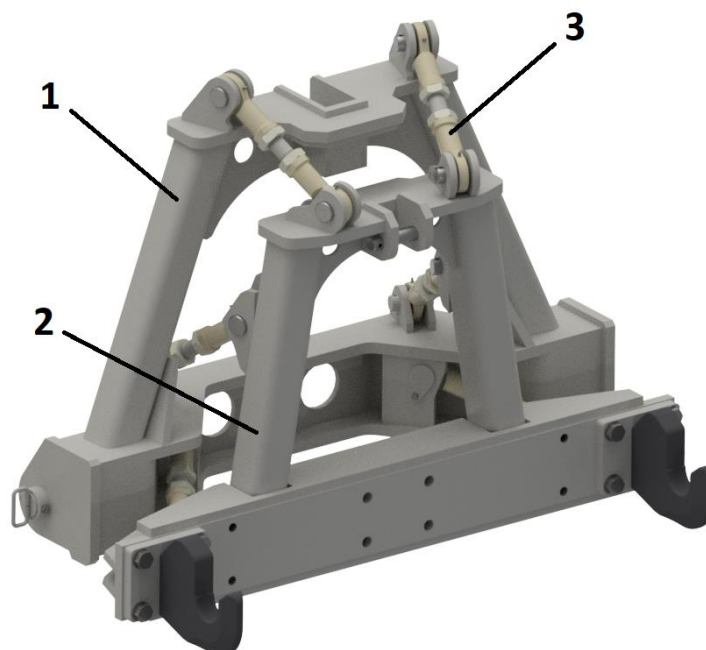
Praktická část práce je rozdělena do tří sekcí, kde první se věnuje popisu zařízení, ve druhé je ukázkou kontrolních výpočtů a v poslední části poté nalezneme výsledky pevnostní analýzy. V příloze je poté také ukázkou zkonstruovaného zařízení během testovacího provozu.

3.1. Návrh zařízení pro měření sil

Na základě poznatků vycházejících z teoretické části bylo navrženo zařízení pro měření všech tří složek sil a momentů vznikajících v tříbodovém závěsu během tažení zemědělského stroje.

3.2. Základní popis

Dynamometr svou koncepcí vychází z již uvedeného dynamometru TH 300. Základní myšlenkou jsou dva rámy tvaru rovnoramenného lichoběžníku spojené pomocí šesti prutů, které jsou zároveň deformačními prvky, a s použitím tenzometrů slouží pro měření sil v prutech prostřednictvím jejich deformací. Znázornění jednotlivých částí dynamometru je patrné z Obr. 47. Dynamometr je navržen pro použití traktorů a strojů kategorií 3 a 4.



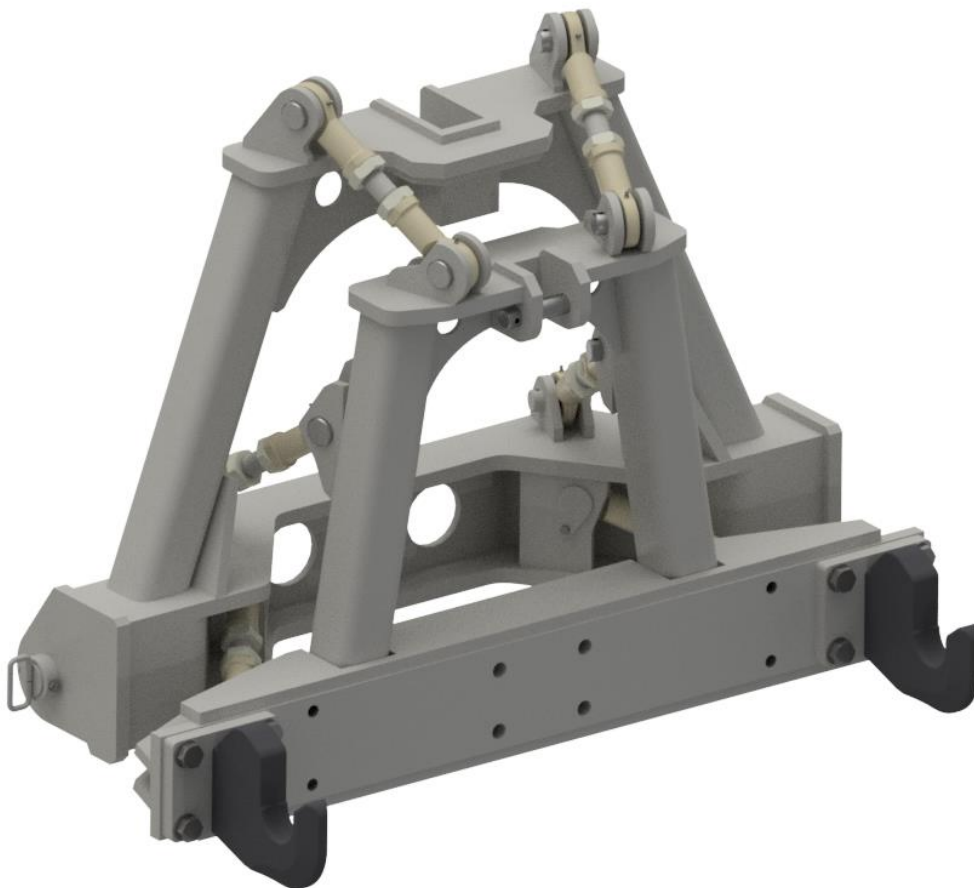
Obr. 47: Hlavní části dynamometru

1. Vnitřní rám
2. Vnější rám
3. Propojovací členy (pruty)

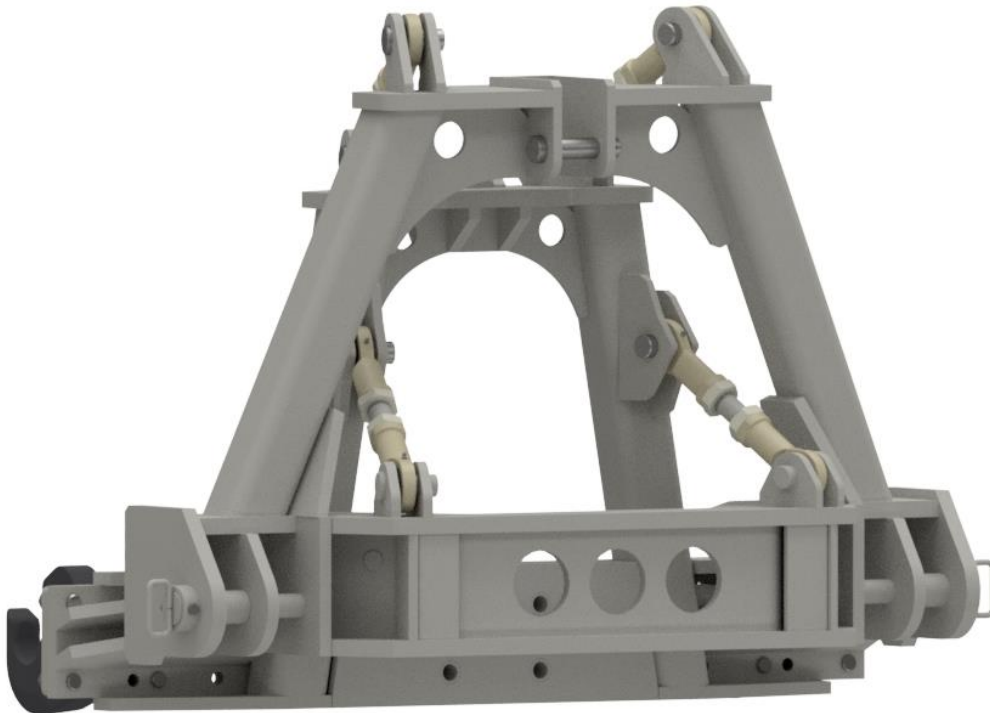
Na nový dynamometr jsou dány následující požadavky:

- Zachování koncepce TH 300 – dva rámy spojené pomocí šesti měřících elementů
- Uložení snímačů na kloubová oka z důvodu minimalizace vlivu ohybu
- Zvýšení možného zatížení ve směru tahu z 10 tun na 20 tun
- Konstrukce bude ze značné části tvořena ocelovými výpalky z oceli S355
- Minimalizace rozteče mezi rámy – co nejmenší posun přípojovacích bodů pro stroj od traktoru
- Na vnějším rámu navrhnout přípravu na montáž tažného zařízení

Sestava kompletního dynamometru je patrná z následujících obrázků.



Obr. 48: Pohled na přední stranu dynamometru



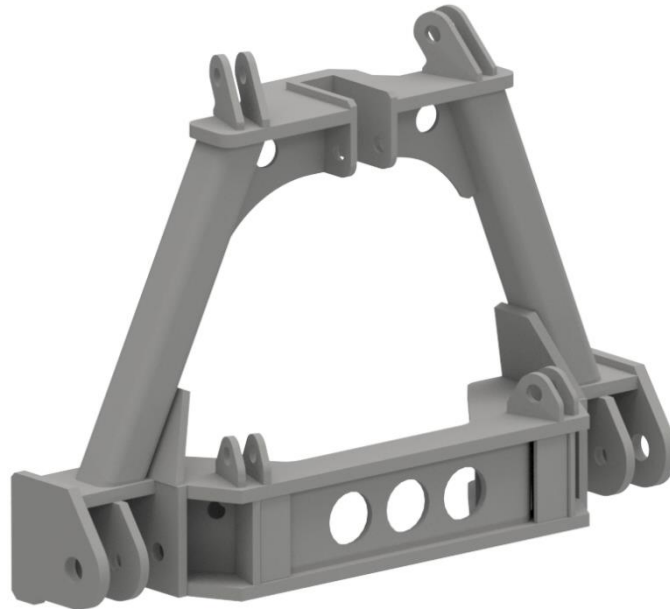
Obr. 49: Pohled na zadní stranu dynamometru

3.3. Princip měření

Zvolená metoda měření vychází z již popisované metody v teoretické části práce. Základem měření je zde táhlo (prut), které spojuje oba rámy. Táhlo je uprostřed osazeno dvěma tenzometry, které jsou zapojeny do čtvrt můstku a jejich orientace umožňuje měření tahové, resp. tlakové síly. Přínosem použití dvou tenzometrů je možnost snímání vlivu ohybu na prutu, který by ideálním případem neměl nastat, jelikož pruty jsou teoreticky namáhány pouze tahem či tlakem. Ve skutečnosti zde ale vliv ohybu je a kvůli jeho snížení jsou pruty uloženy pomocí kloubových ok. Pro stanovení výsledných sil je nejprve nutné znát síly v jednotlivých prutech. Protože jsou pruty orientovány prostorově, můžeme síly rozložit do všech tří os souřadnicového systému. Rozložením sil ve všech prutech a následným součtem do jednotlivých os, získáme výsledné zatížení do požadovaných směrů (síly v ose traktoru a stroje, boční síly, svislé síly). Jelikož nyní známe silové účinky a geometrii rámu, která je představována vzdálenostmi jednotlivých úchytných bodů na rámech, můžeme stanovit momenty k jednotlivým osám. Počátek souřadnicového systému se zvolí zhruba do středu rámu (obdobně jako na Obr. 40) a jeho osy budou sloužit jako referenční. Od těchto os se poté za pomoci modelu odečtou vzdálenosti k úchytným bodům a vypočtou výsledné momenty.

3.4. Vnitřní rám

Vnitřní rám je v sestavě dynamometru tím, který se připojuje na traktor. Je koncipován do tvaru rovnoramenného lichoběžníku. Jeho koncepce je patrná z Obr. 50 a Obr. 51. Jeho značná část je tvořena ocelovými výpalky z oceli S355, ramena lichoběžníku tvoří uzavřené silnostěnné ocelové profily (jekly) o rozměrech 100x100x10 mm.



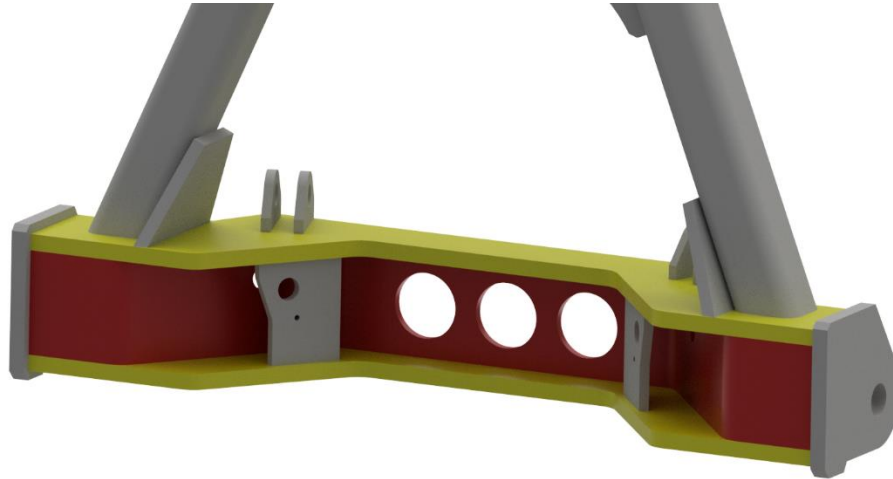
Obr. 50: Zadní strana rámu



Obr. 51: Přední strana rámu

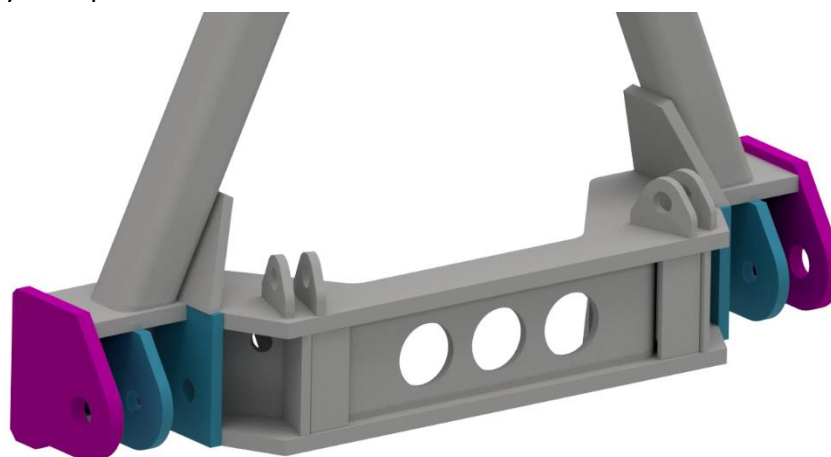
3.4.1. Základny

Základny lichoběžníku jsou tvořeny jako svařenec z výpalků z oceli S355. Spodní základnu tvoří dva hlavní nosné ocelové výpalky (Obr. 52 – žlutě značené) o tloušťce 25 mm, mezi které je navařen profilovaný plech o tloušťce 15 mm (Obr. 52 – červeně značený), opatřený třemi kruhovými otvory.



