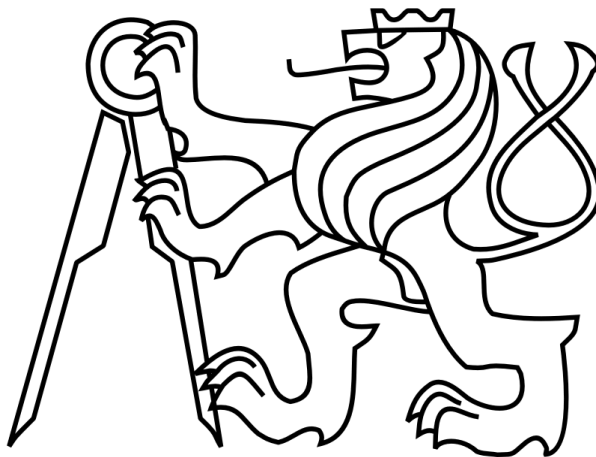


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

**Návrh polohovací jednotky vřetene kotoučové zkracovací pily na kámen
pro kotouč 400 mm**

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 28.6.2016

.....

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval především panu Ing. Jaroslavu Červenkovi za trpělivé konzultování této práce a za nepřeborné množství cenných rad. Dále bych chtěl poděkovat rodičům. Také všem kamarádům, avšak rád bych jmenovitě zmínil spolužáky pana Michala Jasného a slečnu Lucii Marcalíkovou za dlouhodobou podporu ve studiu.

ANOTACE

Jméno autora:	Tomáš Urban
Název BP:	Návrh polohovací jednotky včetně kotoučové zkracovací pily na kámen pro kotouč 400 mm
Rozsah práce:	56 str., 30 obr., 25 tab.
Školní rok vyhotovení:	2015/2016
Ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí BP:	Ing. Jaroslav Červenka
Konzultant:	Ing. Jan Peroutka
Zadavatel tématu:	KASPE European Trading s.r.o.
Využití:	Vylepšení stávající pily na kámen o nové řezné pohyby.
Klíčová slova:	Pila na kámen, konstrukce, kamenictví, řezné kotouče, servomotory, zkracovací pila, zpracování kamene
Anotace:	Předložená bakalářská práce se zabývá problematikou konstrukce zkracovacích pil na kámen. Na základě průzkumu trhu byly navrženy tři řešení a z nich vybráno optimální, které bylo zpracováno formou 3D modelu a návrhových výpočtů.

ANNOTATION

Author:	Tomáš Urban
Title of bachelor dissertation:	Design of spindle position unit of the cross cut saw for stone with saw blade 400 mm
Extent:	55 p., 30 fig., 25 tab.
Academic year:	2015/2016
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jaroslav Červenka
Consultant:	Ing. Jan Peroutka
Submitter of the theme:	KASPE European Trading s.r.o.
Application:	Improvement of current cut-off saw for new cutting movements.
Key words:	Cut-off saw, stone, construction, masonry, saw cutting, servomotors
Annotation:	This bachelor thesis deals with the issue of construction cut-off saw for stone. Based on the research of market were proposed three solutions and the best of them was selected. This solution was processed in 3D model and in design calculation.

OBSAH

PROHLÁŠENÍ	1
PODĚKOVÁNÍ	2
ANOTACE	3
ANNOTATION	4
OBSAH	5
PŘEHLED POUŽITÝCH VELIČIN A JEDNOTEK	7
1. ÚVOD	9
2. CÍL PRÁCE	10
3. STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	11
3.1. Typy konstrukce zarovnávacích pil	11
3.2. Parametry Kasper – Carbo 4	12
3.3. Pouze rovný řez	13
3.3.1. Výsuvné rameno	13
• Pedrini – M739/M740	13
3.3.2. Posuvné vřeteno	15
• Bombieri & Venturi – IBV/600 M1-P	15
3.3.3. Vřeteno na kyvadle	17
• Konmak – BK 950	17
3.4. Naklápěcí a natáčecí vřeteno	19
3.4.1. Rotační uložení pod dopravníkem	19
• Nuova Mondial Mec S.r.l. – Scorpione	19
3.4.2. Rotační uložení za dopravníkem	21
• M. Kolb – MKA plus	21
3.5. Speciální	23
• Burkhardt-Hensel – WLS 500	23
3.6. Shrnutí provedené rešerše	24
4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ	26
4.1. Návrhy řešení	26
4.1.1. Varianta 1: Rotační uložení nad dopravníkem vzadu	26
4.1.2. Varianta 2: Rotační uložení pod dopravníkem vepředu	28
4.1.3. Varianta 3: Rotační uložení za dopravníkem dole	29
4.1.4. Výběr nejvhodnější varianty	29

4.2.	Řezný proces.....	30
4.3.	Vřeteno	32
4.4.	Horizontální vedení	33
4.6.	Ozubený hřeben.....	35
4.6.1.	Šneková převodovka	36
4.6.2.	Motor	36
4.7.	Vertikální vedení	37
4.8.	Pohybový šroub vertikální.....	40
4.8.1.	Trapézový šroub	40
4.8.2.	Kuličkový šroub.....	41
4.9.	Natáčení ramene v ose C.....	45
4.10.	Naklápění vřetene v ose B.....	48
5.	ZÁVĚR.....	51
6.	SEZNAMY	52
6.1.	Seznam obrázků	52
6.2.	Seznam tabulek.....	52
4.3.	Seznam příloh.....	53
4.3.1.	Seznam textových příloh.....	53
6.3.2.	Seznam výkresové dokumentace.....	53
6.3.3.	Elektronické přílohy (CD).....	53
6.4.	Seznam použité literatury a odkazy	54

PŘEHLED POUŽITÝCH VELIČIN A JEDNOTEK

Veličiny, u nichž není uvedena jednotka, jsou bezrozměrné.

symbol	jednotka	význam
a	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	akcelerace
B		osa rotace
C		osa rotace
C_d	[N]	dynamická únosnost
C_0	[N]	statická únosnost
d	[mm]	délka
d_j	[mm]	jmenovitý průměr
d_s	[mm]	střední průměr
D	[mm]	průměr
D_k	[mm]	průměr kotouče
D_1	[mm]	malý průměr
f_n		součinitel uložení
f_v		součinitel uložení
f_w		koefficient zatížení
F_a	[N]	axiální zatížení
F_{amax}	[N]	maximální axiální zatížení
F_m	[N]	střední zatížení
$F_{\tilde{r}}$	[N]	řezná síla
g	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	tíhové zrychlení
h	[mm]	hloubka
i_m		počet závitů matice
k		bezpečnost
k_s		statická bezpečnost
l_0	[m]	délkový rozměr
$l_{a, b, c, f}$	[mm]	délkový rozměr
l_s	[mm]	délka posuvu
l_{si}	[mm]	délka posuvu v daném úseku
$l_{\tilde{s}}$	[mm]	délka šroubu
L	[ot.]	životnost v otáčkách
L_h	[hod.]	životnost v hodinách
$L_{\tilde{s}}$	[km]	životnost ve vzdálenosti
m	[kg]	hmotnost
m_z	[mm]	modul ozubení
M_k	$[\text{N}\cdot\text{m}]$	krouticí moment
n	$[\text{ot}\cdot\text{s}^{-1}]$	otáčky
n_m	$[\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}]$	otáčky motoru
n_{max}	$[\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}]$	maximální otáčky
n_{kr}	$[\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}]$	kritické otáčky

p	[MPa]	tlak
p_d	[MPa]	dovolený tlak
P	[W]	výkon
PI	[N]	radiální zatížení vozíků lineárního vedení
PIT	[N]	laterální zatížení vozíků lineárního vedení
P_{EI}	[N]	kombinované zatížení vozíků lineárního vedení
P_{AEI}	[N]	kombinované zatížení vozíků lineárního vedení při akceleraci
P_{DEI}	[N]	kombinované zatížení vozíků lineárního vedení při deceleraci
P_s	[mm]	stoupání závitu
Q_{kr}	[N]	kritická zatěžující síla
\check{s}	[mm]	šířka
t_a	[s]	doba zrychlení
v	[mm]	výška
v_{dov}	[m·min ⁻¹]	dovolená rychlost
v_o	[m·s ⁻¹]	obvodová rychlost
v_{posuv}	[m·min ⁻¹]	posuvová rychlost
$v_{\check{r}}$	[m·s ⁻¹]	řezná rychlost
X		osa
Y		osa
Z		osa
z		počet zubů pastorku
α	[°]	úhel stoupání
η		účinnost
μ		koeficient tření
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost

1. ÚVOD

Předložená bakalářská práce se zabývá návrhem polohovací jednotky vřetene kotoučové pily na kámen pro firmu Kaspé a.s. Polohovací jednotka je hlavní částí zkracovací pily. Standardně jsou zkracovací pily jednoduchá zařízení na řezání kamene umožňující rovné řezy, kterými dochází ke zkracování kamenných desek. Vyšší řady umožňují provádět i další druhy řezů. Řez šikmý s naklopeným vřetenem a řez pokosový s natočeným ramenem.

V současné době již firma Kaspé disponuje jednoduchou zkracovací pilou, která umožňuje rovný řez s možností naklopení vřetene pro řezy šikmé. Požadavkem firmy Kaspé je dle zadání navrhnout novou pilu, která umožňuje kromě naklopení vřetene i natočení celého ramene pro řezy pokosové. Dalšími parametry zadání jsou specifikovány rozměry stroje a výkon vřetene. Konkrétní hodnoty zadaných parametrů jsou uvedeny v následující kapitole.

2. CÍL PRÁCE

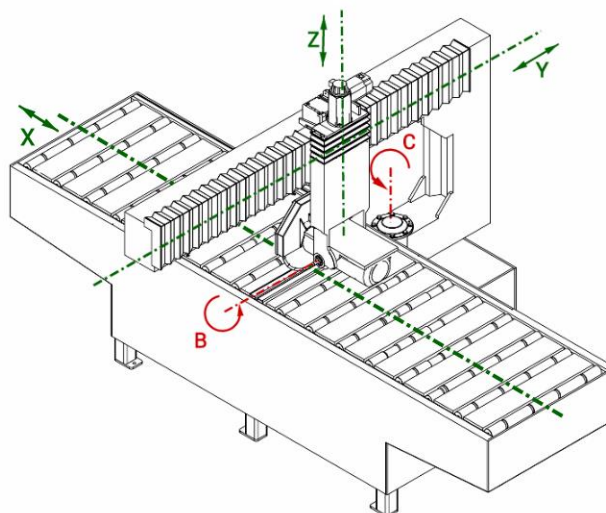
Úkolem této bakalářské práce je navrhnout zkracovací pilu dle následujících parametrů:

Tabulka 1: Parametry dle zadání

Průměr kotouče	400	mm
Výkon motoru	4	kW
Max. rozměr materiálu (v. × h. × d.)	100 × 700 × 3000	mm
Naklápění (osa B)	0; 45	°
Natáčení (osa C)	-45; 0; +45	°
Velikost stroje (d. × v. × š.)	3960 × 2260 × 2100	mm
Motorický zdvih (osa Z)	150	mm

Nejprve je nutné zpracovat řešerši podobných strojů, které se u nás a především ve světě vyrábějí. Ta ukazuje jakými směry se vydat a jaké jsou možnosti řešení. Následuje vlastní řešení, které se sestává z několika návrhů. Varianta, která nejlépe uspokojuje nároky ze strany zadání a z hlediska konstrukce, je zpracována v CAD softwaru. Následuje výpočtová část, ve které jsou spočteny řezné síly, a kde jsou dimenzovány hlavní části stroje. Posledním cílem je vytvoření částečné výkresové dokumentace.

Na obrázku 1 je zobrazeno značení jednotlivých os a rotací. Hlavní řezný pohyb je v ose Y, hloubku řezu zajišťuje posuv v ose Z. Pro pokosové (natočené) řezy slouží natáčení v ose C a pro naklopené (šikmé) řezy slouží rotace v ose B. Řezaný materiál se pohybuje po dopravníku v ose X.



Obrázek 1: Schéma pohybů stroje

3. STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V rámci problematiky řezání kamene pomocí kotoučových pil existuje široká škála strojů s různým zaměřením. Vyrábějí se od velikosti ručních pil pro řezání dlaždic s kotoučem o průměru od 150 mm.

Následuje kategorie zkracovacích pil s průměrem kotouče od 200 mm po 1000 mm, jenž provádí, jak už název napovídá, jednoduché zkracování kamene již opracovaného kamene povětšinou rovnými popřípadě pokosovými řezy.

Dalším typem jsou mostové pily, které se dále dělí do několika kategorií dle předpokládaného užití. První v kategorii jsou velké pily určeny pro řezání kamenných bloků, jejichž průměr kotouče přesahuje 3 m. Tyto pily provádí prvotní zpracování vytěženého kamene na hrubé desky, které jsou dále zpracovávány. Podobnou funkci plní pily vícelisté, které jsou vybaveny mnoha kotouči řazenými vedle sebe pro řezání bloků na pásy o určité šířce ve velkém počtu při jednom řezu. Dalším typem jsou menší CNC formátovací pily, jež jsou určeny pro řezání kamenů na konečný tvar. Jsou schopny řezat různé druhy řezů dle naprogramovaného NC kódu. Mohou být například vybaveny standartním upínacím rozhraním, umožňujícím automatickou výměnu frézovacích nástrojů, či jinými funkcemi známými z klasických CNC center na obrábění oceli.

3.1. Typy konstrukce zarovnávacích pil

Konstrukce zarovnávacích pil lze rozdělit dle několika hledisek. První rozdělení je dle konfigurace dopravníku. Buď může být oddělený od pily, nebo je součástí rámu stroje. Pokud je dopravník oddělený, je výhodou jednodušší manipulace, avšak při neopatrné obsluze hrozí nežádoucí změna nastavení stroje.

Dalším rozdělením je, jakým způsobem je vykonáván pohyb vřetena. Vřeteno je buď pevně připojeno na konci vedení a pohyb vykonává celé rameno, mluvíme tedy o výsuvném rameni. Dále se může pohybovat vřeteno připojené k saním nebo je vřeteno umístěno na rameni, jehož bod otáčení je umístěn nad dopravníkem, vřeteno tak vykonává kyvadlový pohyb.

Velmi důležitým rozdělením je, jaké typy řezů lze pomocí pily vykonávat. Základní řez je rovný řez, dále pila může disponovat možností naklopit vřeteno v rozsahu 0° až 45° . Posledním typem je natočení kotouče pro pokosové řezy s rozsahem $-45^\circ - 0^\circ - +45^\circ$. V extrémním případě je možné natočení kotouče s vřetenem až o 90° , takto může pila řezat dlouhé podélné řezy. Natočení je realizováno buď s rotačním uložením pod dopravníkem či s rotačním uložením za dopravníkem.

Mezi speciální případy lze řadit pily bez posuvu nebo pily s více kotouči (v této kategorii jen se dvěma).

3.2. Parametry Kasje – Carbo 4

Prvním příkladem je pila firmy Kasje. Tento model umožňuje rovný řez s možností naklonění vřetena v rozmezí $0^\circ - 45^\circ$. Na obrázku 2 je vidět i s příslušenstvím v podobě přídavných rolnových dopravníků včetně zarážek pro ustavení kamene, který je po dopravníku dopravován nezvykle zprava.



Obrázek 2: Kasje - Carbo 4 [1]

Pila je určena pro kotouče s průměrem 350 – 400 mm a dodává se s vřetenem o výkonu 4,5 kW. Posuv i naklápění jsou zajišťovány manuálně. Konstrukce je de facto rozdělena na dvě části (dopravník a stojan s vřetenem). Tyto části jsou však spojeny pomocí šroubového spoje.

Tabulka 2: Kasje – Carbo 4

Průměr kotouče	350 – 400	mm
Výkon vřetena	4,5	kW
Max. rozměr mat. (v. × š. × d.)	100 × 500 × 3000	mm
Naklápění	0; 45	°
Natáčení	–	°
Velikost stroje (d. × v. × š.)	5500 × 3500 × 1500	mm
Motorický zdvih	–	mm
Hmotnost stroje	3100	kg
Vnitřní rozměr kotouče	30	mm

3.3. Pouze rovný řez

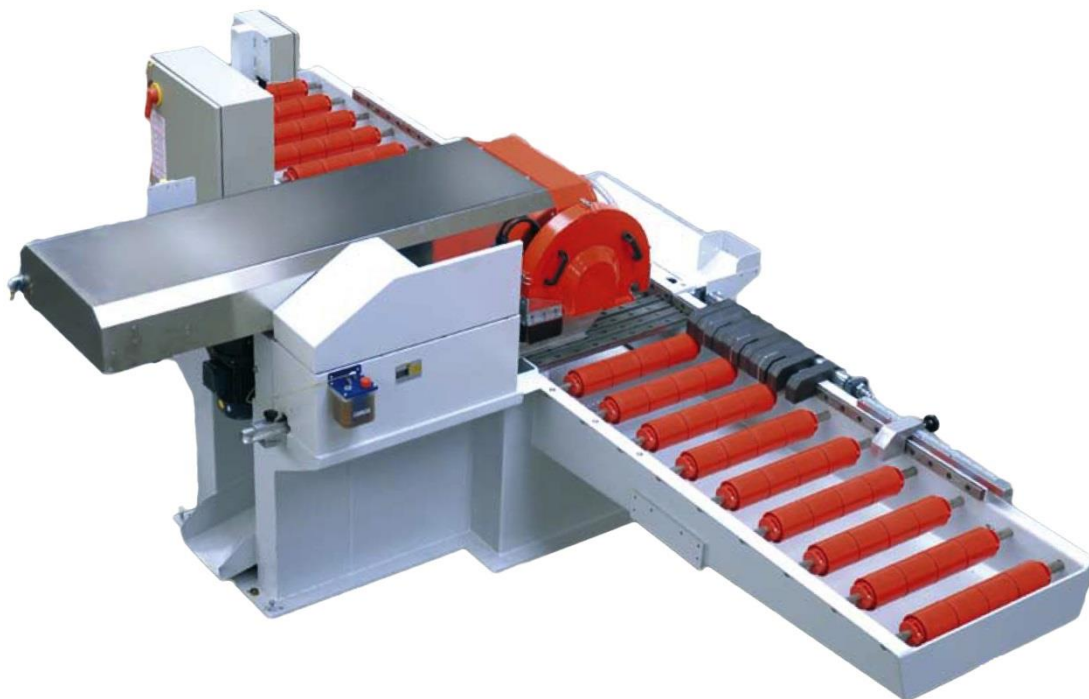
Stroje uvedené v této kategorii umožňují provádět pouze rovné řezy, avšak i zde je vidět velká rozmanitost jednotlivých modelů. Tuto kategorii lze dále dělit na další tři podkategorie. Stroje s výsuvným ramenem, s posuvným vřetenem a s vřetenem na kyvadle.