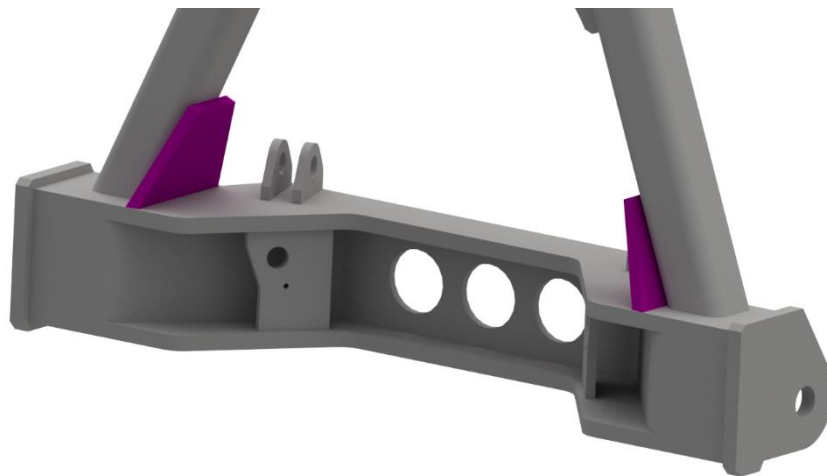
Obr. 52: Grafické znázornění jednotlivých dílů spodní základny rámu

Na bocích již zmíněných dílů spodní základny jsou navařeny výpalky o tloušťce 25 mm s otvorem o průměru 50 mm pro čep, sloužící k připojení na spodní ramena traktoru (Obr. 53 – purpurově značené). Na ně směrem do středu rámu navazují další dvě dvojice výpalků (Obr. 53 – tyrkysově značené) o tloušťce 20 mm, taktéž s otvory pro čep, tentokrát o průměru 36 mm. Toto řešení umožňuje připojení rámu na traktor kategorie 3 a 4, primárně pomocí koulí a rychloupínacích háků.



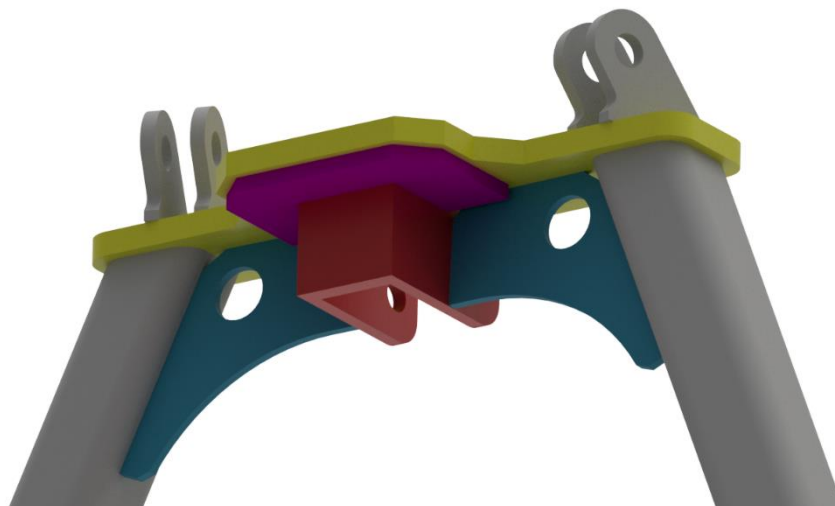
Obr. 53: Grafické znázornění úchytů pro čepy

Na spodní základnu navazují ramena, která jsou přivařena na horní výpalek spodní základny a spojení je doplňkově vyztuženo pomocí patek z plechu o tloušťce 20 mm. Toto vyztužení je patrné na Obr. 54.



Obr. 54: Grafické znázornění patek vyztužujících spoj jeklů a spodní základny

Horní základna je taktéž tvořena ocelovými výpalky z materiálu S355. Základem je díl vyobrazený na Obr. 55 (žlutě), o tloušťce 25 mm, do kterého je navařen „domeček“ ze tří výpalků (Obr. 55 – červeně značený) s otvory pro čep o průměru 32 mm. Tyto otvory slouží pro uchycení třetího bodu. Pro zvýšení tuhosti v oblasti třetího bodu je kolem „domečku“ doplněn plech (Obr. 55 - purpurově značené) o tloušťce 15 mm. Dále jsou do prostoru mezi „domeček“ a ramena lichoběžníku navařeny výztuhy z plechu o tloušťce 10 mm (Obr. 55 – tyrkysově značeno), sloužící pro zvýšení tuhosti celého rámu.



Obr. 55: Grafické znázornění jednotlivých dílů horní základny rámu

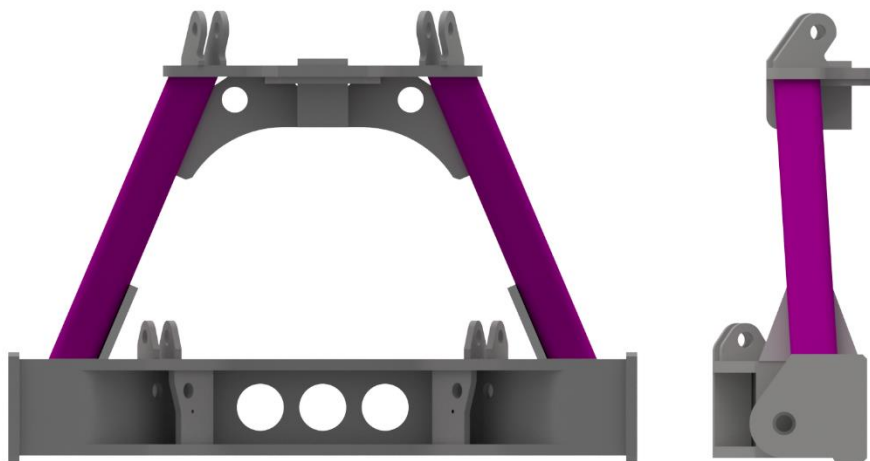
3.4.2. Ramena lichoběžníku

Ramena lichoběžníku jsou tvořena dvěma ocelovými uzavřenými čtvercovými profily (jekly) (Obr. 56) o rozměrech 100x100x10 mm z oceli S355. Ramena mezi sebou v rovině nárysu svírají úhel 45°. Z důvodu posunu horních úchytů blíže traktoru, bylo nutné ramena zaklonit v rovině půdorysu o 3,5° směrem k připojovacím bodů na traktor.



Obr. 56: Jekl tvořící rameno lichoběžníku

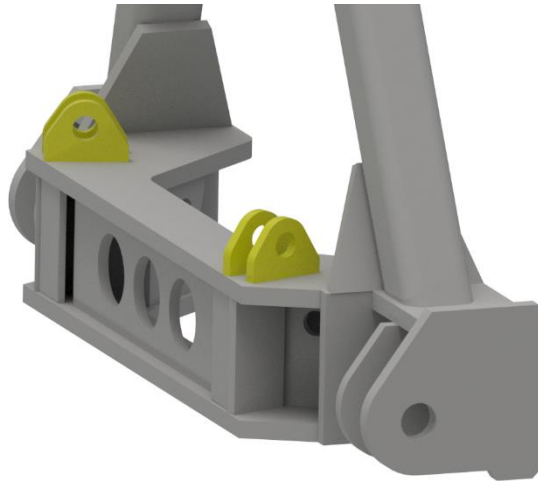
Následující vizualizace znázorňuje úhel rozevření a záklonu ramen lichoběžníku.



Obr. 57: Rozevření a záklon ramen

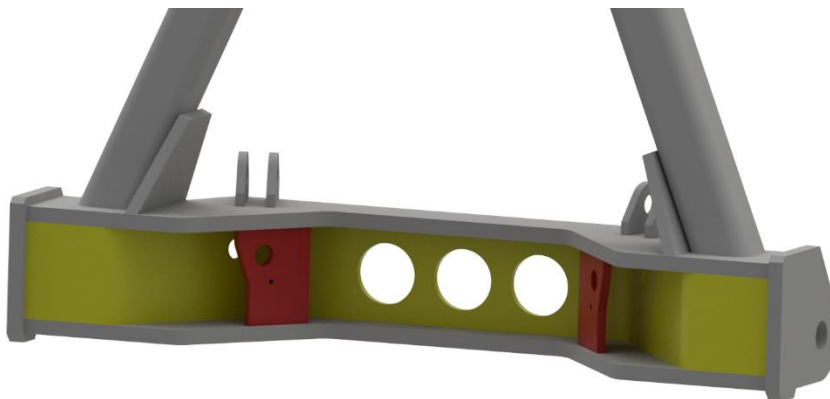
3.4.3. Úchyty

Spodní základna je kvůli požadavku na minimalizaci roztečí ráků vysunuta více do prostoru směrem k traktoru. Díky tomuto řešení bylo možné výrazně posunout úchyty pro spodní a střední propojovací pruty. V případě úchytů pro střední pruty je posunutí výrazné, a to až před připojovací body na traktor. Umístění úchytů pro střední pruty je zřejmé z Obr. 58. Dvojice úchytů mezi sebou svírají úhel 36° a směrem ven od traktoru se úhel zavírá. Připojení prutu je zajištěno prostřednictvím čepu a kloubového oka.



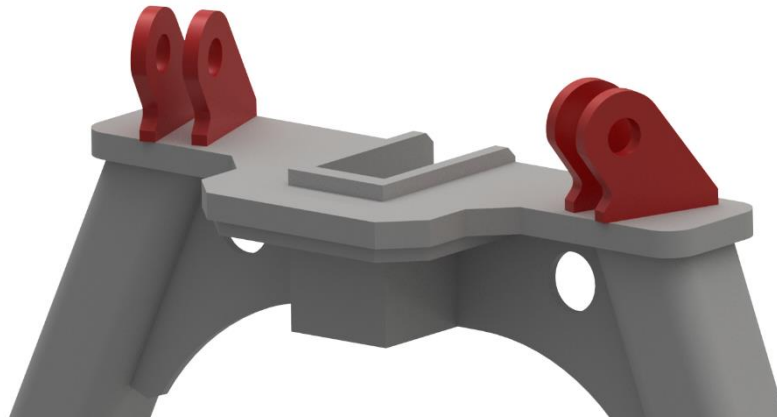
Obr. 58: Grafické znázornění úchytů pro střední pruty

Úchyty spodních prutů jsou tvořeny samotným profilovaným plechem (Obr. 59 – žlutě značený), zmíněným výše, a dále dvojicí ocelových výpalků, vyznačených na Obr. 59 červeně. Jsou vysunuty směrem dozadu k připojovacím bodům na traktor ze stejného důvodu, jako v případě výše zmíněných úchytů. Úchyty se směrem ven od traktoru rozevírají v úhlu 76° . Samotné spojení s prutem je zajištěno pomocí čepu a kloubového oka.



Obr. 59: Grafické znázornění spodních úchytů

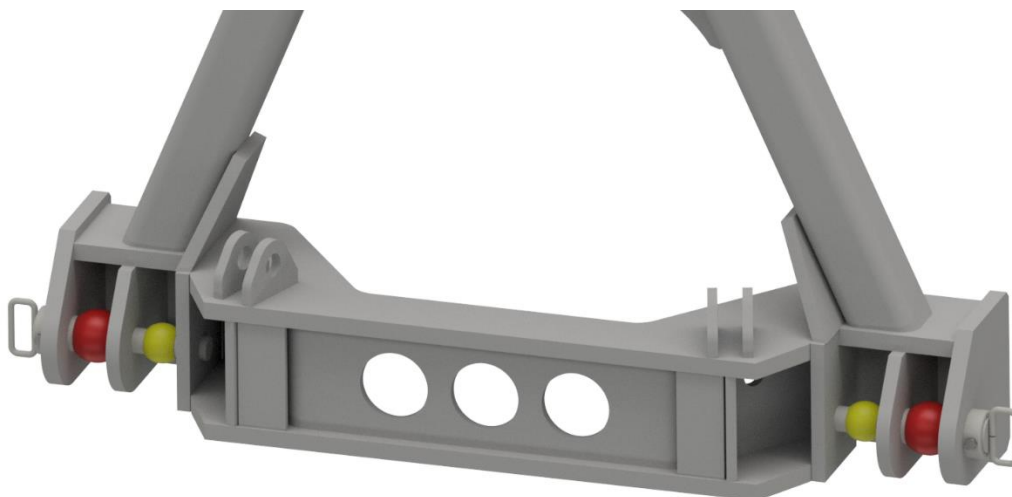
Horní úchyty jsou řešeny obdobně jako úchyty pro střední pruty, svírají stejný úhel, který se směrem ven od traktoru také zavírá. Připojení prutu je řešeno stejným způsobem, jako v předchozích variantách. Připojovací čepy prutů mají průměr 35 mm.



Obr. 60: Grafické znázornění úchytů pro horní pruty

3.4.4. Připojení na traktor

Připojení na traktor je navrženo pomocí upínacích koulí do rychloupínacích háků v případě spodních bodů. Třetí bod může být připojen také pomocí háku a koule, nebo je zde možnost použití kloubového oka a čepu. Pro možnost použití na větším spektru zemědělských strojů je možné rám připojit na traktory kategorií 3 a 4. To je zajištěno díky konstrukčnímu návrhu, kdy lze na rám osadit koule kategorií 3 a 4 zároveň. Na Obr. 61 je patrné použití koulí kategorií 3 (žluté) a 4 (červené).



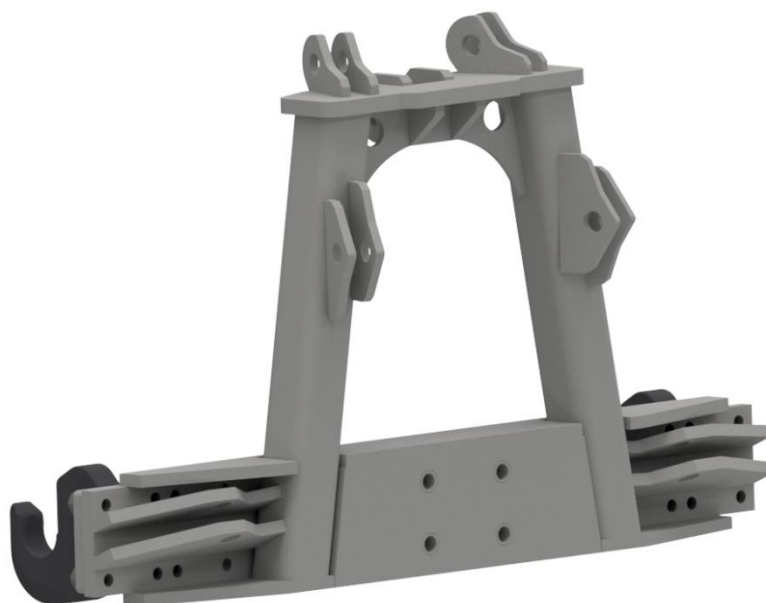
Obr. 61: Umístění koulí kategorií 3 a 4

3.5. Vnější rám

Vnější rám je v sestavě dynamometru tím, na který se později připojují zemědělské stroje. Jeho koncepce vychází z vnitřního rámu, je tvořen také rovnoramenným lichoběžníkem, ovšem na rozdíl od rámu vnitřního má přesahující spodní základnu. Převážně je tvořen také ocelovými výpalky z oceli S355, ramena lichoběžníku tvoří stejné ocelové profily jako u vnitřního rámu. Uspořádání a koncepce rámu je patrná z Obr. 62 a Obr. 63.