3.3.1. Výsuvné rameno

Řešení umožňující snížit výšku stroje, avšak na úkor zvýšení nároků na vedení a konstrukci stroje, protože je potřeba pohybovat s většími hmotami. Je třeba zajistit dostatečnou tuhost pily.

- **Pedrini – M739/M740**

Firma Pedrini nabízí dva modely zkracovacích pil. Liší se ve velikosti výkonu a také v průměru řezného kotouče. Stroj patří konstrukcí mezi stroje s vyšší tuhostí.



Obrázek 3: Pedrini – M739 [2]

Konstrukce stojanu a lože je z jednoho kusu. V nabídce jsou pouze stroje pro rovné řezy. [2]

Tabulka 3: Pedrini – M739/M740

	M739GV	M740	
Průměr kotouče	350	500/625	mm
Výkon vřetena	5,3	13,2	kW
Max. rozměr mat. (v. × š.)	35 × 650	120/200 × 650/600	mm
Min. výška materiálu	10	20	mm
Naklápění	–	–	°
Natáčení	–	–	°
Velikost stroje (d. × v. × š.)	4700 × 1520 × 2100	4700 × 1520 × 2250	mm
Hmotnost stroje	1700	2200	kg
Rychlost posuvu	0,5 – 10	0,5 – 10	m·min ⁻¹
Celkový výkon	7	20	kW
Průtok řezné kapaliny	15	20	l·min ⁻¹

Na obrázku 4 je vidět stroj Pedrini bez krytování, který odhaluje vedení na válcových tyčích a také řešení posuvu pomocí pohyblivého ozubeného hřebenu se stacionárním vertikálně umístěným motorem.



Obrázek 4: Nezakrytovaná M739 [2]

3.3.2. Posuvné vřetenno

Kategorie obsahující velké množství strojů od různých výrobců. Například od GMM, Mordenti, Steinadler, M. Kolb a nebo Bombieri & Venturi.

- **Bombieri & Venturi – IBV/600 M1-P**

Stroj od této italské firmy je jedním z největších a nejvýkonnějších strojů dané kategorie. Firma nabízí celkem 4 modely, přičemž v této konfiguraci disponuje 15 kW vřetenem a kotoučem s maximálním průměrem 750 mm.



Obrázek 5: Bombiere & Venturi – IBV/600 M1-P [3]

Modely IBV s označením „M“ jsou osazeny pásovým dopravníkem, což je mezi pilami této kategorie výjimka. Dopravník je poháněn 1,5 kW motorem a samotný pás musí být dostatečně robustní, protože je zde nutno počítat s prořezem kotouče do pásu. Dalším benefitem je automatické přiřazení kamene k přední straně pomocí dvojice pneumatických zarážek.

Tabulka 4: Bombiere & Venturi – IBV/600 M1-P

Průměr kotouče	750	mm
Výkon vřetena	15	kW
Výkon motoru pro posuv dopravníku	1,5	kW
Výkon motoru pro přísuv do materiálu	0,55	kW
Max. rozměr mat. (v. × š.)	250 × 650 (800)	mm
Naklápění	–	°
Natáčení	–	°
Velikost stroje (d.)	4000	mm

Variantní možností je systém se senzorem detekce polohy kamene, který automatizuje celý proces a tím jej výrazně urychlí. Dále je nabízen model IBV/600 M2-P, který má dvě vřetena umístěná vedle sebe a umožňuje provádět dva řezy zároveň a tím zvýšit produktivitu, ale toto řešení má omezení ve zdvihu.



Obrázek 6: IBV/600 M2-P se dvěma vřeteny [3]

3.3.3. Vřeteno na kyvadle

Další možnou konstrukcí je uložení vřetena na kyvadle. Zástupce tohoto druhu pil vyrábějí například firmy Bombieri & Venturi s modely IBV 500/600, Gravellona Macchine Marmo s modelem ATP 400, či firma Konmak, jejíž stroj je zde uveden.

- **Konmak – BK 950**

Stroj turecké firmy Konmak patří mezi typ kotoučových pil, které mají vřeteno uložené na kyvadle, jehož osa otáčení je umístěna nad středem dopravníku. Výhodou tohoto řešení je absence lineárního vedení, které je nahrazeno rotačním uložením, jež není zasažené chladicí kapalinou ani nečistotami z řezného procesu. Přísuv do řezu je v tomto případě zajišťován pomocí ozubeného hřebene.



Obrázek 7: Konmak – BK 950 [4]

Tento způsob konstrukce umožňuje přidat další možnosti pohybu a to natáčení v ose C i naklápění v ose B, avšak v praxi žádný z výrobců toto řešení neaplikoval.

Pila je určena pro kotouče 400 – 450 mm a je osazována vřeteny s výkonem 7,5/11 kW, patří tedy mezi větší stroje v daném sektoru.

Tabulka 5: Konmak – BK 950

Průměr kotouče	400 – 450	mm
Výkon vřetana	7,5/11	kW
Výkon motoru pro přísuv	1,5	kW
Max. rozměr mat. (v. × š.)	50/80 × 650	mm
Min. výška materiálu	10	mm
Naklápění	–	°
Natáčení	–	°
Velikost stroje (d. × v. × š.)	4400 × 2400 × 1500	mm
Hmotnost stroje	1250	kg

3.4. Naklápěcí a natáčecí vřeteno

V této kapitole jsou rozepsány pily, které splňují požadovaný rozsah pohybů uvedený v zadání této práce. Stroje lze rozdělit do dvou hlavních skupin. První skupina má osu rotace C na přední straně pily, přičemž samotné rotační uložení je umístěno pod dopravníkem a druhá skupina má osu otáčení C za dopravníkem, kde se může otáčet celý stojan nebo jen rameno s vřetenem.

3.4.1. Rotační uložení pod dopravníkem

Konstrukční uspořádání této skupiny je velmi zajímavé a podrobněji je popsáno u modelu Scorpione.

- **Nuova Mondial Mec S.r.l. – Scorpione**

Pila od firmy Nuova Mondial Mec je jednou z pil, která splňuje všechny požadavky zadání. Způsob konstrukce určuje, že se všechny možné řezy sbíhají v ose rotačního uložení.

Výhodou tedy je, že zde může být pouze jeden kryt na vyjíždějící kotouč pro ochranu obsluhy. Dále má pila menší zástavbové rozměry než v případě pily s osou rotace za dopravníkem.



Obrázek 8: Nuova Mondial Mec – Scorpione [5]

Nevýhodou typu konstrukce tvaru C je, že rám je zatížen velkou ohybovou silou od vlastní hmotnosti a řezných sil, což má za následek geometrické chyby, které

se projeví především při řezech s nakloněným vřetenem. Dále jsou zde více namáhána ložiska zajišťující rotaci ramene okolo osy C, protože jsou zatížena větší statickou silou, než když je rotační uložení umístěno například na stojanu za dopravníkem a rameno má tudíž menší hmotnost.

Tabulka 6: Nuova Mondial Mec – Scorpione Basic

Průměr kotouče	350	mm
Výkon vřetena	4	kW
Otáčky	2800	ot·min ⁻¹
Max. rozměr mat. (v. × š.)	110 × 700 (90°) / 600 (45°)	mm
Naklápění	0 – 45	°
Natáčení	-45 – 0 – +45	°
Motorický zdvih	140	mm
Velikost stroje (d. × v. × š.)	1850 x 1870 x 1330	mm
Hmotnost stroje	400	kg

Pila umožňuje nastavení natáčení v rozsahu -45° až +45° plynule po stupních a naklápění 0° – 45° taktéž po stupních. Pro kolmý řez je maximální šířka materiálu 700 mm, avšak pro řez při maximálním natočení je to jen 600 mm. Vybavením pily je laser pro snazší odměřování řezu, který je vidět na obrázku 9 (na krytu kotouče) a volitelně také vrtací vřeteno, které je vidět na obrázku 8 v přední části ramene.



Obrázek 9: Scorpione detail naklápění [5]

3.4.2. Rotační uložení za dopravníkem

Tato kategorie je vlastně pouhým rozšířením jednoduchých pil, které zvládají pouze rovný řez. Z výrobců se k tomuto řešení přiklonila například firma Spielvogel s modelem Specht nebo M. Kolb, jejíž model je uveden na následujících řádcích.

- **M. Kolb – MKA plus**

Německá firma M. Kolb nabízí dva modely MKA a MKA plus. Základní model MKA disponuje pouze možností rovných řezů, oproti tomu MKA plus je schopna řezat jak šikmé tak pokosové řezy.



Obrázek 10: M. Kolb - MKA plus [6]

V základní verzi jsou všechny pohyby pily prováděny manuálně (přísuv, naklápění a natáčení). Volitelně lze doplnit motorický přísuv a odměřování úhlů pro natáčení a naklápění. Dalšími možnostmi jsou také možnost podélných řezů a laser pro přesnější odečítání polohy kamene. [6]

Tabulka 7: M. Kolb - MKA plus

Průměr kotouče	400	mm
Výkon vřetena	5	kW
Otáčky	1500	ot·min ⁻¹
Max. rozměr mat. (v. × š.)	100 × 600 (800)	mm
Naklápění	0 – 45	°
Natáčení	-45 – 0 – +45	°
Velikost stroje (d. × v. × š.)	4000 × 1700 × 1800	mm

Neobvyklým technickým řešením, které se u jiné značky neobjevuje, je naklápění celého ramene, tak jak je vidět na obrázku 11.



Obrázek 11: Naklápění ramene MKA plus [6]

Dané řešení eliminuje problém velké výšky ramene, jelikož se pod rameno nemusí vejít naklonené vřeteno a tak se k němu může přisouvat ve vertikálním směru blíž. Nevýhodou je nutnost pohybovat s většími hmotami, na což se musí dimenzovat jak otočné uložení, tak i pohon. V případě manuálního ovládání se objevuje nutnost použití převodovky nebo protizávaží. Drobnou nevýhodou z hlediska ergonomie je obtížný přístup k otáčení ze zadní části stroje, pokud je stroj napojen na sérii dopravníků.

Dalším ne zcela obvyklým detailem je přiřazení kamene na zadní stranu dopravníku. Obsluha tedy musí při řezání kámen dotlačit na zadní dorazovou lištu.

3.5. Speciální

Mezi modely jednotlivých výrobců lze narazit na pily atypických konstrukcí, které se nehodí do žádné z předešlých kategorií. Jedním ze zástupců je například následující model od firmy Burkhardt-Hensel.

- **Burkhardt-Hensel – WLS 500**

Zařízení je vhodné na řezání podlouhlých obrobků. Jedná se o řezání především obrubníků. Pila je zajímavá zejména tím, že neumožňuje horizontální posuv. Jediným možným posuvem je posuv vertikální, který je zajišťován manuálně.



Obrázek 12: Burkhardt-Hensel - WLS 500 [7]

Pila se vyrábí pouze v jedné variantě pro kotouč o průměru 500 mm. Umožňuje natáčení řezného kotouče v maximálním rozmezí od -50° až do 50° s možností aretace po $22,5^\circ$. Dále umožňuje pneumatické upínání obrobku.

Tabulka 8: Burkhardt-Hensel - WLS 500

	WLS 500	
Průměr kotouče	500	mm
Výkon vřetena	neuveďeno	kW
Max. výška mat.	150	mm
Naklápění	–	°
Natáčení	$-50 - +50$	°

3.6. Shrnutí provedené rešerše

V rámci rešerše bylo porovnáváno mnoho výrobců z oblasti kamenického sektoru, z nichž jen část se zabývá produkcí zkracovacích kotoučových pil. Naprostá většina z výrobců nenabízí pily s možností šikmých či pokosových řezů. Pouze čtyři stroje vyhovují všem parametrům ze zadání. Lze je dále rozdělit do tří skupin dle umístění rotačního uložení pro pokosové řezy.

Dále si lze povšimnout, že zadaný výkon vřetene je v tomto sektoru na dolní hranici instalovaného výkonu vřeten.

Tabulka 9: Přehledová tabulka modelů pil (část I)

Výrobce	Model	Průměr kotouče	Vřeteno	Max. výška – šířka mat. (mr./ž.)	Naklápění	Natáčení
–	–	mm	kW	mm	°	°
1) Pouze rovný řez						
● Výsuvné rameno						
Pedrini	M739GV	350	5,3	35 – 650	X	X
	M739MV	350/450	6,6	65/100 – 650/600	X	X
	M739PV	350/450	5,3	65/100 – 650/600	X	X
	M740	500/625	13,2	120/200 – 650/600	X	X
Barsanti Machine	APM 601	400	7,5	80 – 610	X	X
	APM 601A	600	11	80/120 – 610/450	X	X
● Posuvné vřeteno						
Bombiere & Venturi	IBV 600 M1-P	750	15	250 – 650 (800)	X	X
GMM	ATS 350	350	7,5	75/35 – 620	X	X
	ATS 400	400	9	95/45 – 620	X	X
	ATS 500	500	11	110/50 – 620	X	X
Mordenti	IMM/M	350	6,5	50 – 620	X	X
	IMM/G	400	8	50 – 620	X	X
	IMM/MG	400	9/12,5	50 – 620	X	X
Steinadler	TL 1	350/400	3,6	100/125 – N	X	X
	TL 2	450/500	7,5	140/165 – N	X	X
M.Kolb	MKA	300	3	50 – 600	X	X

Tabulka 10: : Přehledová tabulka modelů pil (část II)

Výrobce	Model	Průměr kotouče	Vřeteno	Max. výška – šířka mat. (mr./ž.)	Naklápění	Natáčení
–	–	mm	kW	mm	°	°
• Vřeteno na kyvadle						
Bombiere & Venturi	IBV 500	400	7,5	110 – 510	X	X
	IBV 600	450	7,5	110 – 600	X	X
Huk Machine	HUK V.1	400/500	7,5	80 – 650	X	X
Konmak	BK 950	400/450	7,5/11	50/80 – 650	X	X
GMM	ATP 400	400	7,5/9/11	80/35 – 620	X	X
2) Natáčení a naklápění vřeteno						
• Natáčení v kloubu pod dopravníkem						
Nuova Mondial Mec	Scorpione	350	4,5	110 – 700 (90°) - 600 (45°)	0 - 45	-45 – 0 – +45
Achilli	ARS	250/300/350	4	100 – 600 (0°), 400 (°45)	X	45 – 0 – +45
	ARS HT	400/450	5,5	N – 600 (0°), 400 (°45)	X	45 – 0 – +45
• Natáčení v rotačním uložení za dopravníkem						
M.Kolb	MKA+	400	5	100 – 600/800	0 - 45	45 – 0 – +45
Spielvogel	Specht	350/400	5,9	105 – 810	0 - 45	N
• Natáčení v rotačním uložení nad dopravníkem						
Steup	SABS/A45 UNI	N	N	N	N	N
3) Speciální - bez posuvu						
Burkhardt-Hensel	WLS 500	500	N	150 – N	-50 – 22,5 – 0 – +22,5 – +50	X

4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ

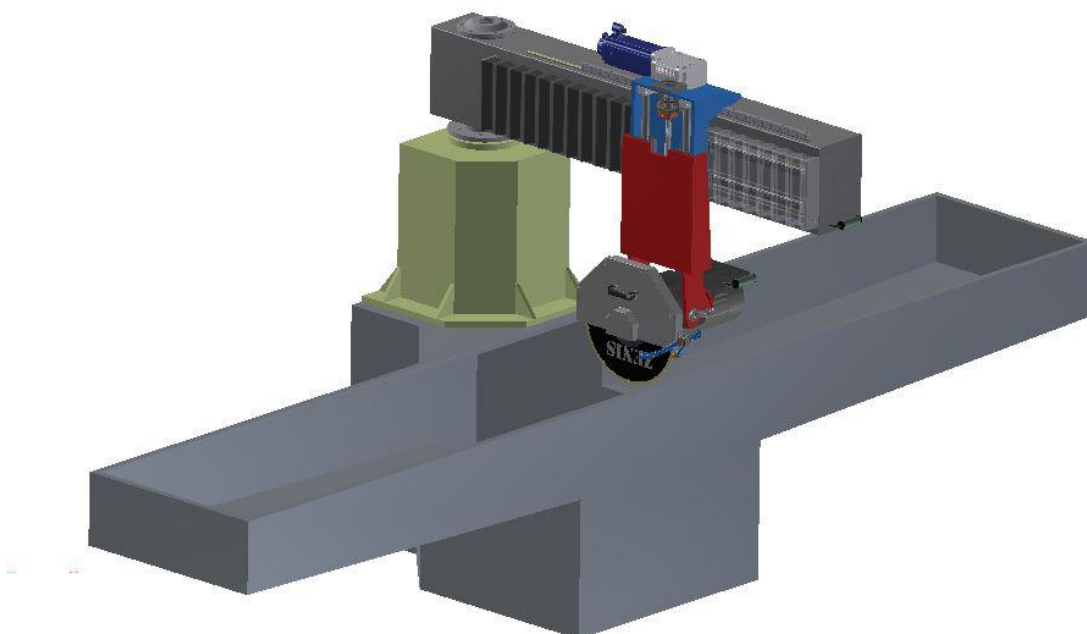
Po zmapování trhu v rešeršní části bylo dle zadaných parametrů navrženo několik řešení a nejvhodnější varianta byla detailně rozpracována.