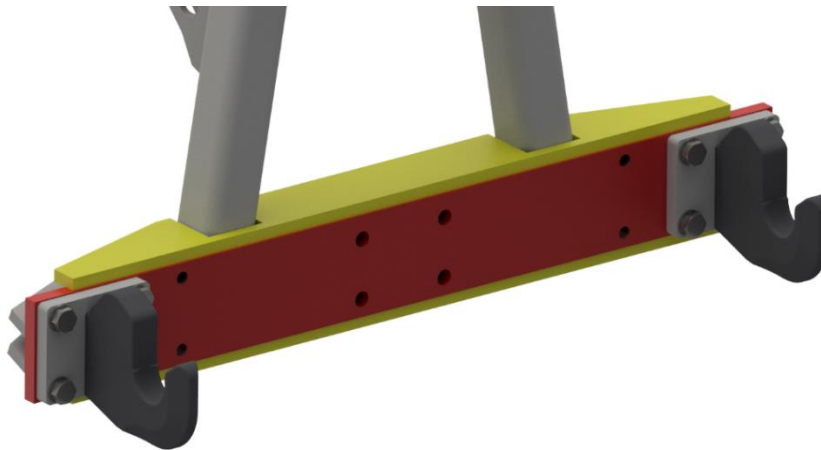
Obr. 62: Pohled na přední stranu vnějšího rámu



Obr. 63: Pohled na zadní stranu vnějšího rámu

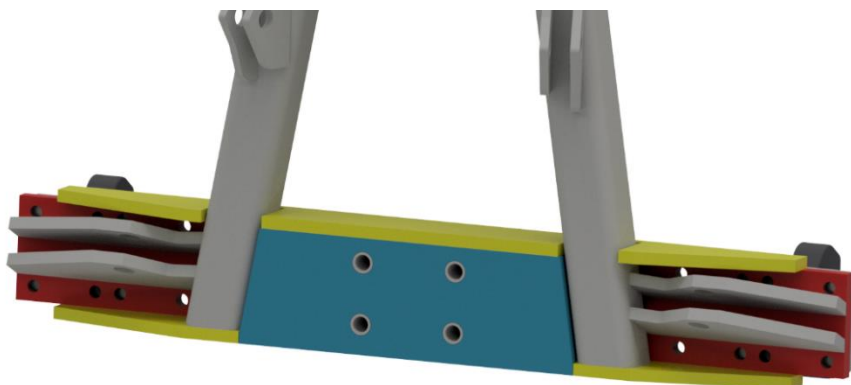
3.5.1. Základny

Stejně, jako u vnitřního rámu, jsou základny provedeny jako svařence z ocelových výpalků (ocel S355). Spodní základnu tvoří dva rovnoběžné výpalky o tloušťce 20 mm (Obr. 64 – žlutě značené), mezi které je navařen plechový pás o tloušťce 25 mm (Obr. 64 – červeně značený) sloužící zároveň jako nosná část pro rychloupínací háky a úchyty propojovacích prutů. Vertikální červeně značený nosný pás je opatřen sadou děr pro přišroubování rychloupínacích háků na ocelových podložkách podle aktuálně potřebné kategorie stroje. Je tedy možné bez větších problémů měnit rozteč spodních závěsných bodů podle kategorií 3 a 4.



Obr. 64: Grafické znázornění jednotlivých dílů spodní základny rámu

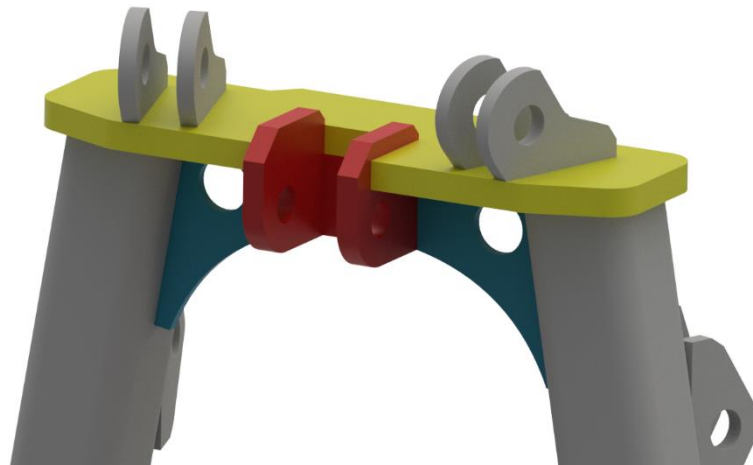
Z vnitřní strany je prostor uzavřen plechem o tloušťce 15 mm (Obr. 65 – tyrkysově značený), ve kterém jsou zároveň čtyři otvory procházející skrze celou základnu rámu a slouží pro budoucí montáž tažného zařízení.



Obr. 65: Pohled na vnitřní stranu spodní základny

Ze spodní základny dále vycházejí ramena lichoběžníku tvořená dvěma ocelovými uzavřenými profily.

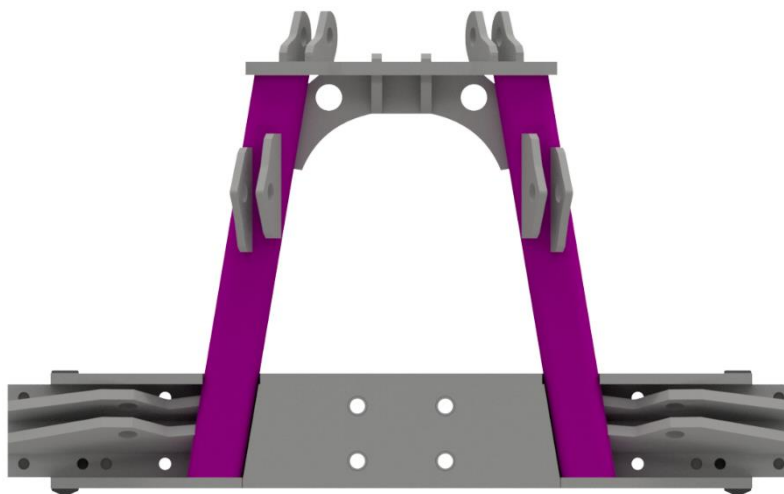
Horní základna je konstruována analogicky s horní základnou vnitřního rámu. Základ zde tvoří nosný ocelový výpalek (Obr. 66 – žlutě značený) o tloušťce 25 mm. Je do něj navařen „domeček“ pro třetí bod tvořený dvěma výpalky (Obr. 66 – červeně značený) o tloušťce 20 mm s otvorem pro čep o průměru 32 mm. Mezi tyto dva plechy je umístěn čtvercový výpalek (Obr. 66 – červeně značený) uzavírající ze zadní strany prostor pro připojení třetího bodu. Pro zvýšení tuhosti rámu jsou mezi domeček a ramena lichoběžníku navařeny ocelové výztuhy o tloušťce 10 mm (Obr. 66 – tyrkysově značené).



Obr. 66: Grafické znázornění jednotlivých dílů horní základny rámu

3.5.2. Ramena lichoběžníku

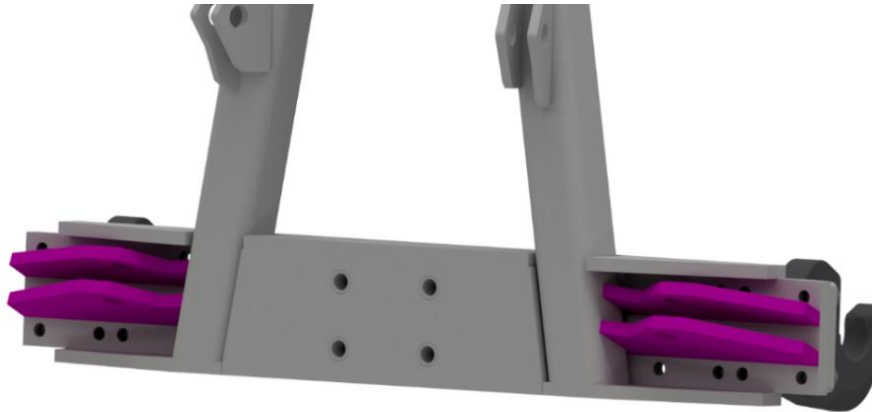
Ramena lichoběžníku (Obr. 67 – purpurově značené) jsou u vnějšího rámu tvořena stejnými uzavřenými ocelovými profily (jekly) o rozměrech 100x100x10 mm. Oproti vnitřnímu rámu zde nejsou vykloněna z roviny nárýsu. Svírají spolu úhel 19°, který se směrem od spodní základny vzhůru uzavírá.



Obr. 67: Ramena lichoběžníku

3.5.3. Úchyty

Spodní úchyty (Obr. 68 – purpurově značené) pro propojovací pruty jsou umístěné v prostoru vzniklém mezi částmi spodní základny a ocelovými profily vystupující z ní. Jedná se o výpalky z oceli S355 o tloušťce 20 mm, které jsou navařeny na nosný ocelový pás základny pod úhlem 23°. Úchyty jsou zajisté navařeny i k ocelovým profilům tvořící ramena lichoběžníku. Připojení propojovacích prutů je zajištěno skrze čep a kloubové oko o průměru 35 mm.



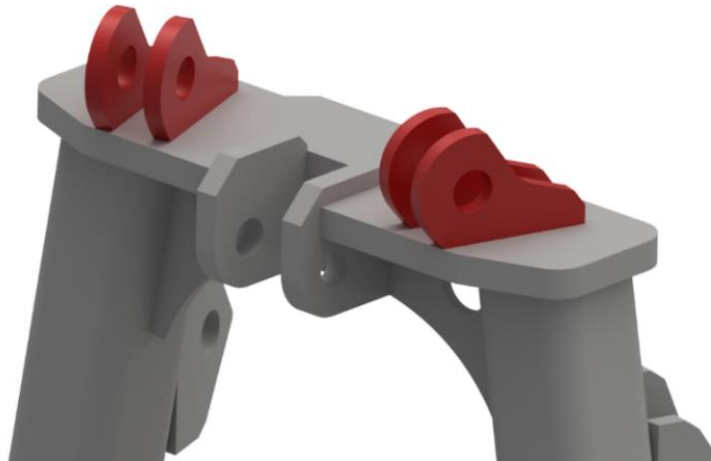
Obr. 68: Grafické znázornění spodních úchytů

Střední úchyty (Obr. 69 – žlutě značené) jsou výpalky o tloušťce 15 mm navařené na ramena lichoběžníku – uzavřené ocelové profily pod úhlem tak, že levý a pravý úchyt mezi sebou svírají úhel 36°, který se směrem dovnitř sestavy dynamometru rozevírá. Připojení prutů je stejné jako v případě spodních úchytů.



Obr. 69: Grafické znázornění středních úchytů

Horní úchyty (Obr. 70 – červeně značené) jsou zhotoveny ze stejného materiálu jako ostatní díly rámu, mají tloušťku taktéž 15 mm. Pruty se připojují obdobným způsobem jako předchozí varianty. Úchyty jsou navařeny na základový výpalek horní základny tak, že svírají stejný úhel se středními úchyty, jednotlivé úchyty na pravé a levé straně jsou tedy rovnoběžné.



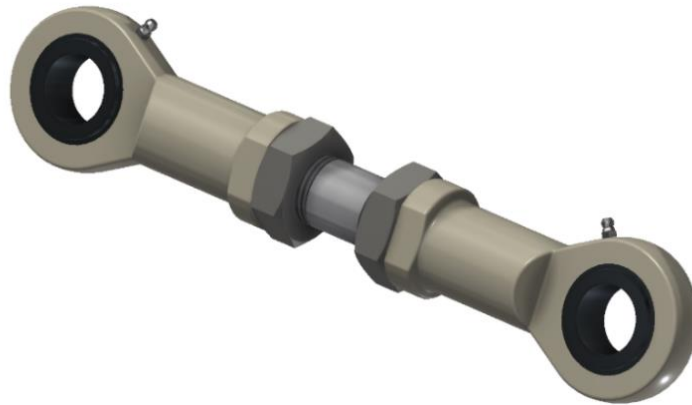
Obr. 70: Grafické znázornění horních úchyťů

3.5.4. Připojování strojů

Připojení zemědělských strojů na vnější rám je zajištěno pomocí rychloupínacích háků na dvou spodních bodech. Rozteč háků je možné podle potřeby přizpůsobit na kategorii 3 nebo 4. Třetí bod lze připojit po umístění koule také pomocí rychloupínacího háku, nebo jen pomocí čepu v případě použití kloubového oka. Prostor uvnitř rámu by měl být dostatečně velký pro použití vývodového hřídele.

3.6. Propojovací pruty

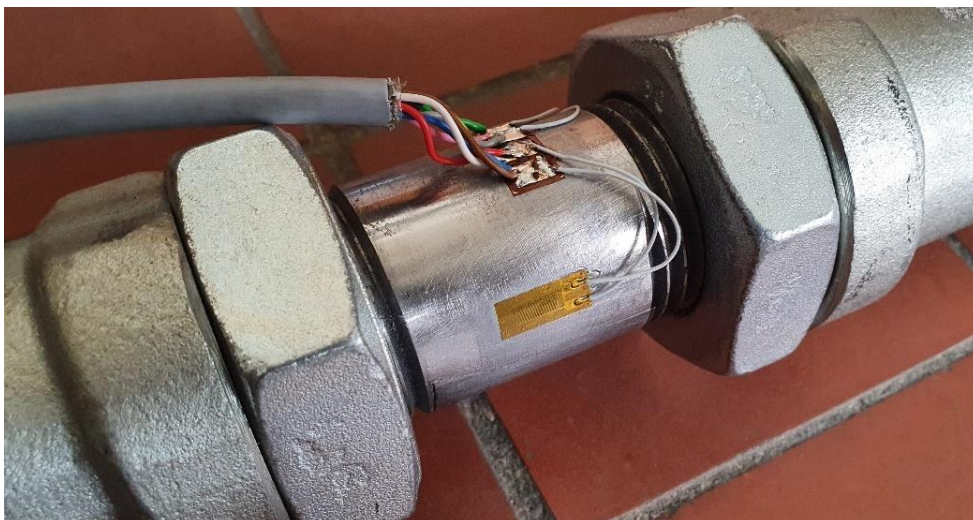
Oba rámy jsou spojené pomocí táhel (Obr. 71), která jsou tvořena dvěma kloubovými oky a svorníkem se závitem M36 na obou koncích. Jsou spojeny s rámy v jednotlivých úchytech pomocí čepů o průměru 35 mm. Svorník je navržen tak, aby na jeho povrch bylo možné instalovat tenzometr a měřit síly v táhlech prostřednictvím deformací svorníků. Díky závitovému spojení ok se svorníky je možné přizpůsobovat rozteč děr pro čepy. Pro zajištění požadované polohy jsou zde použity kontramatice. Kloubová oka a kontramatice jsou nakupovány jako normalizované díly, svorník je vyráběný. Axiální zajištění čepů v úchytech zajišťují závlačky. Pro zaručení co nejmenšího tření v kloubu oka a správné funkčnosti jsou oka opatřeny maznicemi.