4.1. Návrhy řešení

Inspirací z existujících řešení vznikly tři konstrukční varianty, které jsou uvedeny níže.

4.1.1. Varianta 1: Rotační uložení nad dopravníkem vzadu

Na obrázku 13 je vidět první varianta, kde je šedo zelenou barvou znázorněn stojan, na kterém je umístěno rotační uložení.



Obrázek 13: Varianta 1 při pohledu zepředu

Výhody:

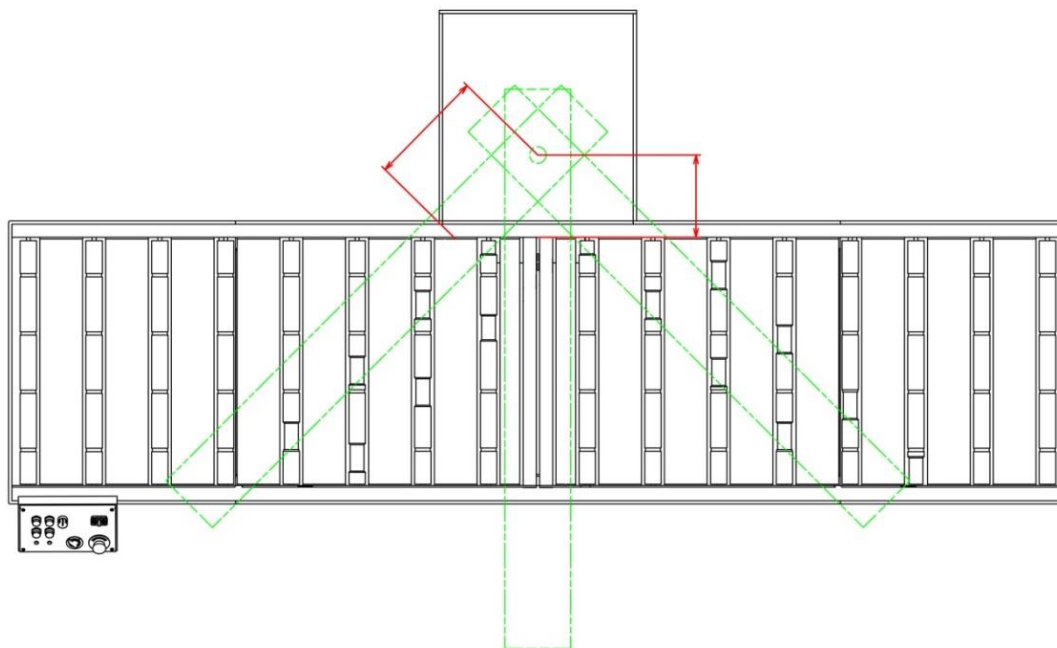
- Velmi tuhá konstrukce.
- Rotační uložení je umístěno nad řezným procesem. Není tedy přímo vystaveno nepříznivým vlivům od obrábění, především od vlivů řezné kapaliny a abrazivního odpadu.
- Na rotační uložení jsou kladeny menší nároky z hlediska statického zatížení, jelikož hmotnost celého ramene je díky kratší délce nižší než v případě ostatních variant.

Nevýhody:

- Tvar stojanu musí reflektovat zástavbové požadavky z hlediska pokosových řezů. Osa otáčení by měla být co nejbližší dopravníku, aby se při šikmých řezech neprodlužovala nutná délka ramene. Problematiku

vysvětluje obrázek 14, na kterém je zelenou čerchovanou čarou znázorněné rameno pily a červenými kótami vynesena vzdálenost osy rotace od dopravníku.

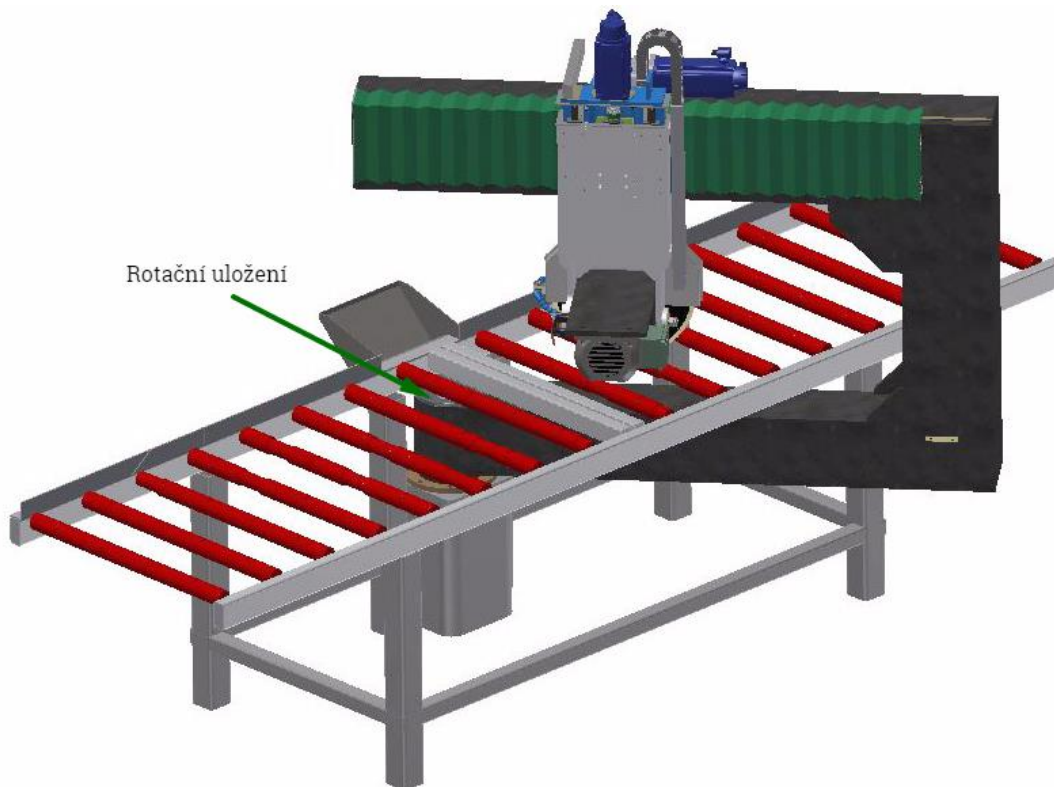
- V případě manuálního natáčení je nutné pro natočení ramene obcházet pilu, což může být komplikované v případě, že je pila napojena na soustavu dopravníků.
- Větší hmotnost a zástavbový prostor než v případě ostatních konstrukcí.



Obrázek 14: Schéma natáčení při umístění rotačního uložení za dopravníkem

4.1.2. Varianta 2: Rotační uložení pod dopravníkem vpředu

V této variantě je osa rotace umístěna vpředu pod krytem na vyjíždějící kotouč. Z obrázku 15 je patrné, že vzniká rám ve tvaru C.



Obrázek 15: Varianta 2 při pohledu zezadu

Výhody:

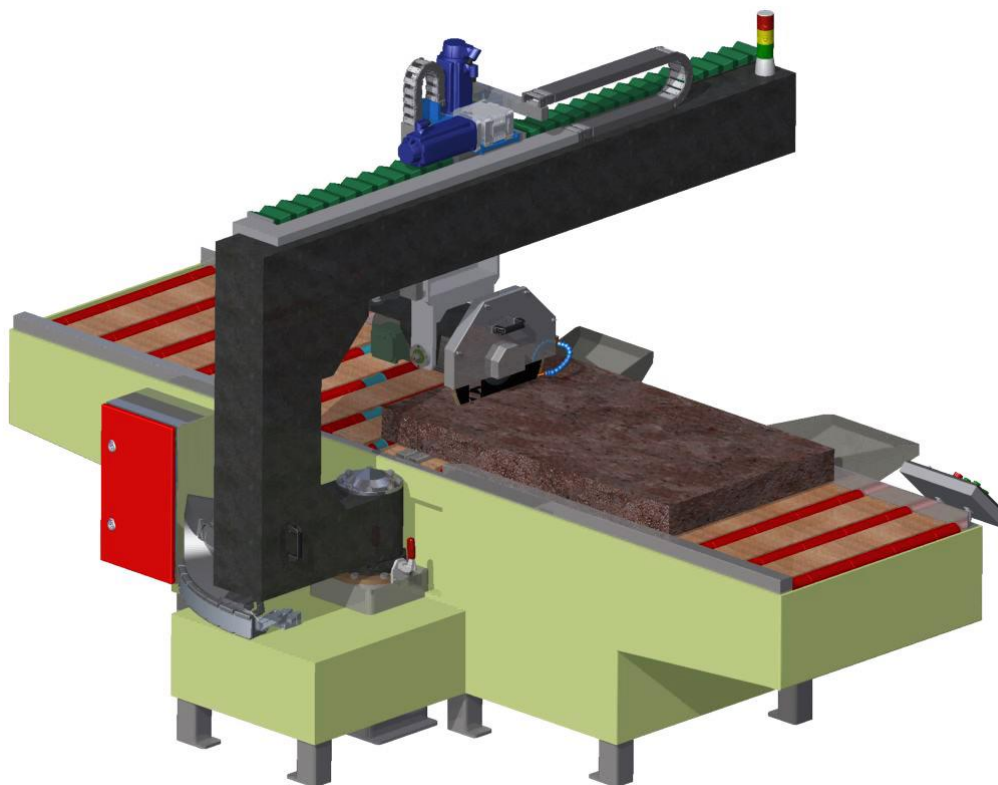
- Všechny řezy se sbíhají v jednom bodě.
- Menší zástavbové rozměry
- Ovládání natočení lze umístit před dopravník, je tedy snadno dosažitelné pro obsluhu.

Nevýhody:

- Rám má menší tuhost.
- Rotační uložení je kvůli poloze, které je přímo pod řezaným materiálem, vystaveno vlivům řezné kapaliny a nečistotám vzniklým při obrábění.
- Je nutné vést kabeláž skrz rotační uložení.
- Nelze pod dopravník umístit vanu na zachycování nečistot.

4.1.3. Varianta 3: Rotační uložení za dopravníkem dole

Osa rotace je umístěna za dopravníkem a vzniká tak zkrácený C rám.



Obrázek 16: Varianta 3 při pohledu zezadu

Výhody:

- Rám je zatížen menšími silami než v případě úplného C rámu. Jelikož je zkrácena délka ramene a tím i jeho hmotnost a zároveň je rotační uložení umístěno pod těžištěm celého ramene.
- Je možné užít vanu na zachycování nečistot.

Nevýhody:

- Rotační uložení je vystaveno znečištění od řezného procesu jako v předchozí variantě.

4.1.4. Výběr nejvhodnější varianty

Z předchozích variant bylo nutné vybrat tu, která nejvíce vyhovuje zadání a je z konstrukčního i ekonomického hlediska optimální.

Konkrétní výhody a nevýhody jsou popsány přímo u každého řešení, z kterého vychází následující zhodnocení.

Jako nejvhodnější byla zvolena varianta 3. Tato varianta je inovativní, protože se u žádného z výrobců neobjevuje a její nevýhody lze eliminovat pomocí vhodné zvolené konstrukce.

4.2. Řezný proces

Nejprve je nutné se seznámit s problematikou řezání kamene. K řezání jsou užívány kotouče s diamantovými segmenty (obrázek 17).



Obrázek 17: Řezný kotouč Black2 od firmy Zenesis

Parametry kotoučů používaných pro obrábění kamene jsou vypsány v tabulce 11.

Tabulka 11: Příklady řezných kotoučů v dané kategorii

Výrobce	URDiamant	Zenesis	
Nástroj	RK 350 C2GV	Zenesis II 16“	
Max. obvodová rychlost	25-40	neuveďeno	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Rychlost posuvu	neuveďeno	5	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Šířka	3,2	neuveďeno	mm
Vnitřní průměr	25,4	50	mm

Při samotném řezání, což je sousledný pohyb kotouče a obrobku, je do řezu přiváděno velké množství řezné kapaliny. Řezná kapalina je chemicky upravená voda.

Řezné síly nelze při obrábění kamene zjistit jednoduchým užitím vzorců jako při obrábění oceli, protože řezané materiály nejsou homogenní a nelze užít řezných koeficientů. Není možné počítat s úběrem třísky na zub, protože obrábění kamene se spíše podobá broušení. Běžné je proto získávání hodnot pomocí experimentů [8]. Pro přibližné určení řezných sil je užito znalostí firmy Kaspé. Výkon vřetena je vhodný pro danou aplikaci a lze z něj spočítat řezné síly. Následuje tabulka s parametry užitými při výpočtu řezných sil.

Tabulka 12: Parametry pro výpočet řezných sil

Řezná rychlost	v_f	4	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Obvodová rychlost pro tvrdé mat.	v_{o1}	30	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Obvodová rychlost pro měkké mat.	v_{o2}	60	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Výkon vřetene	P	4400	W
Průměr kotouče	D_k	400	mm

Pro výpočet řezných sil je nejprve nutné spočítat otáčky kotouče ze známých obvodových rychlostí, které se po převodu na úhlové rychlosti použijí ve výpočtu krouticího momentu.

Výpočet otáček kotouče:

$$n_1 = \frac{1000 \cdot v_{o1}}{\pi \cdot D_k} = \frac{1000 \cdot 30}{\pi \cdot 400} = 23,87 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.1.)$$

$$n_2 = \frac{1000 \cdot v_{o2}}{\pi \cdot D_k} = \frac{1000 \cdot 60}{\pi \cdot 400} = 48,08 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.2.)$$

Výpočet úhlové rychlosti:

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_1 = 2 \cdot \pi \cdot 23,87 = 150 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.)$$

$$\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot n_2 = 2 \cdot \pi \cdot 48,08 = 302 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.4.)$$

Krouticí moment:

$$M_{k1} = \frac{P}{\omega_1} = \frac{4400}{150} = 29,33 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.5.)$$

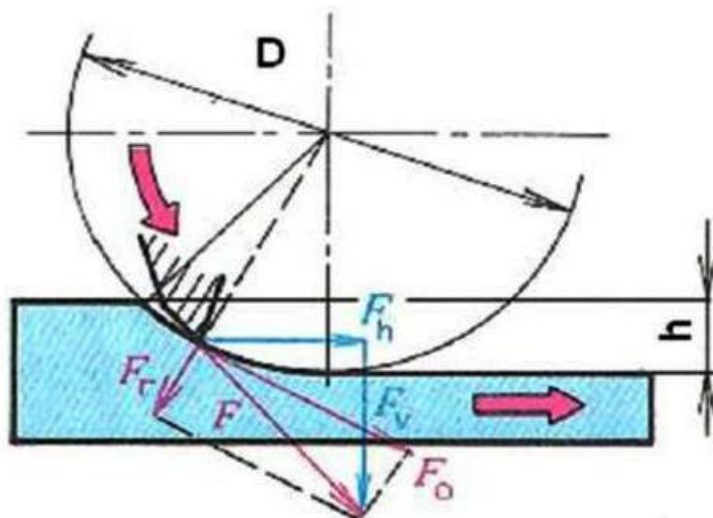
$$M_{k2} = \frac{P}{\omega_2} = \frac{4400}{302} = 14,56 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.6.)$$

Větší krouticí moment vychází pro menší obvodovou rychlost, která je užitá při řezání měkkých materiálů. Řezná síla je počítána z tohoto většího momentu.

Řezná síla:

$$M_k = F_f \cdot \frac{D_k}{2} \rightarrow F_f = M_{k1} \cdot \frac{2}{D_k} = 29,33 \cdot \frac{2}{0,4} = 146,67 \text{ N} \quad (4.7.)$$

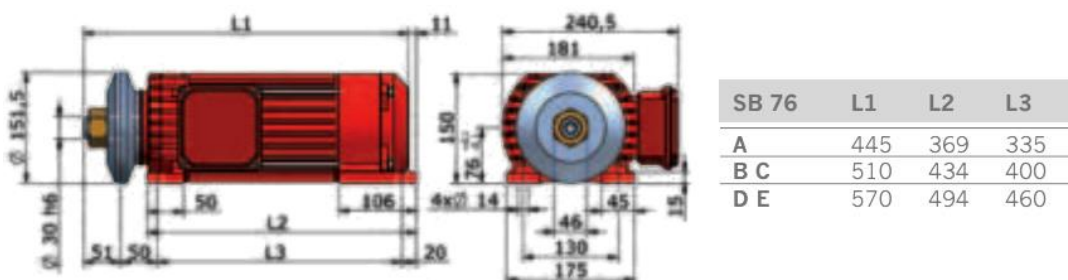
Výsledná řezná síla činí 146,67 N. Z obrázku 18 je patrné, jakým směrem míří výslednice síly. Nyní je nutné rozložit sílu do vertikálního a horizontálního směru. Pro tento rozklad je nutné znát pod jakým úhlem je natočena výslednice síly F_f . Vzhledem k neznalosti této hodnoty je ve výpočtech síla brána ze strany bezpečnosti jako maximální.