Obr. 71: Propojovací táhlo

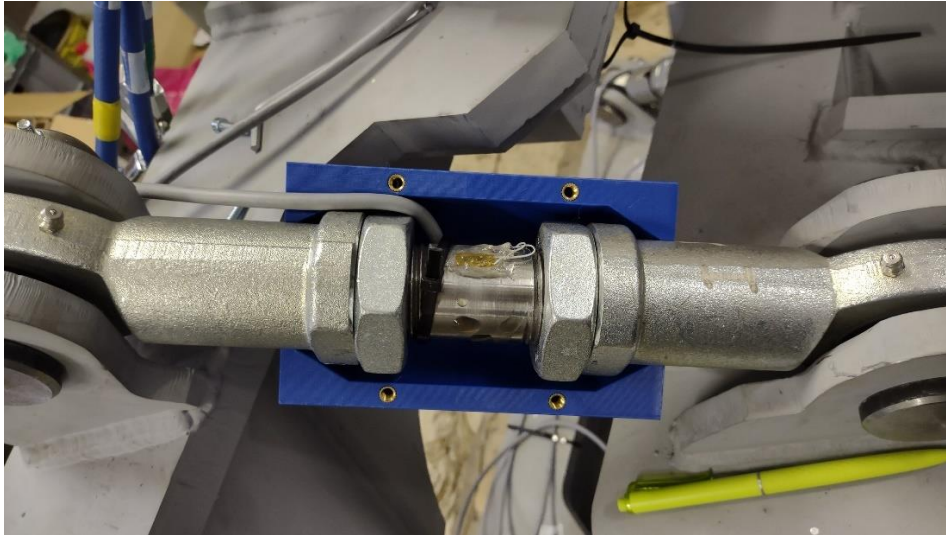
Plocha pro nalepení tenzometrů je patrná z Obr. 72. Tenzometry jsou zde umístěny dva proti sobě, čímž je zaručena kompenzace ohybu. Pro měření jsou použity fóliové odporové tenzometry typu LY41-6/120 od firmy HBM s následujícími parametry: [36]

- Nominální elektrický odpor 120 Ω
- Maximální napájecí napětí 8 V
- Rozměry měřicí mřížky: 6 x 2,7 mm
- Celkové rozměry: 13,9 x 5,9 mm
- Materiál měřicí mřížky: konstantan
- Referenční teplota 23 °C
- Rozsah teplot aplikace: -10 až 150 °C (dynamické zatěžování), -40 až 150 °C (statické zatěžování)



Obr. 72: Umístění tenzometrů

Aby byla zaručena ochrana tenzometrů před nenadálými situacemi během provozu, byl vytvořen dvoudílný kryt (Obr. 73), který po sešroubování uzavře prostor, kde je aplikován tenzometr. Vyroben byl metodou 3D tisku.



Obr. 73: Ochranný kryt tenzometrů

3.7. Ocel S355

Jako konstrukční materiál byla použita ocel S355J2. Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel. Obsahuje zhruba 0,2 % (hm.) uhlíku, čímž je zaručena svažitelnost a je proto vhodná pro použití na této konstrukci. Jak již plyne z označení, je zaručena minimální mez kluzu (R_e) $355 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ pro výrobky jmenovité tloušťky do 16 mm a $345 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ pro tloušťky od 16 mm do 40 mm. Mez pevnosti (R_m) se pak pohybuje v rozmezí 470 až $630 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ pro výrobky jmenovité tloušťky 3 až 100 mm. Minimální nárazová práce (KV) je 27 J. Z příměsí může obsahovat max. 1,6 % Mn, 0,55 % Si, 0,025 % P a 0,025 % S. [37]

4. Kontrolní výpočty

V kapitole o kontrolních výpočtech je provedena pevnostní kontrola kritických částí sestavy dynamometru. Jedná se o propojovací pruty a jejich součásti. Kontrolní výpočet prutu se bude týkat především jeho pevnosti na tah a dále měrného tlaku v závitu. Dalším krokem bude kontrola v oblasti připojení prutu na rám, tzn. kontrola čepu a stykových ploch úchytů a čepů.

Výpočty jsou provedeny při zatížení dynamometru silami 120 kN na spodních hácích. Při provozu dynamometru se počítá se zatížením tahem 15 tun, špičkově 20 tun. Při tahu 20 tun bude každý spodní hák zatížen silou přibližně 100 kN. Výpočtová síla 120 kN je zvolena tak, aby do jisté míry již zahrnovala bezpečnost a došlo k případnému mírnému předimenzování konstrukce. Síly v jednotlivých prutech jsou uvažovány z pevnostní analýzy při zatížení silami 120 kN.

4.1. Kontrola prutů

Kontrolní výpočty jsou provedeny na prutu, který vychází z pevnostní analýzy jako nejnamáhanější (viz. Kapitola 5, tab. 4 (Zatěžovací stav 1) – pruty č. 5 a 6), ostatní pruty jsou zatíženy menší osovou silou, tudíž napětí v nich bude menší, než níže vypočtené. Pruty jsou, stejně jako ostatní části dynamometru, vyrobeny z oceli S355.

4.1.1. Kontrola prutů na tah

Kontrolní výpočet prutu na tah provedeme použitím vztahu pro výpočet napětí v prutu zatíženého osovou silou.

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{N}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{155\,103}{\frac{\pi \cdot 31,093^2}{4}} = 204,27 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (10)$$

kde N [N] je vnitřní síla v prutu, A [mm²] plocha příčného průřezu prutu a d_3 [mm] malý průměr závitu

Prut pevnostně **vyhovuje**, jelikož napětí je výrazně nižší, než mez kluzu daného materiálu.

4.1.2. Kontrola měrného tlaku v závitu

Kontrolní výpočet tlaku v závitu M36 je dán podílem osově síly Q v prutu, která je v tomto případě rovna vnitřní síle N , vydělené plochou mezikruží vymezeného velkým a malým průměrem závitu. Koeficient z_ε udává počet nosných závitů a zpravidla se nevolí větší než 8. Číselná hodnota pro Q , resp. N vychází, stejně jako v předchozím případě, z tab. 4.

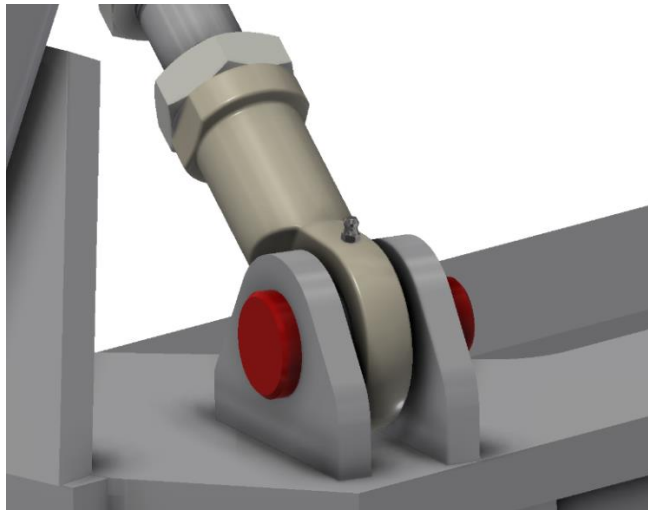
$$p = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d_3^2) \cdot z_\xi} = \frac{155\,103}{\frac{\pi}{4}(36^2 - 31,093^2) \cdot 8} = \mathbf{74,98\ MPa} \quad (11)$$

kde Q [N] je osová síla zatěžující prut, D [mm] velký průměr závitu, d_3 [mm] malý průměr závitu a z_ξ [-] počet nosných závitů.

Závity z pevnostního hlediska **nevyhovují**, jelikož tlak v závitu přesahuje dovolenou hodnotu ($p_D = 40\ MPa$ [38]).

4.2. Kontrola čepů

Kontrolní výpočty jsou provedeny na čepch (Obr. 74 – červeně značené) připojujících pruty skrze kloubová oka na rámy. Jde o čepy o průměru 35 mm a pro výpočet je analogicky, jako v případě kontrol prutů, zvolen čep připojující nejzatíženější prut k rámu.



Obr. 74: Kontrolované čepy

4.2.1. Kontrola čepu na otláčení

Výpočtový vztah pro kontrolu čepu na otláčení vychází ze základního definičního vzorce pro tlak – síla dělená plochou. Jako zatěžovací síla je zde použita osová síla v prutu (viz. Tab. 4) a plocha A_{min} je průmět válcové plochy do osové roviny. Průmět válcové plochy do osové roviny tvoří obdélník o rozměrech 35 mm x 25 mm. 35 mm je průměr čepu a 25 mm je délka, resp. výška pomyslného válce, který je představován kontaktní plochou mezi čepem a kloubovým okem.

$$p = \frac{Q}{A_{min}} = \frac{155\,103}{35 \cdot 25} = \mathbf{177,261\ MPa} \quad (12)$$

kde p [MPa] je kontaktní tlak mezi čepem a okem, Q [N] osová síla v prutu a A_{min} [mm²] průmět válcové kontaktní plochy, mezi čepem a okem, do osové roviny čepu.

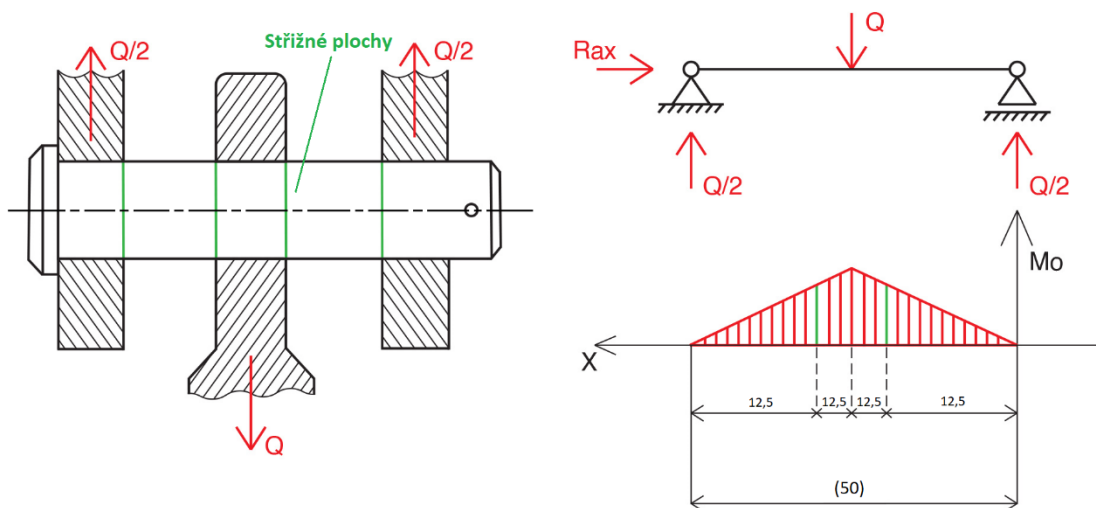
Čepy po kontrole na otláčení pevnostně **nevyhovují**, jelikož tlak ve stykových plochách překračuje dovolenou hodnotu ($p_D = 100\ MPa$ [38]).

4.2.2. Kontrola čepu na stříh a ohyb

Jelikož je čep uložen s vůlí, je nutné ho uvažovat jako nosník na dvou podporách zatížený osamělou silou a k samotnému stříhu ještě uvažovat ohyb. Protože je čep namáhán ohybem a stříhem, dochází ke kombinovanému namáhání a tak výsledné napětí bude nutné posuzovat podle příslušné pevnostní hypotézy. Z hlediska pružnosti a pevnosti je čep vyroben z houževnatého materiálu, a proto připadá v úvahu použití dvou hypotéz. Jednou je hypotéza maximálního smykového napětí (Trescova) a druhou hypotéza energetická (HMH).

4.2.2.1. Ohybový moment

Průběh ohybového momentu vyšetříme pomocí Eulerovy metody řezu na výpočtovém modelu viz. Obr. 75. Pro tento postup je nutné předem stanovit reakce proti síle Q , které určíme pomocí statických rovnic rovnováhy.



Obr. 75: Výpočtový model a průběh ohybového momentu

Statické rovnice rovnováhy

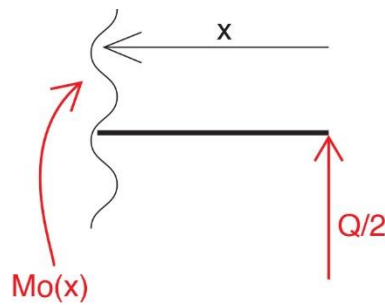
$$x: R_{Ax} = 0 \quad (13)$$

$$y: R_{Ay} + R_B - Q = 0 \quad (14)$$

$$M_A: R_B \cdot l - Q \cdot \frac{l}{2} = 0 \rightarrow R_B = \frac{Q}{2} \quad (15)$$

$$R_{Ay} = Q - R_B = \frac{Q}{2} \quad (16)$$

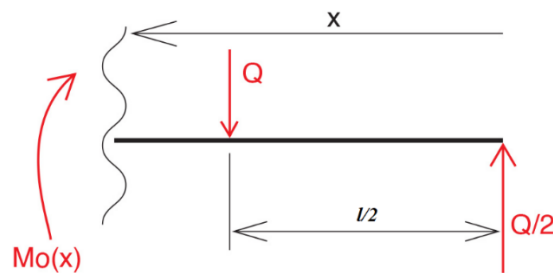
Průběh ohybového momentu v prvním poli:



Obr. 76: Ohybový moment v prvním poli

$$M_o(x) = \frac{Q}{2} \cdot x \quad (17)$$

Průběh ohybového momentu ve druhém poli:



Obr. 77: Ohybový moment ve druhém poli

$$M_o(x) = \frac{Q}{2} \cdot x - Q \cdot \left(x - \frac{l}{2}\right) \quad (18)$$

Průřezový modul v ohybu:

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 35^3}{32} = 4209,24 \text{ mm}^3 \quad (19)$$

4.2.2.2. Napětí při ohybu

Napětí vyšetřujeme na souřadnici, kde působí zároveň smykové napětí a co největší ohybový moment, tj. souřadnice druhé střižné plochy ($x = 12,5 \text{ mm}$). Na této souřadnici budeme následně také vyhodnocovat redukované napětí.

Ohybový moment na souřadnici $x = 12,5 \text{ mm}$:

$$M_o(x = 12,5 \text{ mm}) = \frac{Q}{2} \cdot x = \frac{155\,103}{2} \cdot 12,5 = 969\,393,75 \text{ Nmm} \quad (20)$$

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{969\,393,75}{4209,24} = 230,3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (21)$$

4.2.2.3. Smykové napětí

Smykové napětí vypočteme podle definičního vztahu, jako sílu působící na střížnou plochu. Zatěžovací silou je zde osová síla v prutu a plochou příčný průřez čepu.

$$\tau = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{155\,103}{\frac{\pi \cdot 35^2}{4}} = 161,21 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (22)$$

4.2.2.4. Redukované napětí

Výsledné redukované napětí na příslušné souřadnici stanovíme součtem ohybového a smykového napětí podle příslušných pevnostních hypotéz. Pro výpočet volím hypotézu energetickou (HMH) s koeficientem $\alpha = \sqrt{3}$.

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} = \sqrt{230,3^2 + (\sqrt{3} \cdot 161,21)^2} = 361,94 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (23)$$

Redukované napětí mírně přesahuje mez kluzu, tudíž čep z pevnostního hlediska **nevyhovuje**.

4.2.3. Kontrola kontaktní plochy čepu a úchyty na otláčení

Další plochou kontrolovanou na otláčení je styková plocha mezi čepem a úchytem na rámu. Postup výpočtu je stejný, jako v případě kontroly tlaku mezi čepem a okem, s rozdílem, že zde osovou sílu v prutu zachytávají dva úchyty, a proto je při výpočtu tlaku v jednom úchyty počítáno s její poloviční hodnotou.

$$p = \frac{\frac{Q}{2}}{A_{min}} = \frac{\frac{155\,103}{2}}{35 \cdot 15} = 147,717 \text{ MPa} \quad (24)$$

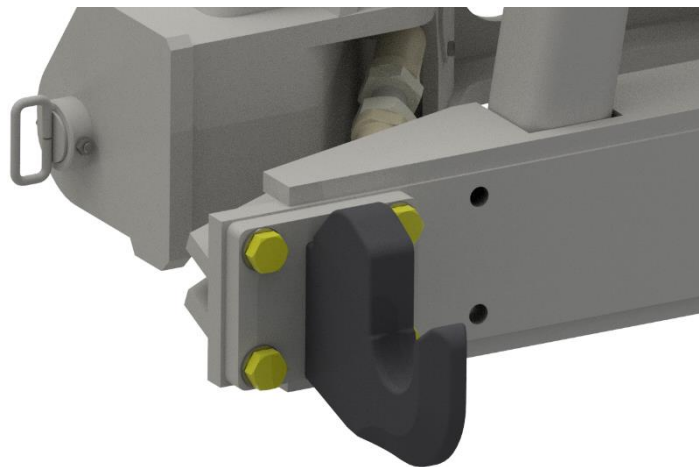
Plochy po kontrole na otláčení pevnostně **nevyhovují**, jelikož tlak ve stykových plochách překračuje dovolenou hodnotu ($p_D = 100 \text{ MPa}$ [38]).

4.2.4. Zhodnocení výsledků

Výpočtem bylo zjištěno, že většina výsledků překračuje dovolené hodnoty a součásti z pevnostního hlediska nevyhovují. Nyní bychom mohli brát v potaz, že bylo počítáno s vyšší zatěžovací silou, než na kterou by měl být dynamometr konstruován. Pro zajištění požadované funkčnosti a živostnosti zařízení by ale při výrobě dalšího prototypu bylo zapotřebí vzít tyto výsledky v potaz a kontrolované součásti dimenzovat na vyšší zatížení. Šlo by především o použití čepů o větším průměru, případně zvolení vhodného materiálu, aby bylo možné kontaktní plochy vytvrdit. Zvětšením čepů by vyvstala nutnost použití větších kloubových ok. Změnou kloubových ok by došlo i ke změně úchyty, které by bylo vhodné vyrobit z plechu o vyšší tloušťce, aby se zvětšila kontaktní plocha a poklesl tlak ve stykových plochách.

4.3. Kontrola šroubů

Oba spodní připojovací body – rychloupínací háky, jsou přivařeny koutovými svary na nosné desky, které jsou přišroubovány na spodní základnu vnějšího rámu pomocí čtyř šroubů (Obr. 78 – žlutě značené) se závitem M24, pevnostní třídy 10.9. Maximální zatížení na hák dle pevnostní analýzy je 120 kN ve vodorovném směru. Uvažujme, že v ideálním případě se síla rovnoměrně roznese do všech čtyř šroubů. Každý šroub tak bude zatížen silou 30 kN v osové směru, která vyvolá tah. Uťahovací moment šroubu volím 250 Nm (250 000 Nmm). Dále je nutné uvažovat smykové napětí, které je vneseno do šroubu vlivem jeho utahování. Výsledné napětí poté stanovíme jako kombinaci tahu a smyku podle příslušné pevnostní hypotézy.



Obr. 78: Kontrolované šrouby

4.3.1. Stanovení osové síly

Osovou sílu ve šroubu vzniklou vlivem předpětí stanovíme ze vztahu mezi uťahovacím momentem a osovou silou. Nejprve bude nutné vypočítat potřebné parametry závitu, tj. úhel stoupání a třecí úhel.

Úhel stoupání

Pro závit M24 s hrubou roztečí (3 mm) je $d_2 = 22,051 \text{ mm}$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{i \cdot P}{\pi \cdot d_2} \Rightarrow \gamma = \operatorname{arctg} \left(\frac{1 \cdot 3}{\pi \cdot 22,051} \right) = 2,48^\circ \quad (25)$$

Úhel boku

$$\beta = 30^\circ \text{ pro metrický závit}$$

$$\operatorname{tg} \beta_n = \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \gamma \quad (26)$$

$$\beta_n = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}(30^\circ) \cdot \cos(2,48^\circ)) = 29,98^\circ \quad (27)$$

Třecí úhel

$$\operatorname{tg} \varphi' = f' = \frac{f}{\cos \beta_n} = \frac{0,14}{\cos (29,98^\circ)} = \mathbf{0,162} \quad (28)$$

$$\varphi' = \operatorname{arctg}(0,162) = \mathbf{9,2^\circ}$$

kde $f[-]$ je součinitel tření, který má pro ocel – ocel hodnotu 0,14

Osová síla

$$M_{kš} = F_o \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') \rightarrow F_o = \frac{2 \cdot M_{kš}}{d_2 \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi')} = \frac{2 \cdot 250\,000}{22,051 \cdot \operatorname{tg}(2,48^\circ + 9,2^\circ)} \quad (29)$$

$$= \mathbf{109\,684,82\,N}$$

4.3.2. Kontrola měrného tlaku v závitu

Jelikož šrouby, držící nosnou desku s rychloupínacím hákem, nejsou ke spodní základně vnějšího rámu přichyceny pomocí matice, ale jsou zašroubovány přímo do ní, bude potřeba počet nosných závitů stanovit dle následujícího vztahu:

$$z_{\check{c}} = \frac{h}{P} = \frac{25}{3} = 8,333 \quad (30)$$

kde h [mm] je z definice výška matice, v tomto případě jde ale o tloušťku materiálu a P [mm] rozteč.

Výpočtem bylo ověřeno, že počet nosných závitů není menší než 8 a je proto možné s tímto koeficientem počítat při kontrole měrného tlaku v závitu.

Zatěžovací síla při výpočtu tlaku v závitu je dána součtem síly vzniklé vlivem utažení šroubu F_o a vnější zatěžovací síly od háku Q .

$$p = \frac{Q + F_o}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d_3^2) \cdot z_{\check{c}}} = \frac{30\,000 + 109\,684,52}{\frac{\pi}{4}(24^2 - 20,319^2) \cdot 8} = \mathbf{136,27\,MPa} \quad (31)$$

Závity z pevnostního hlediska **nevyhovují**, jelikož tlak v závitu přesahuje dovolenou hodnotu ($p_D = 40\,MPa$ [38]).

4.3.3. Normálové napětí

Napětí ve dřívku šroubu vypočteme ze základního definičního vztahu pro prut namáhaný osovou silou. Vnitřní síla v prutu je dána součtem zatěžovací síly Q a osově síly F_o od utažení šroubu.

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{Q + F_o}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{30\,000 + 109\,684,52}{\frac{\pi \cdot 20,319^2}{4}} = \mathbf{430,78\,N \cdot mm^{-2}} \quad (32)$$

4.3.4. Smykové napětí

Pro výpočet smykového napětí je zapotřebí nejprve stanovit průřezový modul v krutu.

Průřezový modul v krutu

$$W_k = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16} = \frac{\pi \cdot 20,319^3}{16} = 1647,16 \text{ mm}^3 \quad (33)$$

Smykové napětí

$$\tau = \frac{M_{kš}}{W_k} = \frac{109\,684,82}{1647,16} = 66,59 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (34)$$

4.3.5. Redukované napětí

Výsledné redukované napětí stanovíme složením smykového a normálového napětí podle příslušné pevnostní hypotézy. Pro výpočet volím hypotézu energetickou (HMH) s koeficientem $\alpha = \sqrt{3}$.

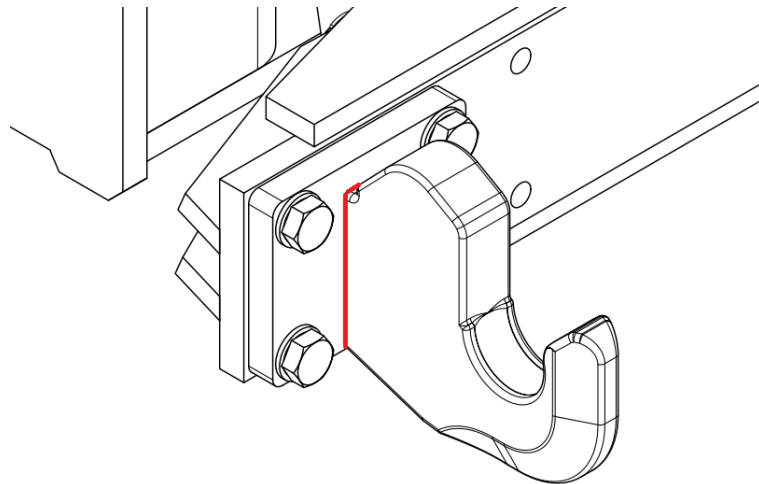
$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + \alpha^2 \cdot \tau^2} = \sqrt{430,78^2 + 3 \cdot 66,59^2} = 445,95 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (35)$$

Hodnota redukovaného napětí se pohybuje v bezpečných mezích vůči mezi kluzu, která je pro šroub M24 pevnostní třídy 10.9 $900 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Šroub tedy po pevnostní stránce **vyhovuje**.

4.4. Kontrola koutových svarů

Pevnostní kontrola je provedena na koutových svarech o tloušťce $a = 10,5 \text{ mm}$ a šířce $z = 15 \text{ mm}$, kterými jsou přivařeny rychloupínací závěsné háky na nosné desky. Kontrolní výpočet je proveden pro zatížení tahem silou 120 kN na základě dat zadávaných do pevnostní analýzy (viz. data Kap. 5, Tab. 4).

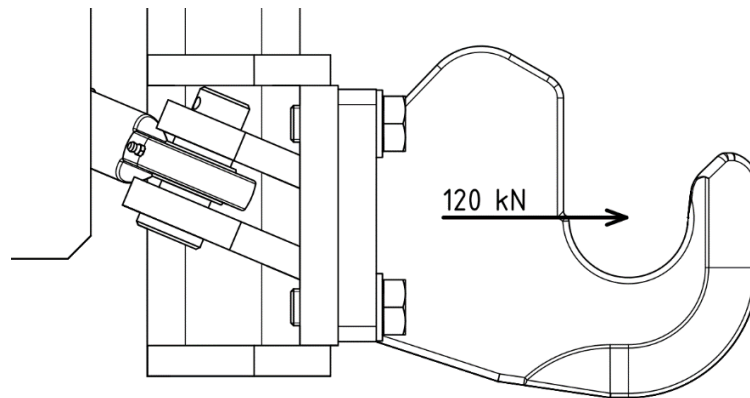
Umístění koutového svaru je patrné z Obr. 79. Červeně je zde vyznačen kout mezi plochou háku a nosnou deskou, ve kterém je umístěn svár.



Obr. 79: Umístění koutového svaru

4.4.1. Kontrola při namáhání tahem

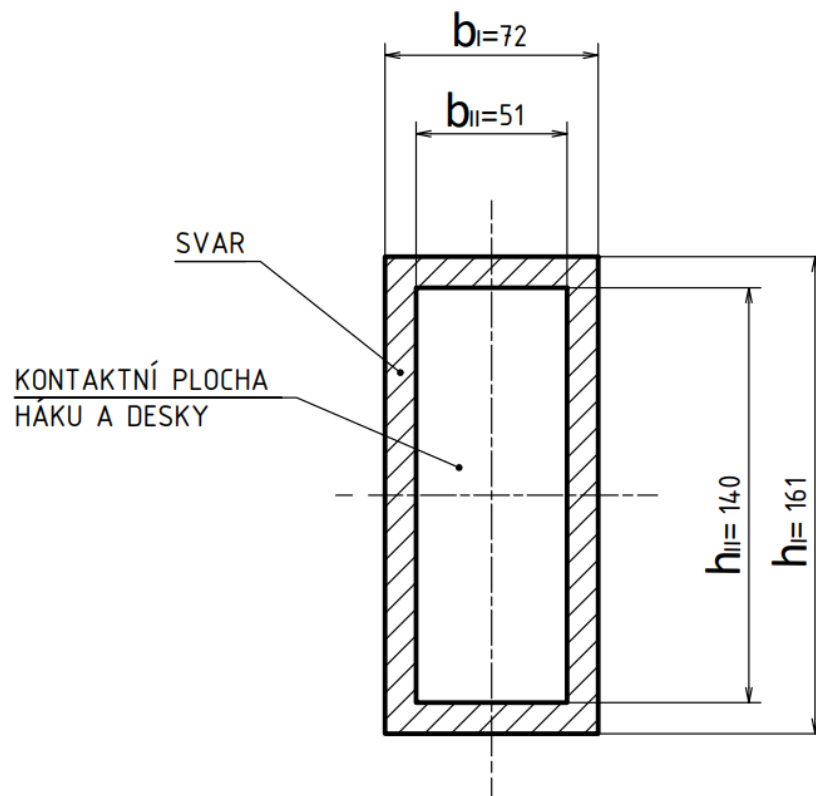
Koutový svar o tloušťce 10,5 mm je namáhán tahem silou 120 kN působící horizontálně směrem od rámu dynamometru. Za působíště síly je považován střed připojovací koule na daném stroji, která po jeho připojení zapadne do kulové plochy v závěsném háku (Obr. 80). Hodnoty dosazované za plochu A získáme z Obr. 81.



Obr. 80: Závěsný hák zatížený tahem

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{120\,000}{(161 \cdot 72) - (140 \cdot 51)} = 26,95 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (36)$$

Koutový svar namáhaný tahem 120 kN z pevnostního hlediska **vyhovuje**, jelikož vypočtené napětí nepřesahuje dovolenou hodnotu ($\sigma_D = 120 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$).