Obrázek 18: Rozklad sil vznikajících při sousledném obrábění [15]

4.3. Vřeteno

Speciální vřetena na obrábění kamene vyrábí především dvě firmy a to Saccardo a VEM. Dle zadaných parametrů je nejvhodnější vřeteno SBC 76 ST C/4-2 od firmy Saccardo. O vnějších rozměrech vřetena informuje následující obrázek.



Obrázek 19: Motor Saccardo SBC 76 [9]

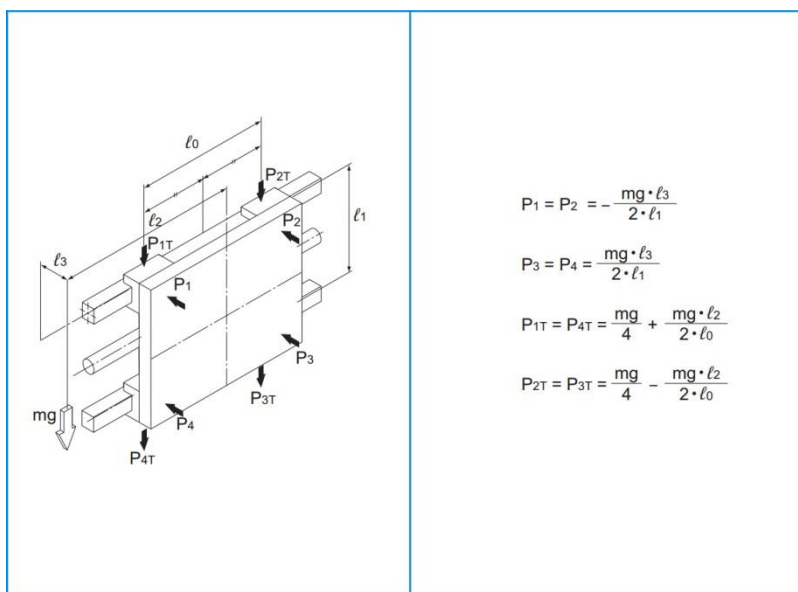
Vyhovuje jak z hlediska požadovaného výkonu, tak optimálních otáček řezání mramoru i žuly [9]. Pro každý z těchto materiálů se používají jiné otáčky. V praxi to znamená, že lze mezi těmito otáčkami motor jednoduše přepínat díky Dahlanderově zapojení [10].

Tabulka 13: Motor Saccardo SBC 76

Výkon vřetena	3,3/4,4	kW
Nominální otáčky	1410/2855	ot·min ⁻¹
Krouticí moment	22,3/14,7	N·m
Počet pólů	4/2	–
Hmotnost	36	kg

4.4. Horizontální vedení

V ose Y je vykonáván hlavní řezný pohyb. Bylo navrženo lineární vedení s vozíky s kuličkami, jehož kolejničky jsou ve dvojici instalovány na boční straně ramene pily. Výpočet životnosti je dle katalogu THK pro instalaci vedení dle obrázku 20, z kterého je patrné, že pohyb bude umožněn čtveřicí lineárních vozíků. Návrh je proveden dle požadavků výrobce.



Obrázek 20: Schéma instalace vedení [11]

Rozměry součásti potřebné k výpočtu byly převzaty z modelu a dále byla odměřena poloha těžiště křížových saní s vřetenem.

Tabulka 14: Hodnoty pro výpočet lineárního vedení

Hmotnost křížových saní	m	160	kg
Délkový rozměr vzdálenosti vozíků	l_0	0,18	m
Délkový rozměr rozteče kolejniček	l_1	0,11	m
Délkový rozměr vzdálenosti těžiště od středu saní	l_2	0,04	m
Délkový rozměr vzdálenosti těžiště od osy kolejniček	l_3	0,06	m
Dynamická únosnost	C_d	31 700	N
Délka posuvu	l_s	1,7	m
Statická únosnost	C_0	52 400	N
Rychlost posuvu	v_{posuv}	10	$m \cdot \text{min}^{-1}$
Součinitel životnosti	f_{wl}	1,6	–

Pro rychlost posuvu křížových saní byla vzata rychlost rychloposuvu při pohybu zpět, která je vyšší než řezná rychlost a slouží ke zkrácení technologických časů. Nejprve byly spočítány hodnoty radiálního a laterálního zatížení, které se dále použili pro výpočet celkového zatížení jednotlivých vozíků valivého vedení.

Tabulka 15: Radiální a laterální zatížení

Radiální zatížení – stálá rychlost		
$P1 = P2$	-428,1	N
$P3 = P4$	428,1	N
Boční (laterální) zatížení – stálá rychlost		
$P1T = P4T$	566,8	N
$P2T = P3T$	218	N

Kombinované zatížení P_E je prostým součtem v absolutní hodnotě radiálního a laterálního zatížení v jednotlivých vozících. Maximální hodnota vychází u hnízda P_{E1} a P_{E4} a to 994,9 N, pro které je zjištěna statická bezpečnost.

Statická bezpečnost

$$k_s = \frac{C_o}{P_{E1}} = \frac{31700}{994,9} = 52,7 [-] \quad (4.8.)$$

Dle předchozího výpočtu splňuje lineární vedení statickou bezpečnost s koeficientem bezpečnosti 52,7 [-].

Životnost

Životnost v km se počítá dle následujícího vztahu:

$$L_i = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{mi}} \right)^3 \cdot 50 \quad (4.9.)$$

Minimální životnost vychází pro zvolené lineární vedení SHS25CQZDD 394 898 km. Po upravení předchozího vztahu lze vyjádřit životnost v hodinách dle posuvové rychlosti. Životnost pak vychází 658 164 hod. a překračuje obecně předpokládanou dobu minimální životnosti 20 000 hod.

Vzhledem k velkému znečištění při řezném procesu, který je velmi prašný, je nutné kromě těsnění ložisek použít krycí měchy, které zakrývají celé horizontální vedení včetně ozubeného hřebene. Na krycím měchu jsou sklady, které způsobují nutnost prodloužení vedení o cca (10–15) % kvůli minimálnímu složení měchu. Výrobou těchto měchů se zabývá například firma Hestego.

4.6. Ozubený hřeben

Pro pohyb v horizontálním směru byl zvolen ozubený hřeben s pastorkem. Toto řešení dosahuje dle následujících výpočtů dostatečných parametrů v požadovaném zrychlení a přenosu sil. V ose Y není nutné vymezit vůle mezi pastorkem a hřebenem. V horizontálním směru je totiž předpokládán prořez před najetím i po vyjetí z materiálu a v žádném z možných řezů není požadováno zastavení v dané poloze.

Ve výpočtu je uvažována řezná rychlost $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato hodnota byla zvolena dle požadavků firmy Kaspé.

Tabulka 16: Parametry pro návrh ozubeného hřebenu a pastorku

Řezná rychlost	$v_{\dot{r}}$	4	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Hmotnost křížových saní	m	160	kg
Koeficient tření	μ	0,1	–
Doba zrychlení	t_a	0,5	s
Délka posuvu	l_s	1500	mm
Modul ozubení	m_z	1,5	mm
Počet zubů pastorku	z	17	–
Bezpečnost	k	3	–
Řezná síla	$F_{\dot{r}}$	150	N

Cílem následujících výpočtů je zjistit krouticí moment potřebný k pohybu křížových saní dle zadaných parametrů a otáčky pastorku, což jsou hlavní parametry pro návrh servomotoru.

Průměr pastorku:

$$d_p = m_z \cdot z = 1,5 \cdot 17 = 25,5 \text{ mm} \quad (4.10.)$$

Z modulu určeného dle katalogu firmy Güdel byl pro danou aplikaci a tažnou sílu vypočítán průměr roztečné kružnice pastorku.

Akcelerace:

$$a = \frac{v_{\dot{r}}}{t_a} = \frac{4}{0,5 \cdot 60} = 0,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (4.11.)$$

Horizontální tažná síla:

$$\begin{aligned} F_{t\dot{z}} &= m \cdot a + m \cdot g \cdot \mu + F_{\dot{r}} = \\ &= 160 \cdot 0,133 + 160 \cdot 9,81 \cdot 0,1 + 150 = 329,3 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.12.)$$

V předchozím výpočtu byla spočítána síla působící proti pohybu křížových saní, kde byly započítány složky sil od zrychlení, zatížení od vlastní tíhy a řezných sil. Tato síla je po vynásobení koeficientem bezpečnosti užita pro výpočet krouticího momentu.

Horizontální požadovaná síla:

$$F_h = k \cdot F_{tž} = 3 \cdot 329,3 = 987,9 \text{ N} \quad (4.13.)$$

Krouticí moment:

$$M_{kh} = \frac{F_h \cdot d_p}{2 \cdot 1000} = \frac{987,9 \cdot 25,5}{2 \cdot 1000} = 12,6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.14.)$$

Krouticí moment je spočítán pomocí maximální tažné síly a průměru roztečné kružnice a vychází 12,6 N·m.

Otáčky:

$$n = \frac{v_{\dot{\gamma}} \cdot 1000}{\pi \cdot d_p} = \frac{4 \cdot 1000}{\pi \cdot 25,5} = 49,3 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4.15.)$$

4.6.1. Šneková převodovka

Pro zmenšení hodnoty krouticího momentu je zvolena šneková převodovka Güdel HPG-045 s následujícími parametry, která dle katalogu výrobce není samosvorná [12].

Tabulka 17: Parametry šneková převodovky Güdel HPG-045 pro $n = 500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Převodové číslo	i	10	–
Jmenovitý krouticí moment	M_{kj}	75,5	N·m
Účinnost	η	0,79	–
Hmotnost	m	4,5	kg

Krouticí moment na vstupu do převodovky:

$$M_{kh'} = \frac{M_{kh}}{i \cdot \eta} = \frac{12,6}{10 \cdot 0,79} = 1,6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.16.)$$

4.6.2. Motor

Dle krouticího momentu spočítaného pomocí rovnice 4.16 a otáček je vybrán servomotor 1FK7042-2AC71 z katalogu Siemens, který má následující parametry [13]:

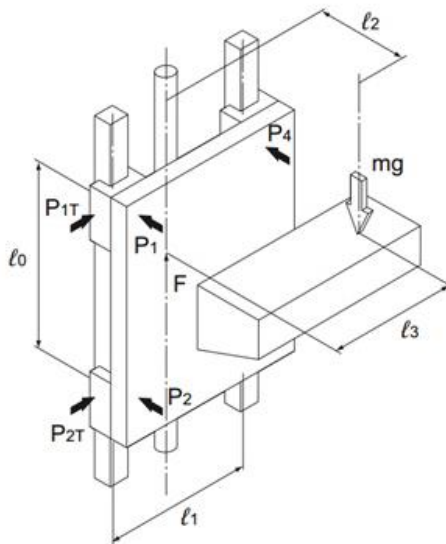
Tabulka 18: Parametry servomotoru 1FK7-2AC71

Jmenovité otáčky	n_j	2000	$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Jmenovitý krouticí moment	M_{kj}	2,8	N·m
Jmenovitý proud	I_j	1,55	A

Servomotor je vybaven brzdou, která v případě výpadku proudu či jiné nenadálé události okamžitě zastaví křížové saně a zabrání.

4.7. Vertikální vedení

Pro posuv v ose Z je užito lineární vedení valivé. Jeho výpočet je proveden dle katalogu THK. Na obrázku 21 je zřejmé rozložení reakcí na vozíky lineárního vedení.



Obrázek 21: Vertikální vedení [11]

Rozměrové a hmotnostní parametry byly odměřeny z 3D modelu stejně jako v případě horizontálního vedení.

Tabulka 19: Parametry pro vertikální vedení

Hmotnost křížových saní	m	103	kg
Délkový rozměr vzdálenosti vozíků	l_0	0,13	m
Délkový rozměr rozteče kolejnic	l_1	0,24	m
Délkový rozměr vzdálenosti těžiště od osy pohybového šroubu	l_2	0,05	m
Délkový rozměr vzdálenosti těžiště od osy pohybového šroubu	l_3	0,02	m
Délka posuvu	l_s	0,15	m
Dynamická únosnost	C_d	22 300	N
Statická únosnost	C_0	38 400	N
Rychlost posuvu	v_{posuv}	10	$m \cdot min^{-1}$
Součinitel životnosti	f_{wl}	1,5	–

Následuje výpočet zatížení jednotlivých lineárních vozíků, které je počítáno pro radiální respektive laterální zatížení při stálé rychlosti. Postup výpočtu je uveden na následujících řádcích. Dále je nutné spočítat zatížení vozíků při počáteční akceleraci a koncové deceleraci. Výpočet je zpracován v programu Excel, který je přiložen na CD, a zde jsou uvedeny pouze výsledné hodnoty.

Zatížení při stálé rychlosti:

$$P_1 = P_4 = -\frac{m \cdot g \cdot l_2}{2 \cdot l_0} \quad (4.17.)$$

$$P_2 = P_3 = \frac{m \cdot g \cdot l_2}{2 \cdot l_0} \quad (4.18.)$$

$$P_{1T} = P_{4T} = \frac{m \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_0} \quad (4.19.)$$

$$P_{2T} = P_{3T} = -\frac{m \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_0} \quad (4.20.)$$

Tabulka 20: Hodnoty statického zatížení při stálé rychlosti

Radiální zatížení - stálá rychlost		
$P1 = P4$	-194,3	N
$P2 = P3$	194,3	N
Boční (laterální) zatížení - stálá rychlost		
$P1T = P4T$	77,7	N
$P2T = P3T$	-77,7	N

Kombinované zatížení P_E je opět prostým součtem v absolutní hodnotě radiálního a laterálního zatížení v jednotlivých vozících. Pro všechny vozíky vychází stejné zatížení a to 272 N.

Zatížení při akceleraci:

$$P_{1A} = P_{4A} = -\frac{m \cdot (g + a) \cdot l_2}{2 \cdot l_0} \quad (4.21.)$$

$$P_{2A} = P_{3A} = \frac{m \cdot (g + a) \cdot l_2}{2 \cdot l_0} \quad (4.22.)$$

$$P_{1TA} = P_{4TA} = \frac{m \cdot (g + a) \cdot l_3}{2 \cdot l_0} \quad (4.23.)$$

$$P_{2TA} = P_{3TA} = -\frac{m \cdot (g + a) \cdot l_3}{2 \cdot l_0} \quad (4.24.)$$

Kombinované zatížení pro akceleraci P_{AE} vychází pro všechny vozíky stejné 295 N. Kombinované zatížení pro deceleraci se počítá pomocí stejných vzorců jako pro akceleraci. Pouze se zrychlení místo přičítání odečítá a vychází P_{DE} 249 N. Nyní se dle následujícího vzorce vypočítá průměrné zatížení pro každý jednotlivý vozík:

Průměrné zatížení:

$$P_{Mi} = \sqrt[3]{\frac{P_{AEi}^3 l_{s1} + P_{Ei}^3 l_{s2} + P_{DEi}^3 l_{s3} + P_{AEi}^3 l_{s1} + P_{Ei}^3 l_{s2} + P_{DEi}^3 l_{s3}}{2 \cdot l_s}} \quad (4.25.)$$

Průměrné zatížení vozíků vychází 272,2 N, tato hodnota je užita pro výpočet životnosti.

Statická bezpečnost:

$$k_s = \frac{C_o}{P_{ei}} = \frac{38\,400}{272,2} = 141 [-] \quad (4.26.)$$

Vozíky lineárního vedení vyhovují statické bezpečnosti s koeficientem 141 [-].

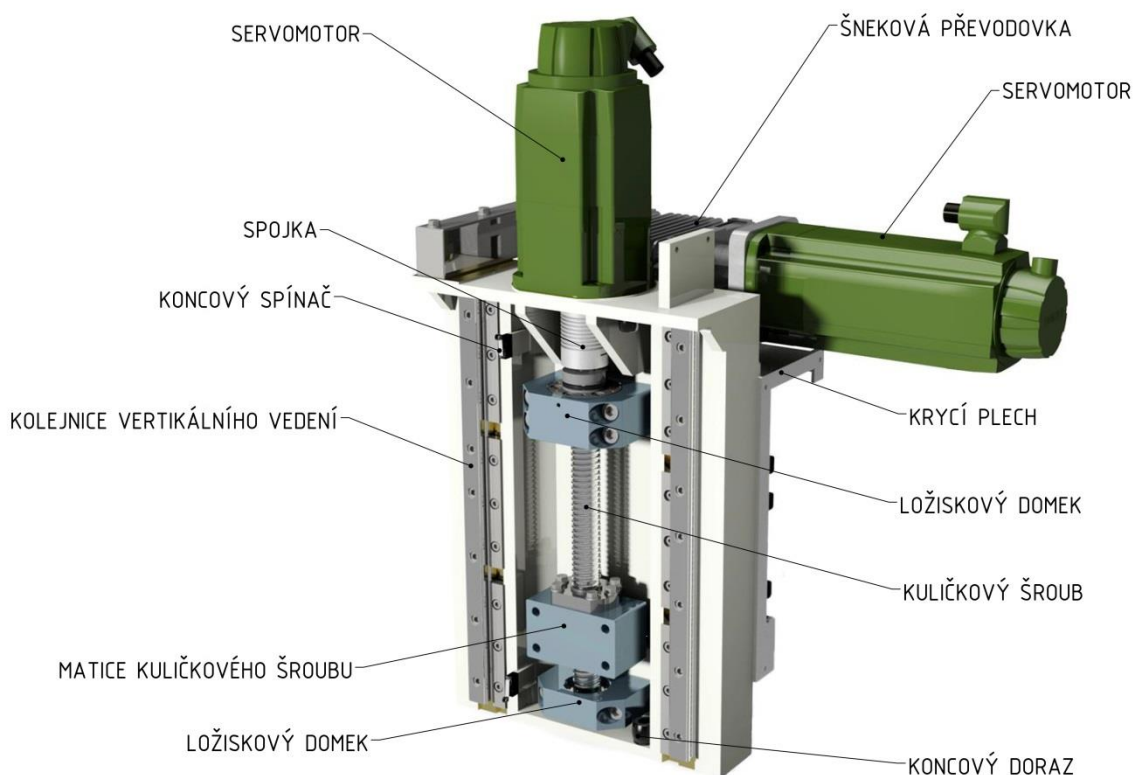
Životnost:

$$L_i = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{mi}} \right)^3 \cdot 50 \quad (4.27.)$$

Vzhledem ke stejnému kombinovanému zatížení vychází minimální životnost pro všechny vozíky zvoleného lineárního vedení SHS20CQZDD stejná a to 8 144 851 km. Po přepočtu na životnost v hodinách při dané rychlosti vychází životnost 814 485 hod. Vozíky splňují podmínku minimální životnosti 20 000 hod.