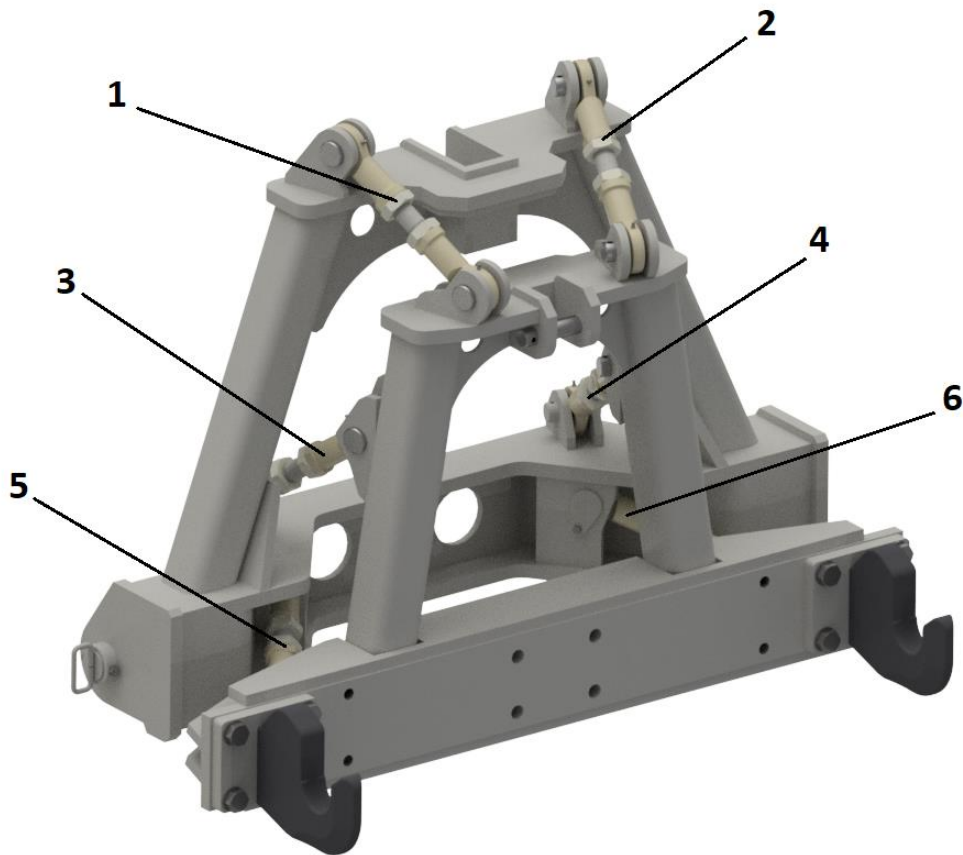


Obr. 81: Šrafovaná plocha představuje plochu svaru

5. Pevnostní analýza

Na základě požadavku v zadání bakalářské práce byla na finálním modelu provedena pevnostní analýza metodou konečných prvků v programu RFEM od společnosti DLUBAL.

Samotná pevnostní analýza představuje simulaci zatížení během provozu dynamometru. Proto byly vytvořeny 2 zatěžovací stavy simulující zátěžové situace během provozu. Výsledkem pevnostní analýzy jsou vnitřní síly v jednotlivých prutech, které dále slouží jako podklady pro další kontrolní výpočty. Dalším výstupem analýzy jsou deformace jednotlivých prutů. Na následujícím obrázku (Obr. 82) je patrné číselné značení jednotlivých prutů.



Obr. 82: Číselné značení prutů

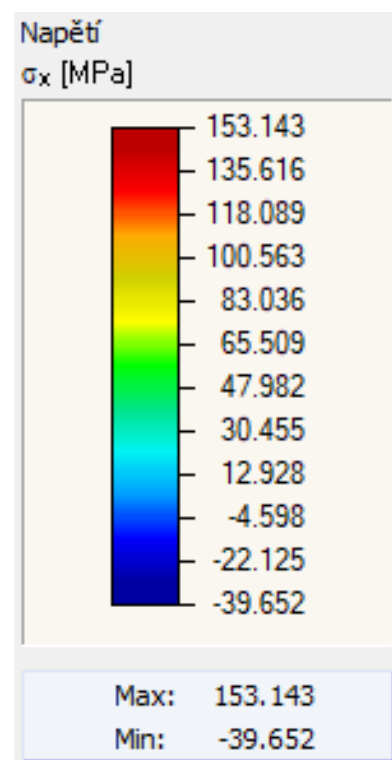
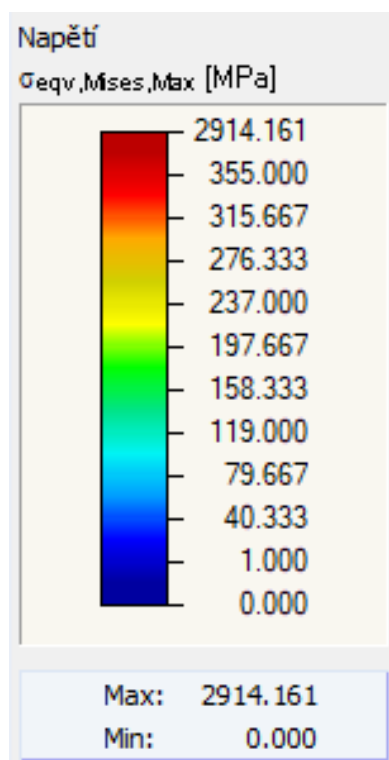
5.1. Zatěžovací stav 1 (ZS1)

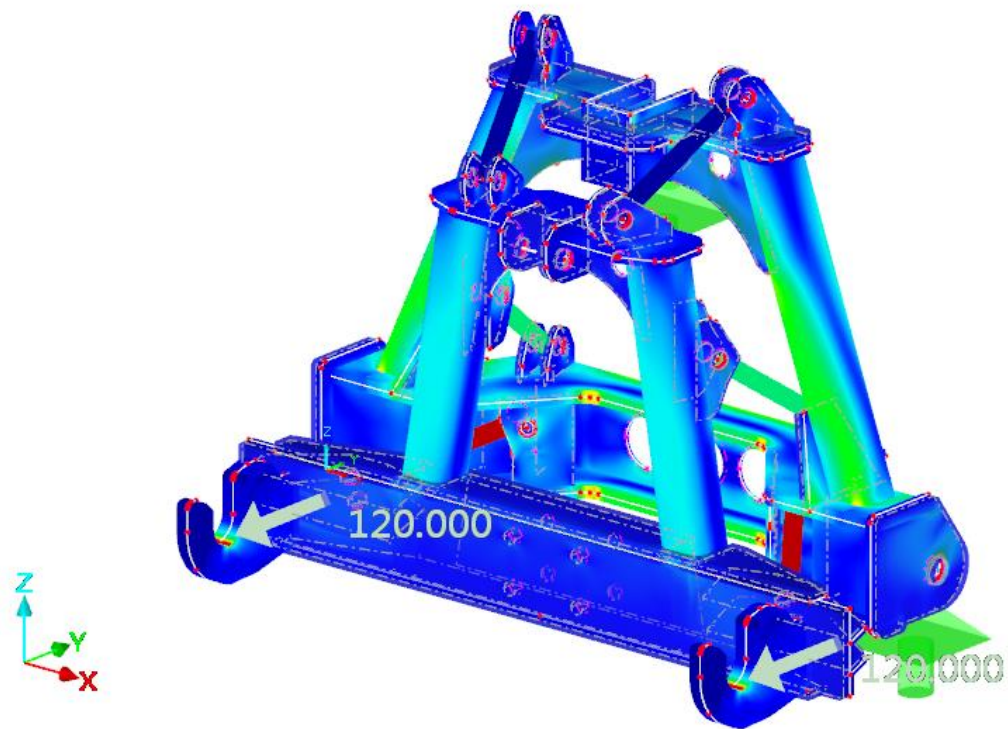
Zatěžovací stav 1 představuje zatížení dvěma osamělými silami o velikosti 120 kN na oba spodní připojovací body (háky). Toto zatížení je realizováno ve směru osy x a součet obou sil do této osy je 240 kN.

Zatěžovací stav 1					
Způsob zatížení:					
Spodní háky	horizontálně	120 kN			
	vertikálně	-			
Třetí bod	horizontálně	-			
	vertikálně	-			
Výsledky pevnostní analýzy					
Pruty					
1	2	3	4	5	6
Síly v prutech [kN]					
-40,16	-40,16	43,013	43,014	155,103	155,103
Prodloužení prutů [mm]					
-0,2	-0,2	1,2	1,2	0,4	0,5

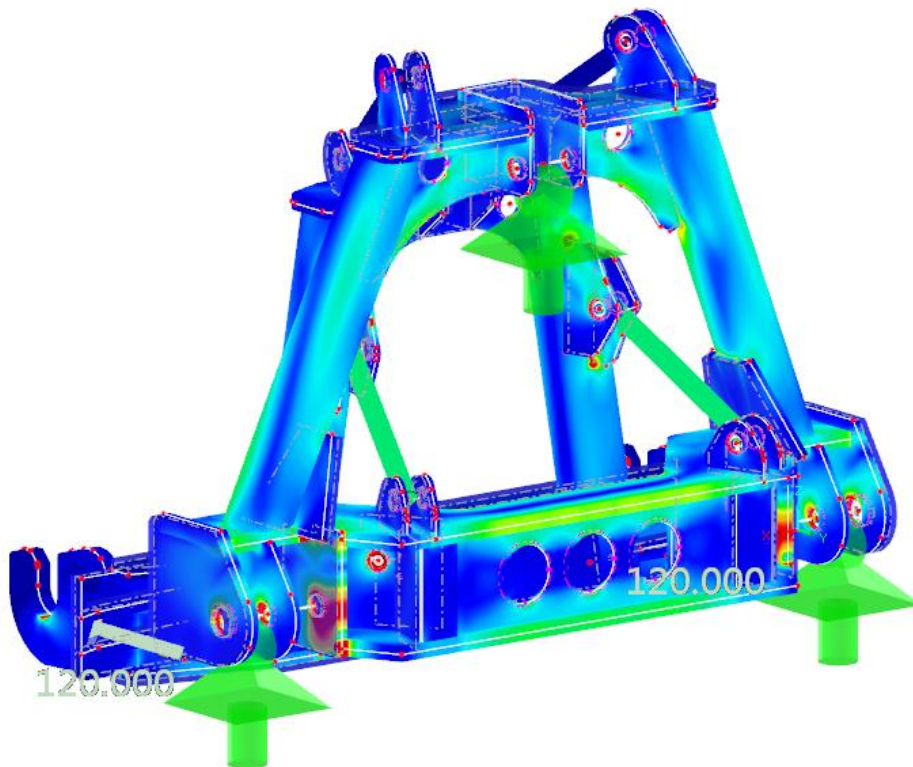
Tab. 4: Zatěžovací stav 1

Stupnice napětí pro ZS1 (vlevo pro plochy, vpravo pro pruty)

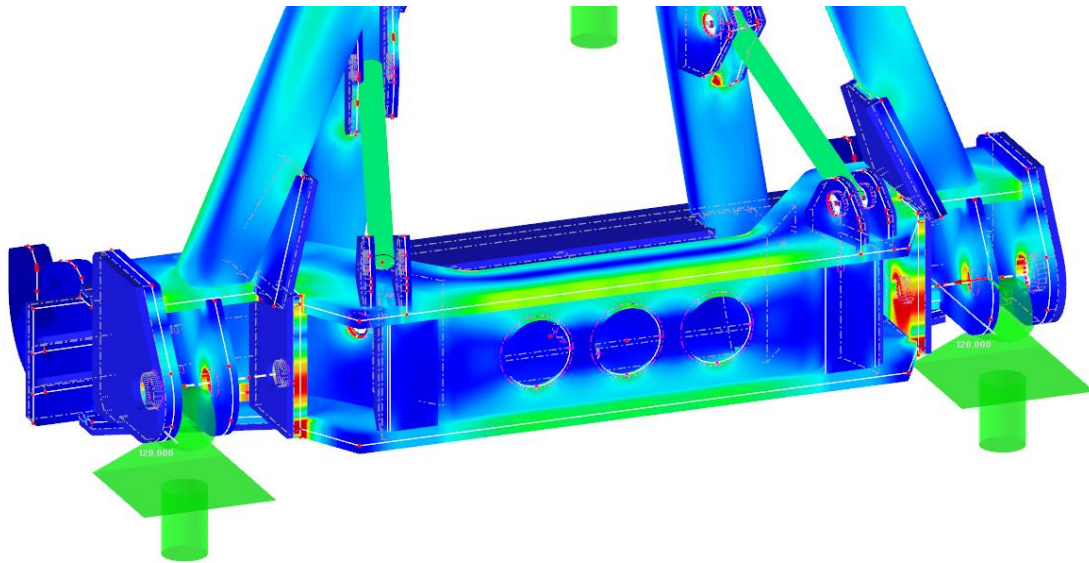




Obr. 83: Pohled na rozložení napětí (ZS1)



Obr. 84: Pohled na rozložení napětí v zadní části (ZS1)



Obr. 85: Pohled na rozložení napětí v oblasti připojovacích bodů (ZS1)

Z výsledků pevnostní analýzy je patrné, že rámy a pruty se deformují téměř symetricky. Totéž platí i o rozložení napětí v jednotlivých částech rámu. Tento výsledek byl očekáván, jelikož i zatížení je symetrické (oba spodní háky 120 kN). Za nejvíce namáhanou oblast lze považovat dolní připojovací body na traktor, kde se hodnota napětí blíží mezi kluzu. Pro snížení napětí v této oblasti byla navržena úprava, která je popsána v Kapitole 5.3. Napětí v ostatních částech rámu se pohybuje v rozmezí zhruba 40 až 200 N·mm⁻², což lze považovat za bezpečné hodnoty.

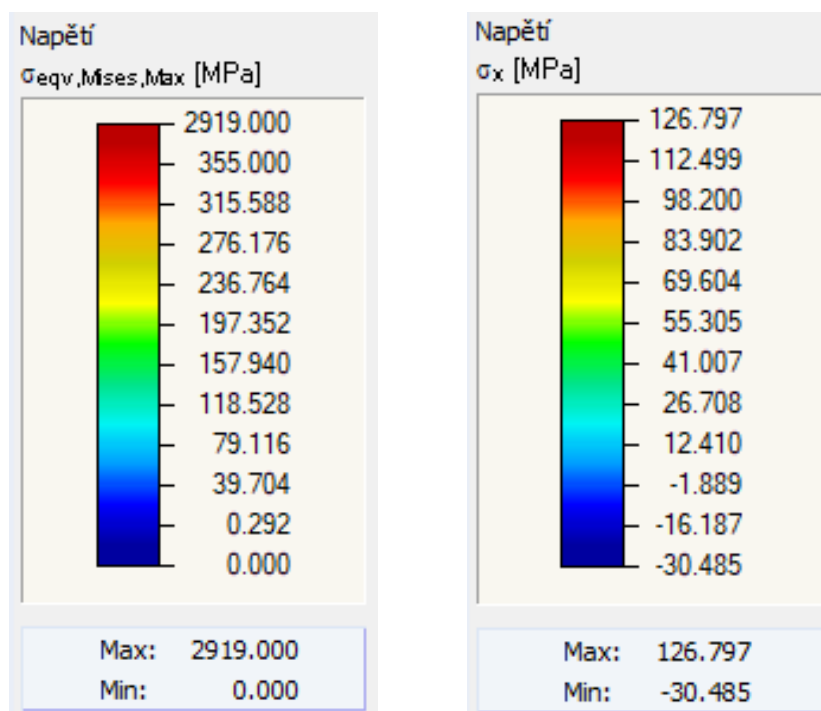
5.2. Zatěžovací stav 2 (ZS2)

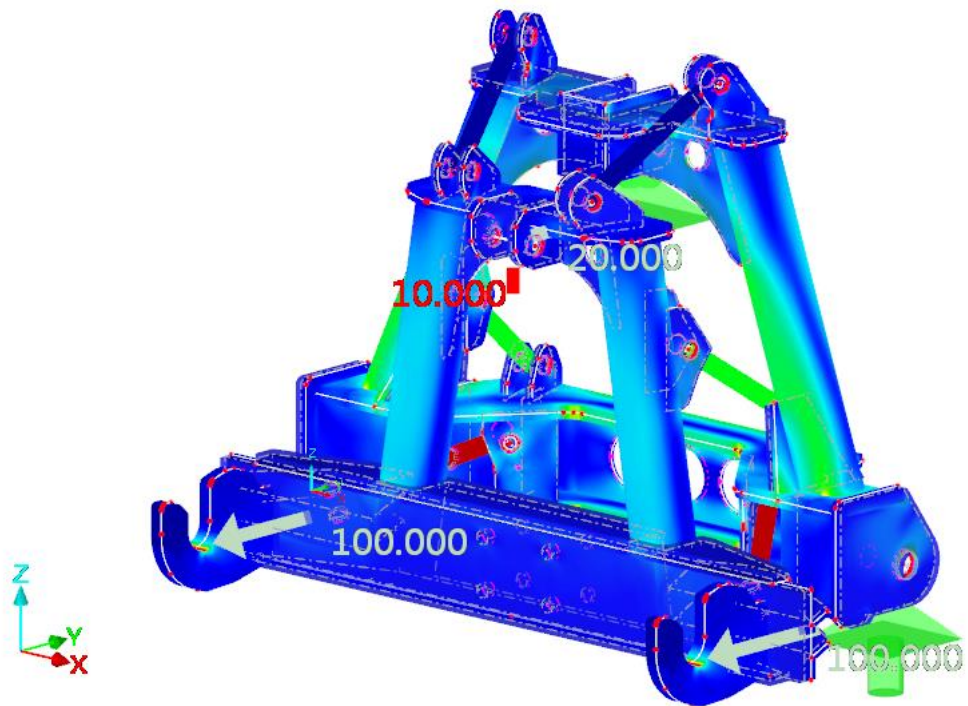
V zatěžovacím stavu 2 jsou spodní body zatíženy osamělými silami 100 kN, stejným směrem, jako v případě ZS1. Dále je zatížen horní (třetí bod) silami 10 kN vzhůru (ve směru osy z) a 20 kN ve směru osy x. Součet všech sil do směru osy x je 220 kN a do směru z 10 kN.

Zatěžovací stav 2					
Způsob zatížení:					
Spodní háky	horizontálně	100 kN			
	vertikálně	-			
Třetí bod	horizontálně	20 kN			
	vertikálně	10 kN			
Výsledky pevnostní analýzy					
Pruty					
1	2	3	4	5	6
Síly v prutech [kN]					
-30,876	-30,876	46,883	46,883	128,42	128,42
Prodloužení prutů [mm]					
-0,1	-0,1	1,3	1,3	0,4	0,4

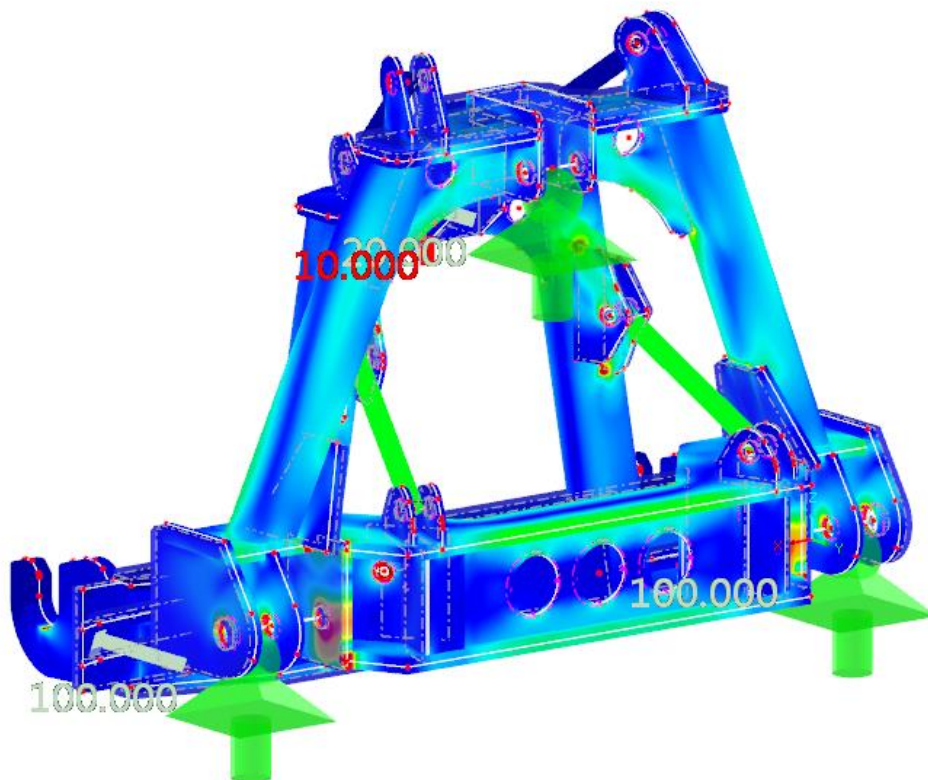
Tab. 5: Zatěžovací stav 2

Stupnice napětí pro ZS2 (vlevo pro plochy, vpravo pro pruty)

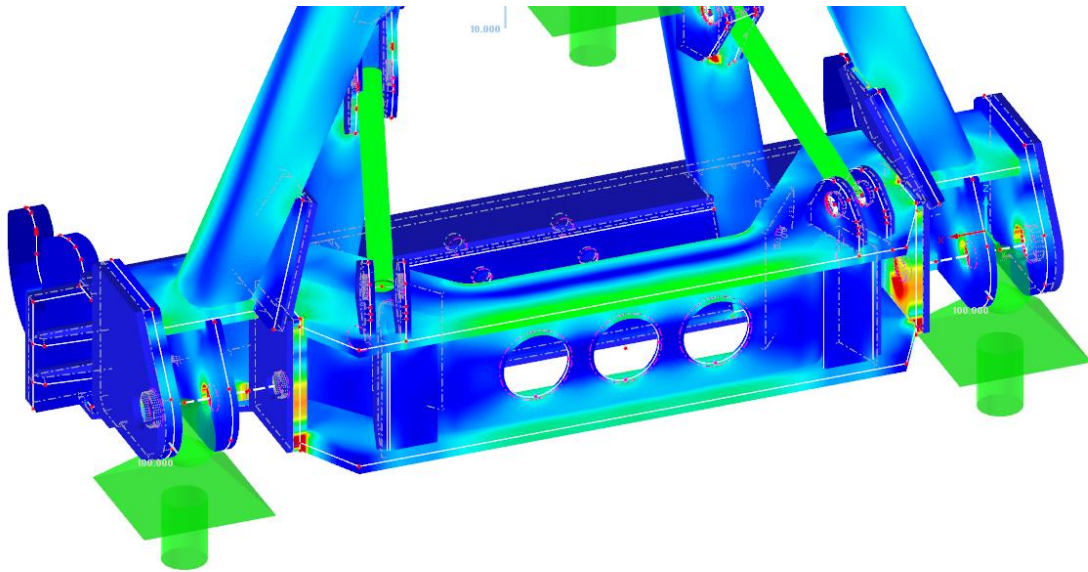




Obr. 86: Pohled na rozložení napětí (ZS2)



Obr. 87: Pohled na rozložení napětí v zadní části (ZS2)



Obr. 88: Pohled na rozložení napětí v oblasti připojovacích bodů (ZS2)

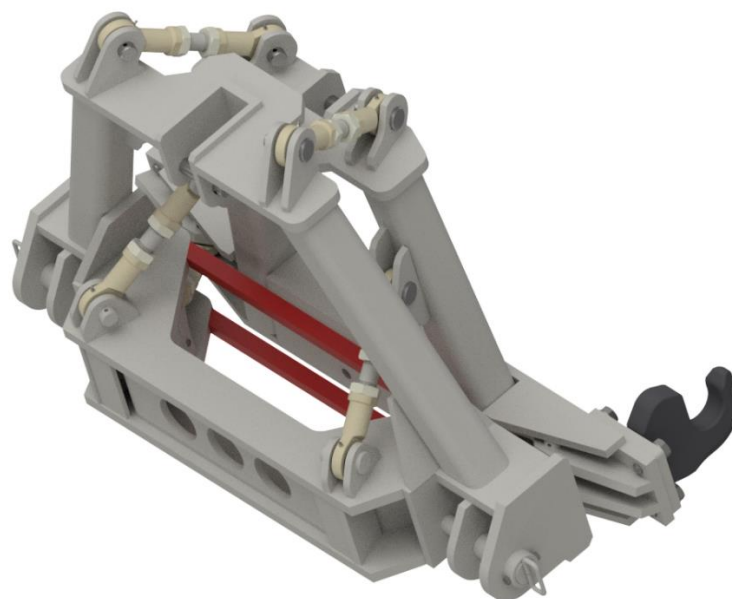
Stejně jako v předchozím zatěžovacím stavu je viditelné, že zatížení prutů je symetrické. Totéž platí i o deformacích prutů a rámu. Z obrázků je patrné, že i mapa rozložení napětí na plochách je symetrická. Stejně, jako v zatěžovacím stavu 1, i v tomto případě najdeme největší napětí v oblasti spodních připojovacích bodů na traktor. Napětí ve zbývajících částech rámu je přibližně stejné jako v případě zatěžovacího stavu 1.

5.3. Návrh doplňkové úpravy

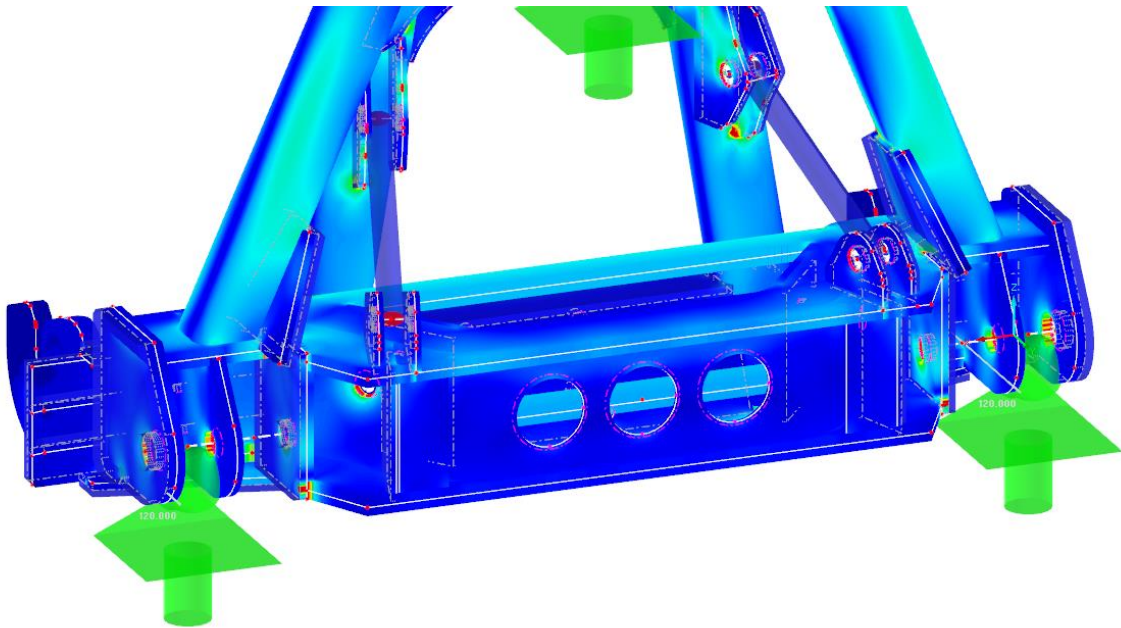
Na základě výsledků pevnostní analýzy byla navržena dodatečná úprava vnitřního rámu. Tato úprava spočívá v navaření dvou výztuh – táhel do volného prostoru v oblasti úchytů spodních i středních táhel. Přesné umístění je patrné z Obr. 89 a Obr. 90 (červeně značené). Jejich příčný průřez je 25x35 mm. Díky této úpravě došlo k výraznému poklesu napětí v oblasti spodních připojovacích bodů k traktoru a také kolem tří kruhových otvorů ve spodní základně rámu. Znatelný pokles napětí je patrný z přiložených obrázků.



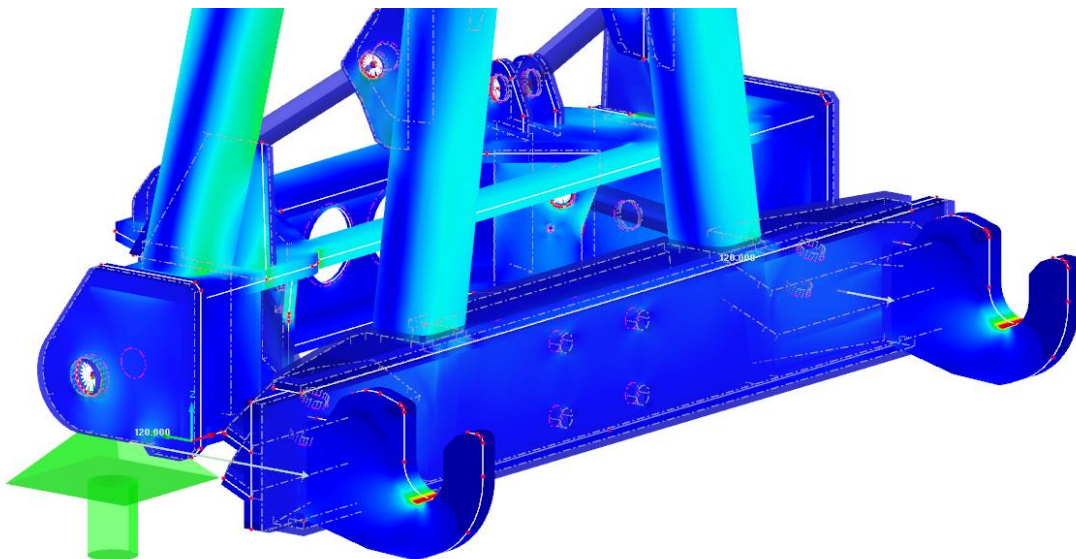
Obr. 89: Doplňené výztuhy na vnitřním rámu



Obr. 90: Doplňené výztuhy na vnitřním rámu



Obr. 91: Rozložení napětí po doplnění výztuhy



Obr. 92: Rozložení napětí po doplnění výztuhy

Z Obr. 91 a Obr. 92 je patrné, že pokles napětí je značný. Analýza na modelu s doplněnou výztuhou byla provedena při zatížení, které odpovídá zatěžovacímu stavu 1. V místech, kde se napětí na původním modelu blížilo mezi kluzu, jsou nyní hodnoty v rozmezí zhruba 120 až 200 N·mm⁻². Napětí ve výztuhách je přibližně 80 N·mm⁻². K porovnání obou stavů bychom využili Obr. 85

6. Závěr

V bakalářské práci jsem navrhl dynamometr na tříbodový závěs, sloužící pro měření silových účinků, které vznikají při provozování zemědělských strojů. Díky jeho konstrukci je možné měřit síly do všech tří složek souřadnicového systému. Stejně je tomu i v případě momentů, můžeme měřit momenty ke každé ose. Zařízení bylo navrženo na základě požadavků v zadání.