Jedním z důvodů vysoké životnosti je vhodné umístění vřetena, jehož těžiště je situováno ve vertikálním směru symetricky mezi kolejnice lineárního vedení, čímž jsou minimalizovány klopné momenty na ně působící.

Na následujícím obrázku jsou viditelné křížové saně s horizontálním vedením. Ostatní součásti zobrazeny na obrázku jsou popsány v dalších částech této práce.



Obrázek 22: Křížové saně s vertikálním vedením

4.8. Pohybový šroub vertikální

Pro pohyb ve vertikálním směru připadají v úvahu vzhledem k požadovaným parametrům varianty s trapézovým šroubem či šroubem kuličkovým. Dle následujících výpočtů bude zvoleno vhodnější řešení.

4.8.1. Trapézový šroub

Jeho výhodou je samosvornost, která je u této aplikace vhodná. Dalším příznivým aspektem je nízká posuvová rychlost křížových saní ve vertikálním směru, která vyhovuje trapézovému šroubu. Trapézový šroub je také méně náchylný na nečistoty, avšak jeho účinnost je nízká.

Tabulka 21: Tabulka hodnot pro trapézový šroub

Rychlost posuvu	v_{posuv}	10	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Jmenovitý průměr	d_j	22	mm
Střední průměr	d_s	19,5	mm
Stoupání	P_s	10	mm
Délka závitu v matici	H	800	mm
Hmotnost saní	m	103	kg
Koeficient tření	μ	0,08	–
Úhel stoupání	α	30	°
Dovolený tlak	p_d	5	MPa
Bezpečnost	k	1,5	–
Délka posuvu	l_s	150	mm
Rychlost dovolená	v_{dov}	80	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

Parametry a postup výpočtu jsou dle katalogu KŠK [14].

Účinnost trapézového šroubu:

$$\eta = \frac{\cos \alpha - \mu \cdot \tan \frac{P_s}{\pi \cdot d_s}}{\cos \alpha + \mu \cdot \cotg \frac{P_s}{\pi \cdot d_s}} = \frac{\cos 30^\circ - 0,08 \cdot \tan \frac{10}{\pi \cdot 19,5}}{\cos 30^\circ + 0,08 \cdot \cotg \frac{10}{\pi \cdot 19,5}} \cdot 100 = 53 \% \quad (4.28.)$$

Účinnost konkrétního trapézového šroubu je pouze 53 %. Je tedy zřejmé, že posuv bude zatížen velkými energetickými ztrátami.

Otáčky pohybového šroubu:

$$n = \frac{v_{posuv}}{P_s} = \frac{10}{0,01} = 1000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4.29.)$$

$$n_{max} = \frac{v_{dov} \cdot 1000}{d_j \cdot \pi} = \frac{80 \cdot 1000}{22 \cdot \pi} = 1157,5 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4.30.)$$

Tlak:

$$p = \frac{F}{0,75 \cdot \pi \cdot d_m \cdot (d_j - d_s) \cdot \frac{H}{P_s}} = \frac{1010,4}{0,75 \cdot \pi \cdot 19,5 \cdot (22 - 19,5) \cdot \frac{800}{10}} = 0,1 \text{ MPa} \quad (4.31.)$$

$$p < p_d \quad (4.32.)$$

Pohybový šroub se jmenovitým průměrem 22 mm splňuje jak podmínku maximálních otáček, tak i tlakovou podmínku.

Krouticí moment:

$$M_k = \frac{F \cdot \frac{d_j}{2} \cdot (P + \pi \cdot \mu \cdot d_j)}{\pi \cdot d_j - \mu \cdot P_s} = \frac{1471,5 \cdot \frac{22}{2} \cdot (10 \cdot \pi \cdot 0,08 \cdot 22)}{\pi \cdot 22 - 0,08 \cdot 10} = 3,68 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.33.)$$

Nutný krouticí moment, který musí vyvinout servomotor je bez bezpečnostního koeficientu 3,68 N·m.

4.8.2. Kuličkový šroub

Kuličkový šroub má výrazně vyšší účinnost než šroub trapézový a lze vymezit vůle, avšak je dražší a náchylnější na nečistoty.

Tabulka 22: Tabulka hodnot pro kuličkový šroub

Rychlost posuvu	v_{posuv}	10	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Jmenovitý průměr	d_j	25	mm
Délka šroubu	l_s	285	mm
Doba zrychlení	t_a	0,5	s
Stoupání	P_s	5	mm
Hmotnost saní	m	103	kg
Bezpečnost	k	1,5	–
Délka posuvu	l_s	150	mm
Součinitel uložení	f_v	0,5	–
Součinitel uložení	f_n	15	–

Výpočet otáček pohybového šroubu:

$$n_m = \frac{1000 \cdot v_{posuv}}{P_s} = \frac{1000 \cdot 10}{5} = 2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4.34.)$$

Při zadané posuvové rychlosti a stoupání jsou otáčky kuličkového šroubu $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

Maximální otáčky:

$$n_{kr} = \frac{d_0 \cdot 10^7 \cdot f_n}{l_s^2} = \frac{25 \cdot 10^7 \cdot 15}{285^2} = 46\,168 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4.35.)$$

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_{kr} = 0,8 \cdot 46168 = 36\,934 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4.36.)$$

Dle předchozích výpočtů je zřejmé, že hodnota maximálních otáček nebude překročena.

Maximální axiální zatížení (vzpěr):

$$Q_{kr} = \frac{\pi^3 \cdot 500 \cdot d_0^4}{f_v \cdot l_s^2} = \frac{\pi^3 \cdot 500 \cdot 25^4}{0,5 \cdot 285^2} = 151\,715 \text{ N} \quad (4.37.)$$

$$F_{amax} = 0,33 \cdot Q_{kr} = 0,33 \cdot 151715 = 50\,078 \text{ N} \quad (4.38.)$$

Maximální zatížení na vzpěr je $50\,078 \text{ N}$, podle následující tabulky zjistíme, zdali je to hodnota dostatečná.

Výpočet životnosti kuličkového šroubu

Výpočet je dle katalogu firmy THK, jenž vyrábí mimo jiné kuličkové šrouby [15].

Tabulka 23: Rozklad sil při pohybu saní

Akcelerace vzhůru	F_{a1}	1132,6	N
Rovnoměrný pohyb vzhůru	F_{a2}	1098,3	N
Decelerace vzhůru	F_{a3}	1064	N
Akcelerace dolů	F_{a4}	895,3	N
Rovnoměrný pohyb vzhůru	F_{a5}	929,6	N
Decelerace dolů	F_{a6}	963,3	N

Maximální zatížení dle předchozí tabulky vzniká při akceleraci směrem vzhůru a je rovno $1132,6 \text{ N}$. Není tedy překročeno maximální zatížení na vzpěr.

Průměrné zatížení:

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{1}{2 \cdot l_s} (F_{a1}^3 l_1 + F_{a2}^3 l_2 + F_{a3}^3 l_3 + F_{a4}^3 l_4 + F_{a5}^3 l_5 + F_{a6}^3 l_6)} = \quad (4.39.)$$

$$= 824,8 \text{ N}$$

Průměrné zatížení bylo vypočteno ze zatížení, kterým šroub během cyklu odolává a vzdálenosti, po kterou je toto zatížení aplikováno.

Tabulka 24: Parametry kuličkového šroubu K 20×5

Statická únosnost	C_0	42070	N
Dynamická únosnost	C_d	20100	N
Účinnost	η	0,92	–
Koeficient zatížení	f_w	1,5	–

Životnost v otáčkách:

$$L = \left(\frac{C_d}{f_w \cdot F_m} \right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{20100}{1,5 \cdot 824,8} \right)^3 \cdot 10^6 = 4,288 \cdot 10^9 \text{ot.} \quad (4.40.)$$

Dle předchozího vzorce byla vypočítána životnost v otáčkách, která je užitá v následujícím výpočtu, podle kterého lze usoudit, zda daný pohybový šroub vyhovuje či nikoliv.

Životnost v hodinách:

$$L_h = \frac{L}{60 \cdot n_m} = \frac{4,288 \cdot 10^9}{60 \cdot 2000} = 35\,736,2 \text{ hod.} \quad (4.41.)$$

V rámci zadaných parametrů uvedených výše splňuje šroub K 20×5 požadovanou dobu životnosti 20 000 hodin.

Krouticí moment:

$$M_k = \frac{F_{amax} \cdot P_s}{2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot 1000} = \frac{1132,6 \cdot 5}{2 \cdot \pi \cdot 0,92 \cdot 1000} = 0,959 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.42.)$$

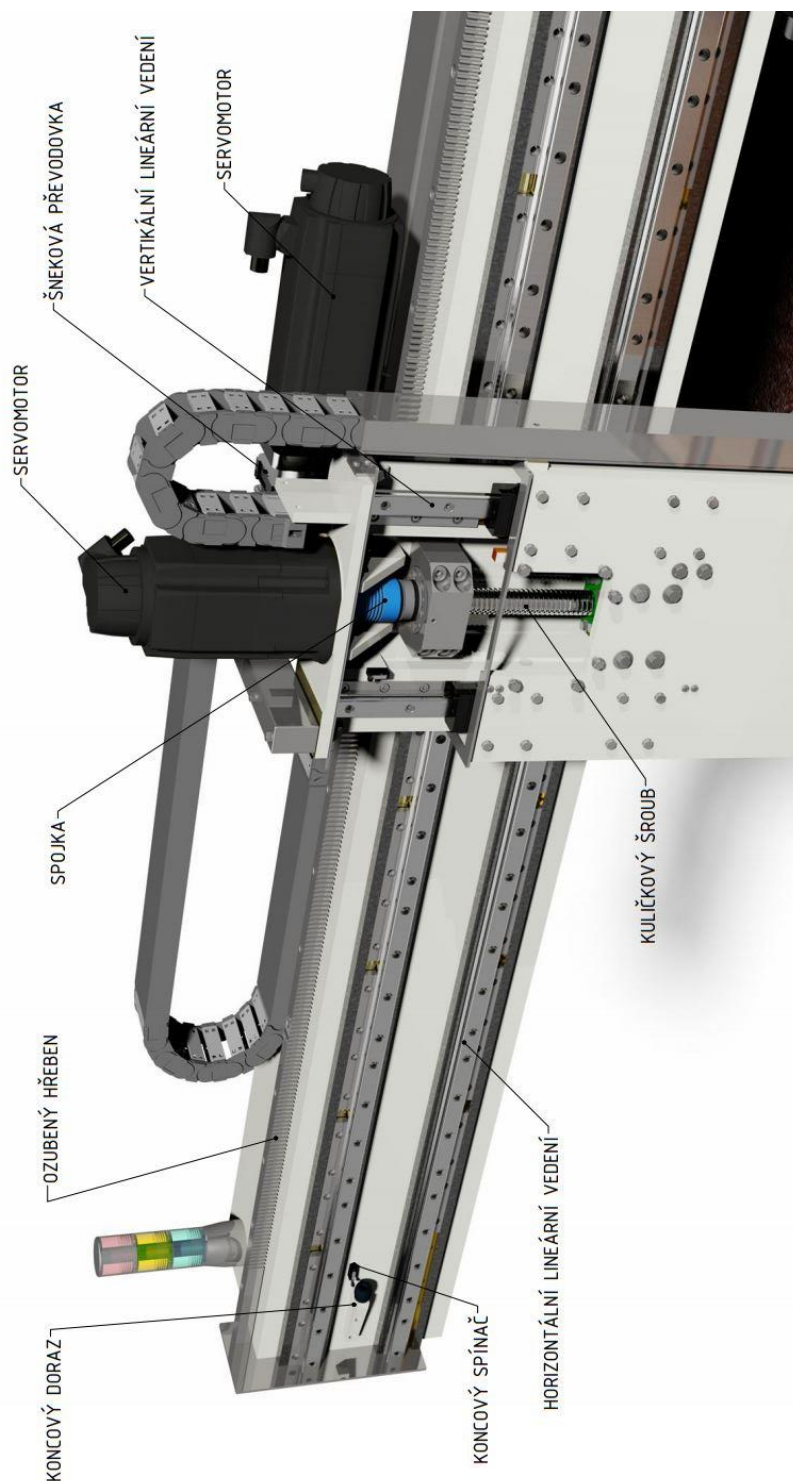
Krouticí moment je v případě užití kuličkového šroubu 0,959 N·m, což je hodnota nižší než v případě užití trapézového šroubu. Je možné použít samotný servomotor napřímo připojený pomocí spojky KTR Toolflex 9 ke kuličkovému šroubu bez použití převodovky.

Návrh servomotoru pro vertikální pohyb:

Dle krouticího momentu spočítaného pomocí rovnice 4.42 a jmenovitých otáček je vybrán servomotor 1FK7042-2AC71 z katalogu firmy Siemens, jehož parametry jsou vypsané v tabulce 18, jelikož se jedná o stejný typ motoru. Motor je opět vybaven brzdou.

Na obrázku 23 na následující straně je vidět rameno pily s křížovými saněmi po demontáži krycích měchů a montážního okénka. Pro případ poruchy jsou na rameni i na křížových saních umístěny koncové snímače a koncové dorazy. Tyto bezpečnostní

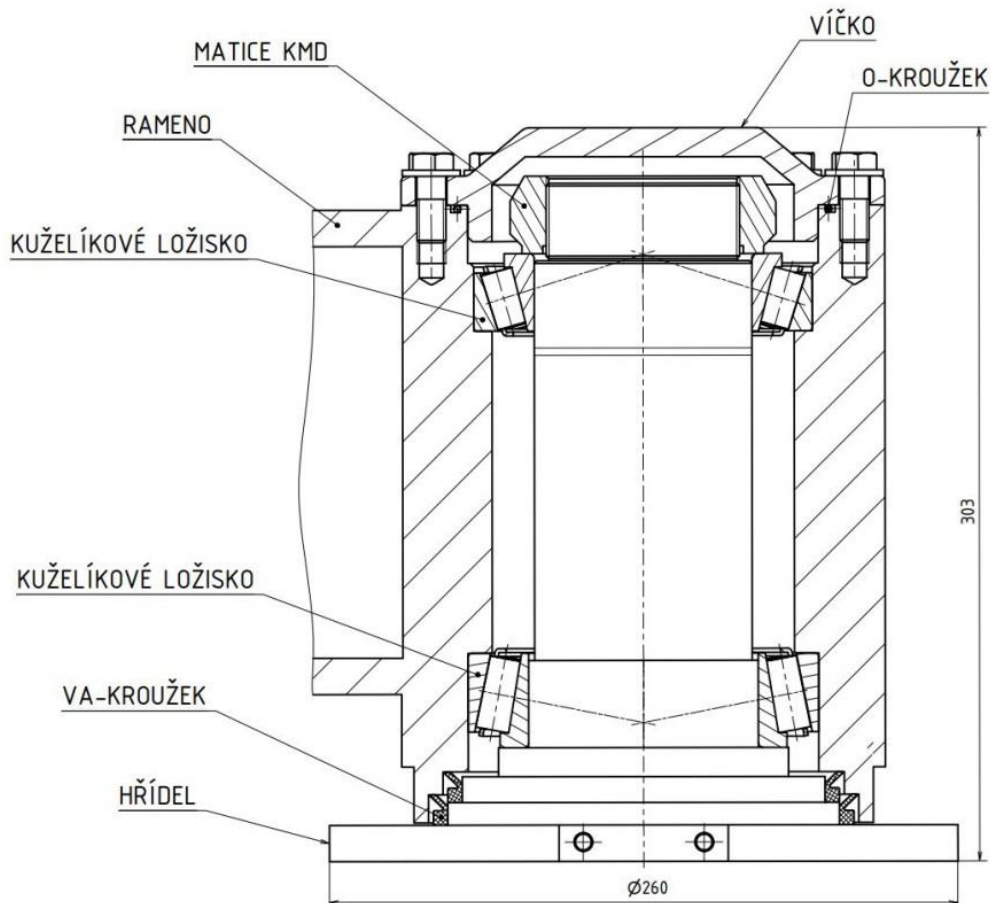
prvky eliminují možné škody v případě srážky. Dále jsou na obrázku patrné dva energetické řetězy, které umožňují přívod kabelů a hadic na křížové saně.



Obrázek 23: Rameno pily s křížovými saněmi po demontáži krycích měchů

4.9. Natáčení ramene v ose C

Uložení v ose C je realizováno pomocí dvojice kuželíkových ložisek montovaných ve dvojici do O, tak jak je vidět na obrázku 24. Ložiskový prostor je nutné řádně utěsnit vzhledem k vysokému stupni znečištění od řezného procesu. K tomuto účelu slouží v horní části O-kroužek a ve spodní části dvojice VA-kroužků.



Obrázek 24: uložení ložisek v ose C

Mazání ložisek je provedeno při montáži a pak při každé servisní prohlídce manuálně.

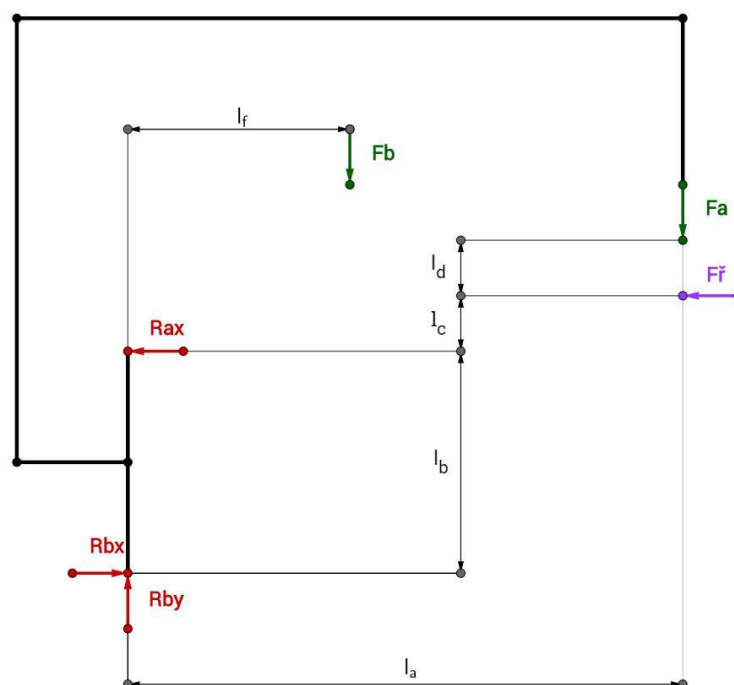
Výpočet statického zatížení ložisek

Vzhledem k charakteru pohybu, který nastává pouze při změnách poloh řezů, je počítáno pouze statické zatížení ložisek. K výpočtu statického zatížení je nutné znát síly vzniklé od vlastní tíhy. Ve výpočtu je zahrnuta řezná síla, kde došlo ke zjednodušení a to zanedbáním rozkladu a užitím celé síly ve vodorovném směru.

Tabulka 25: Výčet sil a délkových rozměrů na rameni

Řezná síla	$F_{\bar{r}}$	150	N
Síla od vlastní tíhy křížových saní	F_A	1600	N
Síla od vlastní tíhy ramene	F_B	2900	N
Délkový rozměr	l_a	1400	mm
Délkový rozměr	l_b	150	mm
Délkový rozměr	l_c	60	mm
Délkový rozměr	l_f	400	mm

Představu o působení sil si lze udělat z následujícího schématu, které znázorňuje boční pohled na rameno pily.



Obrázek 25: Schématické znázornění sil a reakcí v ložiskách působících na rameno pily

Dle výpočtů v programu Excel vycházejí následující velikosti reakcí:

$$R_{ax} = 22\,607 \text{ N}$$

$$R_{bx} = 4500 \text{ N}$$

$$R_{by} = 22\,756 \text{ N}$$

Následuje výpočet ekvivalentních sil dle katalogu SKF:

$$F_{aA} = 5138 \text{ N}$$

$$F_{aB} = 9638 \text{ N}$$

Ekvivalentní statické zatížení ložiska je vypočítán podle následující rovnice:

$$P_o = 0,5 \cdot F_R + Y_0 \cdot F_a \quad (4.43.)$$

$$P_{oA} = 17\,983 \text{ N}$$

$$P_{oB} = 21\,980 \text{ N}$$

Což je v obou případech méně, než je statická únosnost ložisek, která je uvedena i se všemi ostatními údaji nutnými pro výpočet v textové příloze.

Statická bezpečnost:

$$K_A = 19,7 \text{ [-]}$$

$$K_B = 17,1 \text{ [-]}$$

Jak natáčení vypadá, je patrné z obrázku 26. Na tomto obrázku je také viditelná aretační páka GN 843 od firmy Eles+Ganter, která umožňuje aretovat rameno ve třech polohách. Aretace je prováděna manuálně.



Obrázek 26: Pohled zezadu na natáčení

4.10. Naklápění vřetene v ose B

Mechanismus natáčení je viditelný na obrázku 27 a jeho detail je na obrázku 28.



Obrázek 27: Naklopné vřeteno v řezu

Aretace vřetene je možná v tomto návrhu pouze ve dvou polohách (0° a 45°), což vyhovuje zadání. Je tedy pouze 6 možných poloh řezů, pro které jsou předpřipraveny drážky v rolnách. Tyto drážky umožňují prořez řezaným kamenem o cca 1 mm, díky kterému má kámen po seříznutí lepší stav hran. Tento problém by bylo možné vyřešit použitím dřevěné podkladové desky v místech řezů, která by se po určité době musela vyměnit. Toto řešení je u některých výrobců aplikováno. Vyvstal by však nový problém s posuvem kamene, který dle následujícího výpočtu váží až 567 kg.

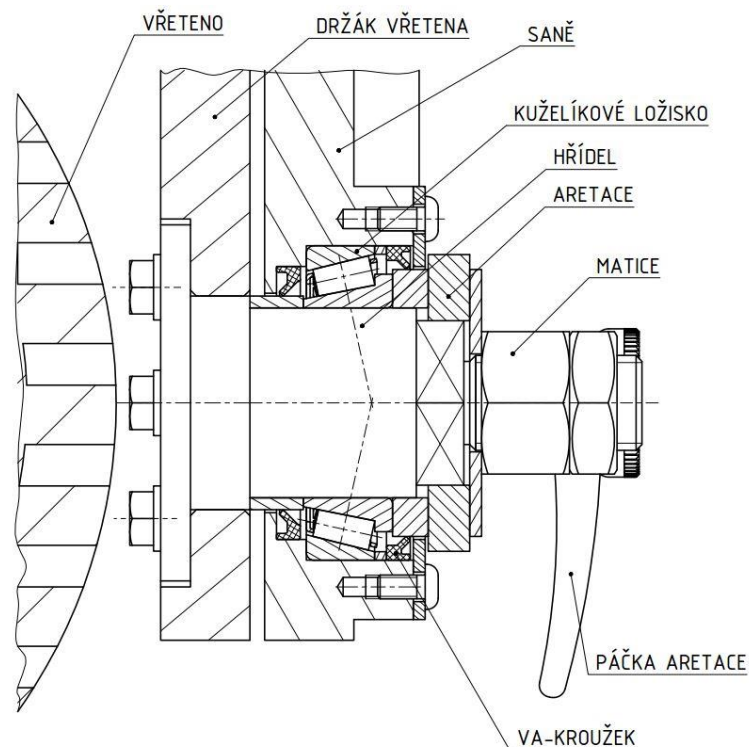
$$V_{obrobku} = 0,1 \cdot 0,7 \cdot 3 = 0,21 \text{ m}^3 \quad (4.44.)$$

$$\rho_{mramor, \text{ žula}} = 2,6 - 2,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.45.)$$

$$m = 0,21 \cdot 2,7 \cdot 10^3 = 567 \text{ kg} \quad (4.46.)$$

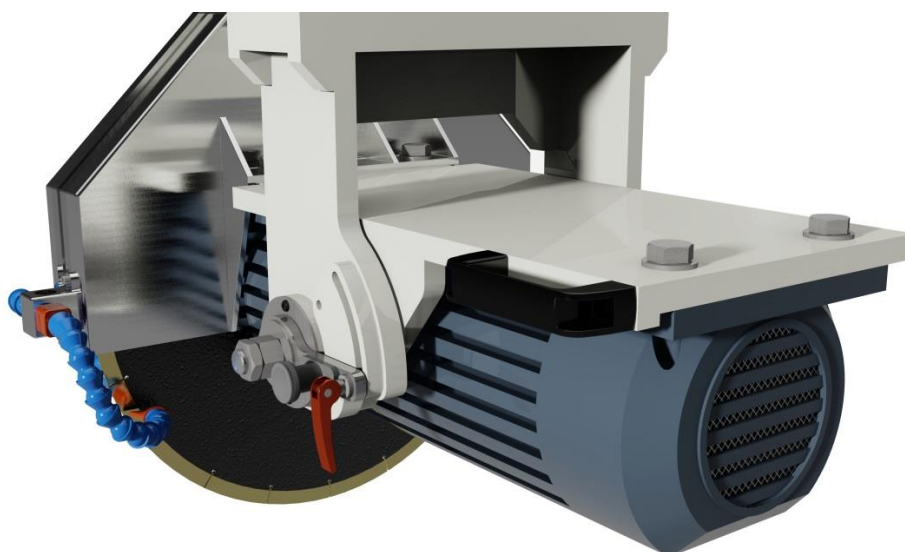
Dalším možným řešením je použít pásový dopravník či zkonstruovat mechanismus, který by rolny zasouval ve vertikálním směru pod úroveň dřevěných desek před každým řezem, tak jak to používá například firma Nuova Mondial Mec u pily Manta poker 3500 [16]. Avšak z důvodu zachování jednoduchosti celého řešení bylo využito systému drážek.

Pro naklápění vřetene bylo užito dvojice kuželíkových ložisek montovaných do O, která jsou utěsněna pomocí dvojice VA-kroužků. Mazání ložisek je provedeno při montáži a následně při servisních údržbách.



Obrázek 28: Naklápění vřetena v ose B

Pohled na vřeteno s naklápěcím mechanismem na obrázku 29, kde je v levé části viditelná kloubová hadice pro přívod řezné kapaliny uchycená na krytu kotouče.



Obrázek 29: Vřeteno s naklápěcím mechanismem

Na obrázku 30, který je z pohledu od obsluhy, si lze udělat představu o celkovém rozmístění jednotlivých částí pily.



Obrázek 30: Celkový pohled na stroj s nakloněným a natočeným vřetenem

5. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem polohovací jednotky vřetene kotoučové pily na kámen. V rešeršní části je shrnuta situace na světovém trhu v daném segmentu zarážkových pil. Jednotlivé pily jsou rozděleny do několika kategorií dle možných řezných pohybů. Z průzkumu vyplývá, že počet pil, které zvládají natočené i naklonené řezy, je minimální ve světovém měřítku a v České republice dokonce takovýto stroj žádná firma nevyrobí. Pro firmu Kaspé je tudíž určitě zajímavou možností se proti většině konkurence odlišit a nabízet něco navíc.

Po načerpání znalostí z rešeršní části bylo navrženo několik konstrukčních variant, které se odlišovaly především v umístění osy rotace, která umožňuje natáčení. Po rozvaze nad klady a zápory jednotlivých variant z hlediska konstrukce, ale například i obsluhy, byla vybrána jedna z variant, která byla dále rozpracována.

Tato varianta vytváří zkrácený rám tvaru C, který je připojen k pile za dopravníkem. Pod dopravníkem je umístěna vana na zachycování řezné kapaliny.

Zvolená varianta byla vymodelována pomocí 3D programu Inventor. Vřeteno bylo zvoleno od firmy Saccardo SBC 76 ST C/4-2, které má výkon 4 kW. Bylo nutné vymodelovat kryt kotouče, na kterém jsou umístěny kloubové hadice pro přívod řezné kapaliny. Vřeteno je uchyceno pomocí desky ke křížovému saním zhruba v místech jeho těžiště. V naklápěcím mechanismu je dvojice předepnutých kuželíkových ložisek. Ovládání naklonění je prováděno manuálně a lze ho aretovat ve dvou polohách.

Pohyb v osách Y a Z je obstaráván křížovými saněmi. Pro pohyb v ose Y byl zvolen hřeben s pastorkem, který je přes šnekovou převodovku od firmy Güdel napojen na servomotor od firmy Siemens. Pro vertikální posuv je užito kuličkového šroubu, který je pomocí spojky připojen na servomotor. Pro jednotlivé komponenty byly provedeny návrhové a kontrolní výpočty. Křížové saně se pohybují v obou osách po lineárním vedení, které bylo dimenzováno dle výpočtu.

Rotační uložení v ose C je situováno za dopravníkem osazeným rolnami a je realizováno pomocí dvojice kuželíkových ložisek montovaných ve dvojici do tandemu zády k sobě. Ovládání je manuální a aretace je možná ve třech polohách.

Dále byla vytvořena částečná výkresová dokumentace vybraných částí stroje, která obsahuje výkres sestavy a výkres rotačního uložení v ose C.

6. SEZNAMY

6.1. Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma pohybů stroje.....	10
Obrázek 2: Kasper - Carbo 4 [1]	12
Obrázek 3: Pedrini – M739 [2]	13
Obrázek 4: Nezakrytovaná M739 [2].....	14
Obrázek 5: Bombiere & Venturi – IBV/600 M1-P [3]	15
Obrázek 6: IBV/600 M2-P se dvěma vřeteny [3]	16
Obrázek 7: Konmak – BK 950 [4]	17
Obrázek 8: Nuova Mondial Mec – Scorpione [5]	19
Obrázek 9: Scorpione detail naklápění [5]	20
Obrázek 10: M. Kolb - MKA plus [6].....	21
Obrázek 11: Naklápění ramene MKA plus [6]	22
Obrázek 12: Burkhardt-Hensel - WLS 500 [7]	23
Obrázek 13: Varianta 1 při pohledu zepředu	26
Obrázek 14: Schéma natáčení při umístění rotačního uložení za dopravníkem.....	27
Obrázek 15: Varianta 2 při pohledu zezadu	28
Obrázek 16: Varianta 3 při pohledu zezadu	29
Obrázek 17: Řezný kotouč Black2 od firmy Zenesis.....	30
Obrázek 18: Rozklad sil vznikajících při sousledném obrábění [15].....	32
Obrázek 19: Motor Saccardo SBC 76 [9]	32
Obrázek 20: Schéma instalace vedení [11]	33
Obrázek 21: Vertikální vedení [11].....	37
Obrázek 22: Křížové saně s vertikálním vedením	39
Obrázek 23: Rameno pily s křížovými saněmi po demontáži krycích měchů	44
Obrázek 24: uložení ložisek v ose C	45
Obrázek 25: Schématické znázornění sil a reakcí v ložiskách působících na rameno pily.....	46
Obrázek 26: Pohled zezadu na natáčení	47
Obrázek 27: Naklopané vřeteno v řezu.....	48
Obrázek 28: Naklápění vřetena v ose B.....	49
Obrázek 29: Vřeteno s naklápěcím mechanismem	49
Obrázek 30: Celkový pohled na stroj s naklopaným a natočeným vřetenem	50

6.2. Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry dle zadání.....	10
Tabulka 2: Kasper – Carbo 4.....	12
Tabulka 3: Pedrini – M739/M740.....	14
Tabulka 4: Bombiere & Venturi – IBV/600 M1-P	16
Tabulka 5: Konmak – BK 950	18
Tabulka 6: Nuova Mondial Mec – Scorpione Basic	20
Tabulka 7: M. Kolb - MKA plus.....	22
Tabulka 8: Burkhardt-Hensel - WLS 500.....	23
Tabulka 9: Přehledová tabulka modelů pil (část I)	24
Tabulka 10: : Přehledová tabulka modelů pil (část II)	25

Tabulka 11: Příklady řezných kotoučů v dané kategorii.....	30
Tabulka 12: Parametry pro výpočet řezných sil	31
Tabulka 13: Motor Saccardo SBC 76	32
Tabulka 14: Hodnoty pro výpočet lineárního vedení	33
Tabulka 15: Radiální a laterální zatížení	34
Tabulka 16: Parametry pro návrh ozubeného hřebenu a pastorku	35
Tabulka 17: Parametry šneková převodovky Güdel HPG-045 pro $n \leq 500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	36
Tabulka 18: Parametry servomotoru 1FK7-2AC71	36
Tabulka 19: Parametry pro vertikální vedení.....	37
Tabulka 20: Hodnoty statického zatížení při stálé rychlosti	38
Tabulka 21: Tabulka hodnot pro trapézový šroub.....	40
Tabulka 22: Tabulka hodnot pro kuličkový šroub.....	41
Tabulka 23: Rozklad sil při pohybu saní.....	42
Tabulka 24: Parametry kuličkového šroubu K 20×5	43
Tabulka 25: Výčet sil a délkových rozměrů na rameni.....	46

4.3. Seznam příloh

4.3.1. Seznam textových příloh

- Katalogový list servomotoru Siemens 1FK7042
- Katalogový list šnekové převodovky Güdel HPG-045
- Katalogový list kuželíkových ložisek SKF užitých v otáčení osy C
- Katalogový list lineárního vedení THK SHS-C/LC

6.3.2. Seznam výkresové dokumentace

- Výkres celkové sestavy pily (2 listy) CCS
- Výkres sestavy otáčení C CCS-3-01
- Výkres hřídele C (2 listy) CCS-3-01-004
- Výkres hřídele CCS-3-01-004-1
- Výkres příruby CCS-3-01-004-2

6.3.3. Elektronické přílohy (CD)

- Celá práce (pdf)
- 3D model pily (STEP)
- 3D model pily (IAM – pro Inventor 2015)
- Přehledová tabulka pil
- Výpočet řezných sil (Excel)
- Výpočet horizontálního vedení (Excel)
- Výpočet ozubeného hřebenu a pastorku (Excel)
- Výpočet vertikálního vedení (Excel)
- Výpočet pohybového šroubu (kuličkový a trapézový) (Excel)
- Výpočet ložisek v ose C (Excel)