Práce je členěna do několika částí. V první, teoretické, části jsem provedl rešerši stávajících možností měření silových účinků a informace zde získané poté využil při samotném návrhu.

V praktické části je popsáno samotné zařízení – dynamometr. Zde jsem se věnoval detailnímu popisu jednotlivých částí dynamometru. Je zde popis obou rámců, tj. vnitřního i vnějšího a prutů, kterými jsou tyto rámy propojeny. Pro úplnost jsem v praktické části popsal i princip měření pomocí dynamometru a na ukázkou přiložil fotografii tenzometru, aplikovaného na propojovací táhlo.

V další kapitole byly provedeny kontrolní výpočty na nejvíce namáhaných částech sestavy dynamometru. Jedná se především o propojovací táhla, kde byly kontrolovány závity a samotná táhla na tah. Další kontrolovanou součástí jsou čepy, kterými se táhla (pruty) připojují k rámcům. Výpočty bylo zjištěno, že většina kontrolovaných součástí pevnostně nevyhovuje a na základě této skutečnosti byly navrženy možné úpravy.

Posledním krokem byla kontrola celé sestavy dynamometru pomocí pevnostní analýzy v programu RFEM. Byly vytvořeny dva zatěžovací stavy, které simulovaly možné zatížení během provozu. Analýzou bylo zjištěno, že v určitých místech rámu se napětí blíží mezi kluzu a z tohoto důvodu byla navržena možná doplňková úprava.

Dynamometr byl následně sestaven (Obr. 93) Výzkumným ústavem zemědělské techniky v Praze, který zároveň provedl jeho testování a kalibraci (Obr. 94).

Seznam použité literatury

- [1] Zemědělství. In: *Wikipedie* [online]. 2021 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zem%C4%9Bd%C4%9Blstv%C3%AD>
- [2] Agricultural machinery. In: *Wikipedia* [online]. 2021 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Agricultural_machinery
- [3] Traktor. In: *Wikipedie* [online]. 2021 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Traktor>
- [4] Traktor 6090M. In: *John Deere* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.deere.cz/cs/traktory/stredni/rada-6m/6090m/>
- [5] Řada 8RT. In: *Danhel* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://danhel.cz/technika/zemedelska-technika-john-deere/traktory-john-deere/rada-8r-8rt/>
- [6] BENEŠ, Petr. Rozdíly mezi nesenými a polonesenými stroji. *Mechanizace zemědělství* [online]. 2018 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.mechanizaceweb.cz/rozdily-mezí-nesenými-a-polonesenými-stroji/>
- [7] Příkopová travní sekačka BCRL 165 . In: *Agrotraktor.eu* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://agrotraktor.eu/prikopova-travni-sekacka-bcrl-165>
- [8] Pluhy s nízkým tahovým odporem. In: *Mechanizace zemědělství* [online]. 2020 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.mechanizaceweb.cz/pluhy-s-nizkym-tahovym-odporem/#gallery-2>
- [9] Přívěsy. In: *ZDT* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.zdt.cz/cz/vyroby/jednoucelove-stroje/privesy>
- [10] Cisterna na vodu za traktor Padelou 3200 l. In: *Zemědělské potřeby M+S* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.eshop-zemedelske-potreby.cz/cisterna-na-vodu-za-traktor-padelou-3200-l-zinkovana-pro-provoz-na-farme-p35267/#gallery>
- [11] DOLEŽAL, Jan. *Regulační hydraulika traktorů a její praktické využití*. České Budějovice, 2015. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- [12] ZÁLEŠÁK, Jiří. *Pomocné zvedací zařízení na traktor*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] ATOS 350–220. In: *CLAAS Products* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <http://app.claas.com/products/2015/en/tr/atos-350.php>
- [14] ISO 730:2009. *Agricultural wheeled tractors — Rear-mounted three-point linkage — Categories 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N and 4*. Geneva: ISO copyright office, 2009.
- [15] Top Links and Lift Rods. In: *LH Lift* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://lhlift.com/en/products/top-links-and-lift-rods/>

- [16] Lower Link Arms. In: *LH Lift* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://lhlift.com/en/products/lower-link-arms/>
- [17] KLOUBOVÉ HLAVICE S KLUZNÝM ULOŽENÍM, VNITŘNÍ ZÁVIT, NEREZOVÁ OCEL. In: *Marek industrial* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.marek.eu/kipp-mechanicke-komponenty/ovladaci-prvky-normovane-dily/klouby/23576/kloubove-hlavice-s-kluznym-ulozenim-vnitri-zavit-nerezova-ocel.html>
- [18] KLOUBOVÉ HLAVICE S KLUZNÝM ULOŽENÍM, VNĚJŠÍ ZÁVIT, NEREZOVÁ OCEL. In: *Marek industrial* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.marek.eu/kipp-mechanicke-komponenty/ovladaci-prvky-normovane-dily/klouby/23575/kloubove-hlavice-s-kluznym-ulozenim-vnejsi-zavit-nerezova-ocel.html>
- [19] Replaceable Ball End Coupling. In: *LH Lift* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://lhlift.com/en/products/replaceable-ball-end-coupling/>
- [20] Accessories and spare parts. In: *LH Lift* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://lhlift.com/en/products/accessories/>
- [21] Quick Coupler Hooks. In: *LH Lift* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://lhlift.com/en/products/quick-coupling-hooks/>
- [22] Telescoping Stabilizers for Kubota BX series. In: *TractorByNet.com* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.tractorbynet.com/forums/threads/available-on-ebay-tph-pin-adjustable-telescoping-stabilizers-for-kubota-bx-series.420689/>
- [23] BAUER, František. *Traktory a jejich využití: Závěsná zařízení*. 2. vydání. Praha: Profi Press s. r. o., 2013. ISBN 978-80-86726-52-6.
- [24] Aigner přední tříbodový závěs. In: *MANATECH* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.manatech.cz/aigner-predni-tribodovy-zaves-a-predni-vyvodova-hridel/>
- [25] CAN YOU DIG IT? HOW TO USE A PTO-DRIVEN POST HOLE DIGGER. In: *Nelson tractor company* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://nelsontractorco.com/can-you-dig-it/>
- [26] T1-700MM PTO Shaft 24MM Key - 6 Spline. In: *CBD Powerwashers* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.cbdpowerwashers.co.uk/parts/pto-shafts/t1-700mm-pto-shaft-24mm-key-6-spline>
- [27] ROCA, J., M. COMELLAS, J. PIJUAN a M. NOGUÉS. *ELSEIVER: Development of an easily adaptable three-point hitch dynamometer for agricultural tractors*. [online]. 2019 [cit. 2021-07-27].
- [28] PROCHÁZKA, Petr. *Metody měření tahových sil moderních strojů na zpracování půdy*. Praha, 2016. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- [29] ALIMARDANI, R. Dynamometer and Data acquisition system. In: *ResearchGate* [online]. 2008 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Dynamometer-and-Data-acquisition-system_fig6_228412953

- [30] ROCA, J. a J. PIJUAN. CAD-3D model and picture of the three-point hitch dynamometer. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/CAD-3D-model-and-picture-of-the-three-point-hitch-dynamometer_fig1_267405934
- [31] LB 210 Vážicí čep. *Magtrol* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/lb210.pdf>
- [32] Tenzometr. In: *Wikipedie* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzometr>
- [33] NOVÁK, Martin. *Technická měření: Snímače síly*. Praha: Česká vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [34] The Measurement Experts for the Extended Temperature Range. In: *HBM* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/3067/series-c-the-specialist-strain-gages-for-extreme-temperatures/>
- [35] MCF20. In: *Comforia* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.comforia.cz/produkty/snimace-sily/6>
- [36] *HBM strain gauges: Strain Gauges First choice for strain measurements* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/S01265.pdf>
- [37] *Bolzano: Přehled vlastností oceli S355J2* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355j2drive-s355j2g3>
- [38] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *ČÁSTI STROJŮ: 1. svazek*. Praha: SNTL, 1989.

Seznam obrázků

Obr. 1: John Deere 6090M [4]	6
Obr. 2: Pásový traktor řady 8RT [5]	7
Obr. 3: Nesená sekačka [7]	7
Obr. 4: Polonesený pluh [8]	8
Obr. 5: Dvounápravový valník [9]	8
Obr. 6: Jednonápravová cisterna s podpěrrou oje [10]	9
Obr. 7: Tříbodový závěs [13]	10
Obr. 8: Připojovací rozměry na traktoru [14]	11
Obr. 9: Připojovací rozměry na traktoru [14]	12
Obr. 10: Vzdálenost spodního bodu od vývodového hřídele [14]	12
Obr. 11: Připojovací rozměry stroje [14]	14
Obr. 12: Připojovací rozměry [14]	14
Obr. 13: Prvky tříbodového závěsu [14]	15
Obr. 14: Horní táhlo s kloubovými oky [15]	16
Obr. 15: Horní táhlo s rychloupínacím hákem [15]	16
Obr. 16: Spodní rameno s rychloupínacím hákem [16]	16
Obr. 17: Spodní rameno s kloubovým okem [16]	16
Obr. 18: Kloubové oko s vnitřním závitem [17]	17
Obr. 19: Kloubové oko s vnějším závitem [18]	17
Obr. 20: Kloubové oko s vyměnitelnými kulovými vložkami [19]	17
Obr. 21: Koule spodních bodů [20]	18
Obr. 22: Koule třetího bodu [20]	18
Obr. 23: Rychloupínací spodní hák [21]	19
Obr. 24: Rychloupínací horní hák [21]	19
Obr. 25: Boční stabilizátory [22]	19
Obr. 26: Zdvihací mechanismus [23]	20
Obr. 27: Zdvihací táhlo s možností nastavení délky [15]	20
Obr. 28: Přední tříbodový závěs s vývodovým hřídelem [24]	21
Obr. 29: Ukázka použití pohonu vývodovým hřídelem [25]	21
Obr. 30: Kardanový hřídel [26]	22
Obr. 31: Výkyvný dynamometr [28]	23
Obr. 32: Prvky výkyvného dynamometru [28]	23
Obr. 33: Jednorámový dynamometr [29]	24
Obr. 34: Dvourámový dynamometr [30]	25
Obr. 35: Umístění propojovacích a měřících členů [27]	25
Obr. 36: Měřicí čep [31]	26
Obr. 37: Schématické znázornění jednotlivých částí měřící soustavy [27]	27
Obr. 38: Znázornění jednotlivých rovin náklonu [27]	28
Obr. 39: Hlavní části měřícího systému a výsledné silové účinky mezi nimi [27]	28
Obr. 40: Vnější rám dynamometru s vyznačením sil na čepech pro táhla [27]	29
Obr. 41: Vnější rám s vyznačením výsledných silových a momentových účinků mezi rámy (F_d a M_d) a mezi rámem a strojem (F_i a M_i) [27]	29
Obr. 42: Prototyp popisovaného dynamometru [30]	30
Obr. 43: Dynamometr TH 300	31
Obr. 44: Různá provedení tenzometrů [34]	32
Obr. 45: Zapojení tenzometrů do plného můstku [33]	33
Obr. 46: Dynamometr pro měření tahových sil [35]	33
Obr. 47: Hlavní části dynamometru	34
Obr. 48: Pohled na přední stranu dynamometru	35
Obr. 49: Pohled na zadní stranu dynamometru	36
Obr. 50: Zadní strana rámu	37
Obr. 51: Přední strana rámu	37



Obr. 52: Grafické znázornění jednotlivých dílů spodní základny rámu	38
Obr. 53: Grafické znázornění úchytů pro čepy	38
Obr. 54: Grafické znázornění patek vyztužujících spoj jechlů a spodní základny	39
Obr. 55: Grafické znázornění jednotlivých dílů horní základny rámu	39
Obr. 56: Jekl tvořící rameno lichoběžníku	40
Obr. 57: Rozevření a záklon ramen	40
Obr. 58: Grafické znázornění úchytů pro střední pruty	41
Obr. 59: Grafické znázornění spodních úchytů	41
Obr. 60: Grafické znázornění úchytů pro horní pruty	42
Obr. 61: Umístění koulí kategorií 3 a 4	42
Obr. 62: Pohled na přední stranu vnějšího rámu	43
Obr. 63: Pohled na zadní stranu vnějšího rámu	43
Obr. 64: Grafické znázornění jednotlivých dílů spodní základny rámu	44
Obr. 65: Pohled na vnitřní stranu spodní základny	44
Obr. 66: Grafické znázornění jednotlivých dílů horní základny rámu	45
Obr. 67: Ramena lichoběžníku	45
Obr. 68: Grafické znázornění spodních úchytů	46
Obr. 69: Grafické znázornění středních úchytů	46
Obr. 70: Grafické znázornění horních úchytů	47
Obr. 71: Propojovací táhlo	48
Obr. 72: Umístění tenzometrů	48
Obr. 73: Ochranný kry tenzometrů	49
Obr. 74: Kontrolované čepy	51
Obr. 75: Výpočtový model a průběh ohybového momentu	52
Obr. 76: Ohybový moment v prvním poli	53
Obr. 77: Ohybový moment ve druhém poli	53
Obr. 78: Kontrolované šrouby	55
Obr. 79: Umístění koutového svaru	58
Obr. 80: Závěsný hák zatížený tahem	58
Obr. 81: Šrafovaná plocha představuje plochu svaru	59
Obr. 82: Číselné značení prutů	60
Obr. 83: Pohled na rozložení napětí (ZS1)	62
Obr. 84: Pohled na rozložení napětí v zadní části (ZS1)	62
Obr. 85: Pohled na rozložení napětí v oblasti připojovacích bodů (ZS1)	63
Obr. 86: Pohled na rozložení napětí (ZS2)	65
Obr. 87: Pohled na rozložení napětí v zadní části (ZS2)	65
Obr. 88: Pohled na rozložení napětí v oblasti připojovacích bodů (ZS2)	66
Obr. 89: Doplněné výztuhy na vnitřním rámu	67
Obr. 90: Doplněné výztuhy na vnitřním rámu	67
Obr. 91: Rozložení napětí po doplnění výztuhy	68
Obr. 92: Rozložení napětí po doplnění výztuhy	68
Obr. 93: Vnitřní rám dynamometru během výroby	75
Obr. 94: Dynamometr během testování	75

Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení kategorií podle výkonu motoru [14]	10
Tab. 2: Hlavní rozměry tříbodových závěsů podle jednotlivých kategorií [14]	11
Tab. 3: Připojovací rozměry na stroji [14]	13
Tab. 4: Zatěžovací stav 1	61
Tab. 5: Zatěžovací stav 2	64

Seznam příloh

- Výkres sestavy dynamometru
- Výkres sestavy propojovacího táhla
- Kusovník
- Model dynamometru (.stp)
- Základní model z pevnostní analýzy (.rf5)
- Model s výztuhami z pevnostní analýzy (.rf5)

Přílohy



Obr. 93: Vnitřní rám dynamometru během výroby



Obr. 94: Dynamometr během testování