6.4. Seznam použité literatury a odkazy

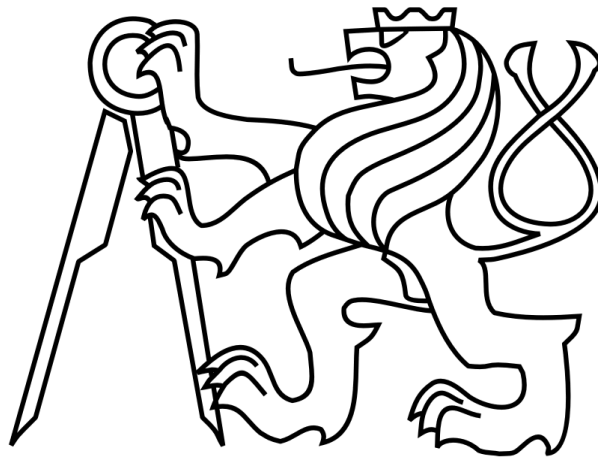
- [1]. Carbo 4. *Kaspe*. [Online] [Citace: 15. říjen 2015.]
<http://www.kaspe.cz/cz/rezani-kamene/zkracovaci-pily/as400/>.
- [2]. Pedrini M739 M740. *Janssen-Steintechnik*. [Online] [Citace: 1. prosinec 2015.]
<http://www.janssen-steintechnik.de/pedrini-m739-m740/>.
- [3]. IBV/600 M1-P. *BOMBIERI & VENTURI*. [Online] [Citace: 1. listopad 2016.]
<http://www.bombieriventuri.it/scheda.asp?idprod=48&idpdrerif=17>.
- [4]. BK 950 – Stone length cutting machine. *Konmak*. [Online] [Citace: 15. únor 2016.]
<http://www.konmak.com/product-detail/bk950-boy-kesme-makinasi/>.
- [5]. Scorpione. *Nuova Mondial Mec*. [Online] [Citace: 1. prosinec 2015.]
http://www.nuovamondialmec.com/media/com_form2content/documents/c1/a291/f58/scorpione%20web.pdf.
- [6]. Cross cut saw MKA plus. *M.Kolb*. [Online] [Citace: 10. duben 2016.]
<http://www.steinbearbeitung.de/>.
- [7]. Baseboard Sawing Machine. *Burkhardt-Hensel*. [Online] [Citace: 12. listopad 2016.]
<http://www.burkhardt-hensel.de/>.
- [8]. **A. Ersoy, U. Atici**. Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different. *Diamond and Related Materials*. 2004, 13, stránky 22-37.
- [9]. Saccardo. *E-motors SBC. Katalog výrobků*. [Online] 2011. [Citace: 6. říjen 2015.]
<http://www.saccardo.it/eng/prodotti.php?pagina=prodotti>.
- [10]. Dahlander pole changing motor. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 16. červen 2016.]
https://en.wikipedia.org/wiki/Dahlander_pole_changing_motor.
- [11]. LM Guide general Catalog. *THK*. [Online] [Citace: 5. únor 2016.]
<http://www.thk.com/>.
- [12]. High Performance Angle Gearboxes. *Gudel*. [Online] [Citace: 2016. červen 12.]
<http://www.gudel.com/products/gearboxes/high-performance-angle-gearboxes>.
- [13]. SINAMICS S110 / S120, Configuration Manual. *Siemens*. [Online] 10 2011. [Citace: 5. květen 2016.]
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/345/55379345/att_68428/v1/1FK7_1011_eng_en-US.pdf.
- [14]. Produktový katalog. *KSK Precise Motion*. [Online] [Citace: 25. březen 2016.]
<http://www.ksk-pm.cz/ke-stazeni/>.
- [15]. Examples of Selecting a Ball Screw. *THK*. [Online] [Citace: 15. červen 2016.]
https://tech.thk.com/en/products/pdf/en_b15_069.pdf.

- [16]. Manta Poker Auto. *Nuova Mondial Mec*. [Online] [Citace: 15. červen 2016.]
https://www.youtube.com/watch?v=A4eAZh4p5yA&index=1&list=PLsxQp_nsjxKEoZ72xVog8Twz7yVg5x5ba.
- [17]. **Němec, Dobroslav.** *Strojírenská technologie III.: Strojní obrábění*. Praha : SNTL, 1982.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

**Návrh polohovací jednotky vřetene kotoučové zkracovací pily na kámen
pro kotouč 400 mm**

Katalogový list servomotoru Siemens 1FK7042

Table 4- 11 1FK7042 Compact

Technical data	Code	Unit	-2AC71
Configuration data			
Rated speed	n_N	rpm	2000
Rated torque (100 K)	$M_N (100 K)$	Nm	2.8
Rated current (100 K)	$I_N (100 K)$	A	1.55
Static torque (100 K)	$M_0 (100 K)$	Nm	3.0
Stall current (100 K)	$I_0 (100 K)$	A	1.6
Static torque (60 K)	$M_0 (60 K)$	Nm	2.5
Stall current (60 K)	$I_0 (60 K)$	A	1.3
Optimum operating point			
Optimum speed	n_{opt}	rpm	2000
Optimum power	P_{opt}	kW	0.59
Limit data			
Max. permissible speed (mech.)	$n_{max mech}$	rpm	9000
Maximum torque	M_{max}	Nm	10.5
Maximum current	I_{max}	A	5.6
Motor data			
Pole number	2p		8
Torque constant (100 K)	k_T	Nm/A	1.865
Voltage constant (at 20 °C)	k_E	V/1000 rpm	122.0
Winding resistance (at 20 °C)	R_{ph}	Ω	8.6
Rotating field inductance	L_D	mH	64
Electrical time constant	T_{el}	ms	7.4
Mechanical time constant	T_{mech}	ms	2.15
Thermal time constant	T_{th}	min	30
Moment of inertia	J_{Mot}	kgm ²	0.29·10 ⁻³
Shaft torsional stiffness	C_t	Nm/rad	15500
Weight without brake	m_{Mot}	kg	4.6
Motor data with integrated brake			
Moment of inertia with brake	$J_{Mot Br}$	kgm ²	0.32·10 ⁻³
Shaft torsional stiffness with brake	$C_t Br$	Nm/rad	11400
Weight with brake	$m_{Mot Br}$	kg	5.3
Recommended Motor Module 6SL312□-□TE13-0AA□			
Rated converter current	$I_N Inv$	A	3
Maximum converter current	$I_{max Inv}$	A	6
Max. torque at $I_{max Inv}$	$M_{max Inv}$	Nm	10.5
Maximum permissible speed (converter)	$n_{max Inv}$	rpm	4750

The rated data are valid for a 600 V DC link voltage.

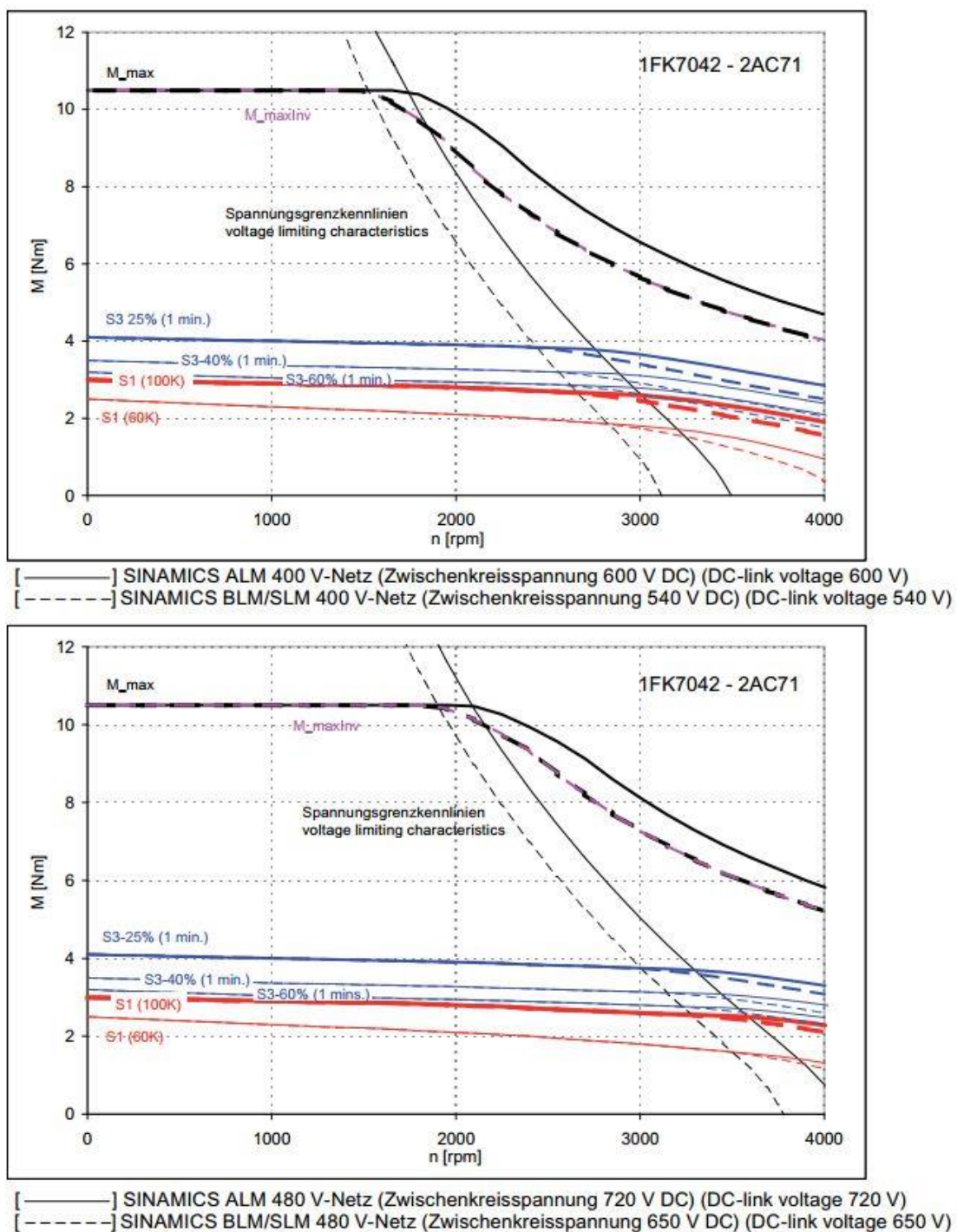


Figure 4-12 1FK7042-2AC71

Katalogový list šnekové převodovky Güdel HPG-045

GUDEL
 Performance

HPG 045 AI A2, A3 BI B2 B3 High Performance Angle Gearboxes

Ratio	i	2	3	4	5	6	8	10	13.33	16	24	30	47	60
Nominal torque as an output	T_{2N} [Nm]	52.7	73.9	83.9	86.5	70.8	81.7	75.5	73.9	75.0	77.9	54.5	79.4	54.5
	η [%]	88	88	87	86	85	82	79	75	71	63	59	50	43
	T_{2N} [Nm]	43.8	63.3	73.1	71.0	62.9	72.9	67.7	66.4	74.0	72.2	54.5	71.5	55.5
Efficiency	η [%]	89	89	88	87	86	84	81	77	73	65	60	53	45
	T_{2N} [Nm]	37.4	55.4	64.8	63.4	56.3	65.8	61.3	60.3	67.2	65.6	55.5	65.1	55.5
	η [%]	89	89	89	88	86	84	81	77	74	66	60	53	45
Nominal torque as an input	T_{1N} [Nm]	26.0	40.3	48.3	48.1	43.4	51.0	47.8	47.6	52.7	51.6	51.8	51.8	51.8
	η [%]	88	89	88	87	85	83	80	75	72	64	58	52	45
	T_{1N} [Nm]	20.0	31.6	38.5	38.7	35.2	41.6	39.2	38.8	43.3	42.5	42.3	42.3	42.7
Max. acceleration torque	T_{2A} [Nm]	16.2	26.0	32.0	32.4	29.6	35.2	32.2	32.0	36.8	36.1	36.4	36.0	36.4
	η [%]	85	86	85	84	81	79	75	70	66	58	51	46	40
	T_{2A} [Nm]	60	90	120	120	105	120	105	105	120	120	80	120	80
Emergency stop torque	T_{2E} [Nm]	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
	T_{2E} [Nm]	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
	T_{2E} [Nm]	<15	<12	<11	<11	<9	<8	<8	<8	<8	<8	<7	<7	<7
Max. input speed	n_{max} [rpm]	<10	<8	<7	<7	<6	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5	<5.5
	n_{max} [rpm]	1.6	2.8	3.6	4	4.3	4.5	4.9	5.3	5.5	5.8	5.5	6	5.5
	n_{max} [rpm]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Max. axial force ¹⁾ as an output	F_{2Ax} [N]	720	1000	1600	2200	2800	2900	3300	3700	3900	4700	4800	4800	4800
	F_{2Ax} [N]	700	820	1200	1400	1600	1600	1600	1600	1700	1800	2000	2100	2200
	F_{2Ax} [N]	45	53	76	91	110	100	110	110	110	130	140	140	140
Max. axial force ¹⁾ as an input	F_{1Ax} [N]	1600	980	860	1000	1300	1100	1300	1300	1300	1200	1200	1200	1200
	F_{1Ax} [N]	510	470	430	510	590	550	610	630	580	610	620	600	600
	F_{1Ax} [N]	148	84	62	52	46	41	38	36	36	35	34	34	34
Mass moment of inertia ²⁾	J_1 [kg·m ²]	191	128	106	95	90	84	82	80	79	78	78	77	77
	J_2 [kg·m ²]	191	128	106	95	90	84	82	80	79	78	78	77	77
	J_3 [kg·m ²]	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Service life	L_h [h]	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
	m [kg]	+40	+40	+40	+40	+40	+40	+40	+40	+40	+40	+40	+40	+40
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
Weight without motor components	m [kg]	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
Ambient temperature	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
Lubrication	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
Painting	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
	T [°C]	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50	-15 up to +50
Bearing forces	F_{21}	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	F_{22}	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	F_{23}	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75

Package

Output Flange including Bearing & Pinion			
Radius rigidity	C_1 [N/mm]	23000	
Speed	n [rpm]	1500	750 400 150 100
Max. radial force	F_{max} [N]	1900	2400 2900 3000 3500

1) Bearing forces: Values valid at duty cycle of 40% at a distance of 1.5mm from the end of the bearing.

HPG 045 AI A2, A3 BI B2 B3 High Performance Angle Gearboxes

Input

Output

Example HPG 045 A2

Detail 1

Detail 2

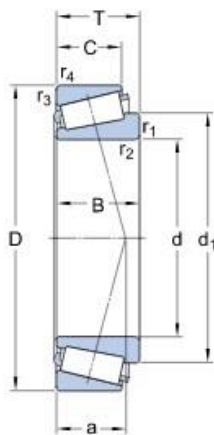
Footnotes:

- * Heterospecific gearbox dimensions
- Ød: Ø motor shaft [mm], Ø: Ø hole Ø [mm], M: Bore hole Ø or thread [mm], L: L: Shaft length [mm], Ø23: Ø23: Shaft length [mm]

Katalogový list kuželíkových ložisek SKF užitých v otáčení osy C

33018/Q

Dimensions



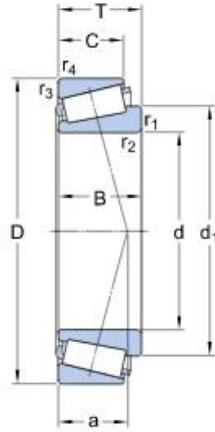
d	90	mm
D	140	mm
T	39	mm
$d_1 \approx$	114	mm
B	39	mm
C	32.5	mm
$r_{1,2}$ min.	2	mm
$r_{3,4}$ min.	1.5	mm
a	27	mm

Calculation data

Basic dynamic load rating	C	216	kN
Basic static load rating	C_0	355	kN
Fatigue load limit	P_u	39	kN
Reference speed		3200	r/min
Limiting speed		4500	r/min
Calculation factor	e	0.27	
Calculation factor	Y	2.2	
Calculation factor	Y_0	1.3	

33019/Q

Dimensions

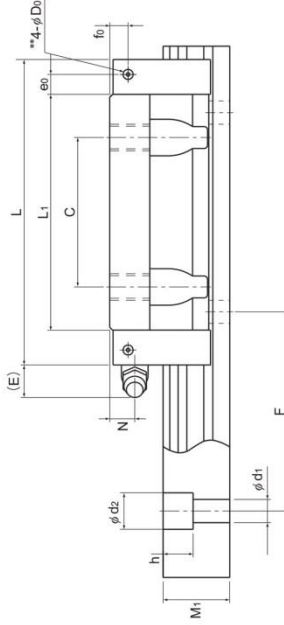
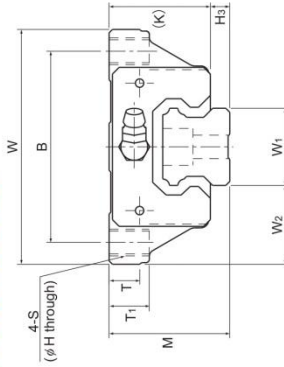


d	95	mm
D	145	mm
T	39	mm
d_1	\approx 118.7	mm
B	39	mm
C	32.5	mm
$r_{1,2}$	min. 2	mm
$r_{3,4}$	min. 1.5	mm
a	28	mm

Calculation data

Basic dynamic load rating	C	220	kN
Basic static load rating	C_0	375	kN
Fatigue load limit	P_u	40.5	kN
Reference speed		3200	r/min
Limiting speed		4300	r/min
Calculation factor	e	0.28	
Calculation factor	Y	2.1	
Calculation factor	Y_0	1.1	

Models SHS-C and SHS-LC



LM Guide

Model No.	Outer dimensions		LM block dimensions										Pitch hole for side nipple**		LM rail dimensions				Basic load rating				Static permissible moment kN·m*		Mass																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	M	W	B	C	S	H	L	T	T ₁	K	N	E	Grass nipple	e _s	f _s	D _s	Length†	C	C ₀	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₂	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₅	M ₁₆	M ₁₇	M ₁₈	M ₁₉	M ₂₀	M ₂₁	M ₂₂	M ₂₃	M ₂₄	M ₂₅	M ₂₆	M ₂₇	M ₂₈	M ₂₉	M ₃₀	M ₃₁	M ₃₂	M ₃₃	M ₃₄	M ₃₅	M ₃₆	M ₃₇	M ₃₈	M ₃₉	M ₄₀	M ₄₁	M ₄₂	M ₄₃	M ₄₄	M ₄₅	M ₄₆	M ₄₇	M ₄₈	M ₄₉	M ₅₀	M ₅₁	M ₅₂	M ₅₃	M ₅₄	M ₅₅	M ₅₆	M ₅₇	M ₅₈	M ₅₉	M ₆₀	M ₆₁	M ₆₂	M ₆₃	M ₆₄	M ₆₅	M ₆₆	M ₆₇	M ₆₈	M ₆₉	M ₇₀	M ₇₁	M ₇₂	M ₇₃	M ₇₄	M ₇₅	M ₇₆	M ₇₇	M ₇₈	M ₇₉	M ₈₀	M ₈₁	M ₈₂	M ₈₃	M ₈₄	M ₈₅	M ₈₆	M ₈₇	M ₈₈	M ₈₉	M ₉₀	M ₉₁	M ₉₂	M ₉₃	M ₉₄	M ₉₅	M ₉₆	M ₉₇	M ₉₈	M ₉₉	M ₁₀₀	M ₁₀₁	M ₁₀₂	M ₁₀₃	M ₁₀₄	M ₁₀₅	M ₁₀₆	M ₁₀₇	M ₁₀₈	M ₁₀₉	M ₁₁₀	M ₁₁₁	M ₁₁₂	M ₁₁₃	M ₁₁₄	M ₁₁₅	M ₁₁₆	M ₁₁₇	M ₁₁₈	M ₁₁₉	M ₁₂₀	M ₁₂₁	M ₁₂₂	M ₁₂₃	M ₁₂₄	M ₁₂₅	M ₁₂₆	M ₁₂₇	M ₁₂₈	M ₁₂₉	M ₁₃₀	M ₁₃₁	M ₁₃₂	M ₁₃₃	M ₁₃₄	M ₁₃₅	M ₁₃₆	M ₁₃₇	M ₁₃₈	M ₁₃₉	M ₁₄₀	M ₁₄₁	M ₁₄₂	M ₁₄₃	M ₁₄₄	M ₁₄₅	M ₁₄₆	M ₁₄₇	M ₁₄₈	M ₁₄₉	M ₁₅₀	M ₁₅₁	M ₁₅₂	M ₁₅₃	M ₁₅₄	M ₁₅₅	M ₁₅₆	M ₁₅₇	M ₁₅₈	M ₁₅₉	M ₁₆₀	M ₁₆₁	M ₁₆₂	M ₁₆₃	M ₁₆₄	M ₁₆₅	M ₁₆₆	M ₁₆₇	M ₁₆₈	M ₁₆₉	M ₁₇₀	M ₁₇₁	M ₁₇₂	M ₁₇₃	M ₁₇₄	M ₁₇₅	M ₁₇₆	M ₁₇₇	M ₁₇₈	M ₁₇₉	M ₁₈₀	M ₁₈₁	M ₁₈₂	M ₁₈₃	M ₁₈₄	M ₁₈₅	M ₁₈₆	M ₁₈₇	M ₁₈₈	M ₁₈₉	M ₁₉₀	M ₁₉₁	M ₁₉₂	M ₁₉₃	M ₁₉₄	M ₁₉₅	M ₁₉₆	M ₁₉₇	M ₁₉₈	M ₁₉₉	M ₂₀₀	M ₂₀₁	M ₂₀₂	M ₂₀₃	M ₂₀₄	M ₂₀₅	M ₂₀₆	M ₂₀₇	M ₂₀₈	M ₂₀₉	M ₂₁₀	M ₂₁₁	M ₂₁₂	M ₂₁₃	M ₂₁₄	M ₂₁₅	M ₂₁₆	M ₂₁₇	M ₂₁₈	M ₂₁₉	M ₂₂₀	M ₂₂₁	M ₂₂₂	M ₂₂₃	M ₂₂₄	M ₂₂₅	M ₂₂₆	M ₂₂₇	M ₂₂₈	M ₂₂₉	M ₂₃₀	M ₂₃₁	M ₂₃₂	M ₂₃₃	M ₂₃₄	M ₂₃₅	M ₂₃₆	M ₂₃₇	M ₂₃₈	M ₂₃₉	M ₂₄₀	M ₂₄₁	M ₂₄₂	M ₂₄₃	M ₂₄₄	M ₂₄₅	M ₂₄₆	M ₂₄₇	M ₂₄₈	M ₂₄₉	M ₂₅₀	M ₂₅₁	M ₂₅₂	M ₂₅₃	M ₂₅₄	M ₂₅₅	M ₂₅₆	M ₂₅₇	M ₂₅₈	M ₂₅₉	M ₂₆₀	M ₂₆₁	M ₂₆₂	M ₂₆₃	M ₂₆₄	M ₂₆₅	M ₂₆₆	M ₂₆₇	M ₂₆₈	M ₂₆₉	M ₂₇₀	M ₂₇₁	M ₂₇₂	M ₂₇₃	M ₂₇₄	M ₂₇₅	M ₂₇₆	M ₂₇₇	M ₂₇₈	M ₂₇₉	M ₂₈₀	M ₂₈₁	M ₂₈₂	M ₂₈₃	M ₂₈₄	M ₂₈₅	M ₂₈₆	M ₂₈₇	M ₂₈₈	M ₂₈₉	M ₂₉₀	M ₂₉₁	M ₂₉₂	M ₂₉₃	M ₂₉₄	M ₂₉₅	M ₂₉₆	M ₂₉₇	M ₂₉₈	M ₂₉₉	M ₃₀₀	M ₃₀₁	M ₃₀₂	M ₃₀₃	M ₃₀₄	M ₃₀₅	M ₃₀₆	M ₃₀₇	M ₃₀₈	M ₃₀₉	M ₃₁₀	M ₃₁₁	M ₃₁₂	M ₃₁₃	M ₃₁₄	M ₃₁₅	M ₃₁₆	M ₃₁₇	M ₃₁₈	M ₃₁₉	M ₃₂₀	M ₃₂₁	M ₃₂₂	M ₃₂₃	M ₃₂₄	M ₃₂₅	M ₃₂₆	M ₃₂₇	M ₃₂₈	M ₃₂₉	M ₃₃₀	M ₃₃₁	M ₃₃₂	M ₃₃₃	M ₃₃₄	M ₃₃₅	M ₃₃₆	M ₃₃₇	M ₃₃₈	M ₃₃₉	M ₃₄₀	M ₃₄₁	M ₃₄₂	M ₃₄₃	M ₃₄₄	M ₃₄₅	M ₃₄₆	M ₃₄₇	M ₃₄₈	M ₃₄₉	M ₃₅₀	M ₃₅₁	M ₃₅₂	M ₃₅₃	M ₃₅₄	M ₃₅₅	M ₃₅₆	M ₃₅₇	M ₃₅₈	M ₃₅₉	M ₃₆₀	M ₃₆₁	M ₃₆₂	M ₃₆₃	M ₃₆₄	M ₃₆₅	M ₃₆₆	M ₃₆₇	M ₃₆₈	M ₃₆₉	M ₃₇₀	M ₃₇₁	M ₃₇₂	M ₃₇₃	M ₃₇₄	M ₃₇₅	M ₃₇₆	M ₃₇₇	M ₃₇₈	M ₃₇₉	M ₃₈₀	M ₃₈₁	M ₃₈₂	M ₃₈₃	M ₃₈₄	M ₃₈₅	M ₃₈₆	M ₃₈₇	M ₃₈₈	M ₃₈₉	M ₃₉₀	M ₃₉₁	M ₃₉₂	M ₃₉₃	M ₃₉₄	M ₃₉₅	M ₃₉₆	M ₃₉₇	M ₃₉₈	M ₃₉₉	M ₄₀₀	M ₄₀₁	M ₄₀₂	M ₄₀₃	M ₄₀₄	M ₄₀₅	M ₄₀₆	M ₄₀₇	M ₄₀₈	M ₄₀₉	M ₄₁₀	M ₄₁₁	M ₄₁₂	M ₄₁₃	M ₄₁₄	M ₄₁₅	M ₄₁₆	M ₄₁₇	M ₄₁₈	M ₄₁₉	M ₄₂₀	M ₄₂₁	M ₄₂₂	M ₄₂₃	M ₄₂₄	M ₄₂₅	M ₄₂₆	M ₄₂₇	M ₄₂₈	M ₄₂₉	M ₄₃₀	M ₄₃₁	M ₄₃₂	M ₄₃₃	M ₄₃₄	M ₄₃₅	M ₄₃₆	M ₄₃₇	M ₄₃₈	M ₄₃₉	M ₄₄₀	M ₄₄₁	M ₄₄₂	M ₄₄₃	M ₄₄₄	M ₄₄₅	M ₄₄₆	M ₄₄₇	M ₄₄₈	M ₄₄₉	M ₄₅₀	M ₄₅₁	M ₄₅₂	M ₄₅₃	M ₄₅₄	M ₄₅₅	M ₄₅₆	M ₄₅₇	M ₄₅₈	M ₄₅₉	M ₄₆₀	M ₄₆₁	M ₄₆₂	M ₄₆₃	M ₄₆₄	M ₄₆₅	M ₄₆₆	M ₄₆₇	M ₄₆₈	M ₄₆₉	M ₄₇₀	M ₄₇₁	M ₄₇₂	M ₄₇₃	M ₄₇₄	M ₄₇₅	M ₄₇₆	M ₄₇₇	M ₄₇₈	M ₄₇₉	M ₄₈₀	M ₄₈₁	M ₄₈₂	M ₄₈₃	M ₄₈₄	M ₄₈₅	M ₄₈₆	M ₄₈₇	M ₄₈₈	M ₄₈₉	M ₄₉₀	M ₄₉₁	M ₄₉₂	M ₄₉₃	M ₄₉₄	M ₄₉₅	M ₄₉₆	M ₄₉₇	M ₄₉₈	M ₄₉₉	M ₅₀₀	M ₅₀₁	M ₅₀₂	M ₅₀₃	M ₅₀₄	M ₅₀₅	M ₅₀₆	M ₅₀₇	M ₅₀₈	M ₅₀₉	M ₅₁₀	M ₅₁₁	M ₅₁₂	M ₅₁₃	M ₅₁₄	M ₅₁₅	M ₅₁₆	M ₅₁₇	M ₅₁₈	M ₅₁₉	M ₅₂₀	M ₅₂₁	M ₅₂₂	M ₅₂₃	M ₅₂₄	M ₅₂₅	M ₅₂₆	M ₅₂₇	M ₅₂₈	M ₅₂₉	M ₅₃₀	M ₅₃₁	M ₅₃₂	M ₅₃₃	M ₅₃₄	M ₅₃₅	M ₅₃₆	M ₅₃₇	M ₅₃₈	M ₅₃₉	M ₅₄₀	M ₅₄₁	M ₅₄₂	M ₅₄₃	M ₅₄₄	M ₅₄₅	M ₅₄₆	M ₅₄₇	M ₅₄₈	M ₅₄₉	M ₅₅₀	M ₅₅₁	M ₅₅₂	M ₅₅₃	M ₅₅₄	M ₅₅₅	M ₅₅₆	M ₅₅₇	M ₅₅₈	M ₅₅₉	M ₅₆₀	M ₅₆₁	M ₅₆₂	M ₅₆₃	M ₅₆₄	M ₅₆₅	M ₅₆₆	M ₅₆₇	M ₅₆₈	M ₅₆₉	M ₅₇₀	M ₅₇₁	M ₅₇₂	M ₅₇₃	M ₅₇₄	M ₅₇₅	M ₅₇₆	M ₅₇₇	M ₅₇₈	M ₅₇₉	M ₅₈₀	M ₅₈₁	M ₅₈₂	M ₅₈₃	M ₅₈₄	M ₅₈₅	M ₅₈₆	M ₅₈₇	M ₅₈₈	M ₅₈₉	M ₅₉₀	M ₅₉₁	M ₅₉₂	M ₅₉₃	M ₅₉₄	M ₅₉₅	M ₅₉₆	M ₅₉₇	M ₅₉₈	M ₅₉₉	M ₆₀₀	M ₆₀₁	M ₆₀₂	M ₆₀₃	M ₆₀₄	M ₆₀₅	M ₆₀₆	M ₆₀₇	M ₆₀₈	M ₆₀₉	M ₆₁₀	M ₆₁₁	M ₆₁₂	M ₆₁₃	M ₆₁₄	M ₆₁₅	M ₆₁₆	M ₆₁₇	M ₆₁₈	M ₆₁₉	M ₆₂₀	M ₆₂₁	M ₆₂₂	M ₆₂₃	M ₆₂₄	M ₆₂₅	M ₆₂₆	M ₆₂₇	M ₆₂₈	M ₆₂₉	M ₆₃₀	M ₆₃₁	M ₆₃₂	M ₆₃₃	M ₆₃₄	M ₆₃₅	M ₆₃₆	M ₆₃₇	M ₆₃₈	M ₆₃₉	M ₆₄₀	M ₆₄₁	M ₆₄₂	M ₆₄₃	M ₆₄₄	M ₆₄₅	M ₆₄₆	M ₆₄₇	M ₆₄₈	M ₆₄₉	M ₆₅₀	M ₆₅₁	M ₆₅₂	M ₆₅₃	M ₆₅₄	M ₆₅₅	M ₆₅₆	M ₆₅₇	M ₆₅₈	M ₆₅₉	M ₆₆₀	M ₆₆₁	M ₆₆₂	M ₆₆₃	M ₆₆₄	M ₆₆₅	M ₆₆₆	M ₆₆₇	M ₆₆₈	M ₆₆₉	M ₆₇₀	M ₆₇₁	M ₆₇₂	M ₆₇₃	M ₆₇₄	M ₆₇₅	M ₆₇₆	M ₆₇₇	M ₆₇₈	M ₆₇₉	M ₆₈₀	M ₆₈₁	M ₆₈₂	M ₆₈₃	M ₆₈₄	M ₆₈₅	M ₆₈₆	M ₆₈₇	M ₆₈₈	M ₆₈₉	M ₆₉₀	M ₆₉₁	M ₆₉₂	M ₆₉₃	M ₆₉₄	M ₆₉₅	M ₆₉₆	M ₆₉₇	M ₆₉₈	M ₆₉₉	M ₇₀₀	M ₇₀₁	M ₇₀₂	M ₇₀₃	M ₇₀₄	M ₇₀₅	M ₇₀₆	M ₇₀₇	M ₇₀₈	M ₇₀₉	M ₇₁₀	M ₇₁₁	M ₇₁₂	M ₇₁₃	M ₇₁₄	M ₇₁₅	M ₇₁₆	M ₇₁₇	M ₇₁₈	M ₇₁₉	M ₇₂₀	M ₇₂₁	M ₇₂₂	M ₇₂₃	M ₇₂₄	M ₇₂₅	M ₇₂₆	M ₇₂₇	M ₇₂₈	M ₇₂₉	M ₇₃₀	M ₇₃₁	M ₇₃₂	M ₇₃₃	M ₇₃₄	M ₇₃₅	M ₇₃₆	M ₇₃₇	M ₇₃₈	M ₇₃₉	M ₇₄₀	M ₇₄₁	M ₇₄₂	M ₇₄₃	M ₇₄₄	M ₇₄₅	M ₇₄₆	M ₇₄₇	M ₇₄₈	M ₇₄₉	M ₇₅₀	M ₇₅₁	M ₇₅₂	M ₇₅₃	M ₇₅₄	M ₇₅₅	M ₇₅₆	M ₇₅₇	M ₇₅₈	M ₇₅₉	M ₇₆₀	M ₇₆₁	M ₇₆₂	M ₇₆₃	M ₇₆₄	M ₇₆₅	M ₇₆₆	M ₇₆₇	M ₇₆₈	M ₇₆₉	M ₇₇₀	M ₇₇₁	M ₇₇₂	M ₇₇₃	M ₇₇₄	M ₇₇₅	M ₇₇₆	M ₇₇₇	M ₇₇₈	M ₇₇₉	M ₇₈₀	M ₇₈₁	M ₇₈₂	M ₇₈₃	M ₇₈₄	M ₇₈₅	M ₇₈₆	M ₇₈₇	M ₇₈₈	M ₇₈₉	M ₇₉₀	M ₇₉₁	M ₇₉₂	M ₇₉₃	M ₇₉₄	M ₇₉₅	M ₇₉₆	M ₇₉₇	M ₇₉₈	M ₇₉₉	M ₈₀₀	M ₈₀₁	M ₈₀₂	M ₈₀₃	M ₈₀₄	M ₈₀₅	M ₈₀₆	M ₈₀₇	M ₈₀₈	M ₈₀₉	M ₈₁₀	M ₈₁₁	M ₈₁₂	M ₈₁₃	M ₈₁₄	M ₈₁₅	M ₈₁₆	M ₈₁₇	M ₈₁₈	M ₈₁₉	M ₈₂₀	M ₈₂₁	M ₈₂₂	M ₈₂₃	M ₈₂₄	M ₈₂₅	M ₈₂₆	M ₈₂₇	M ₈₂₈	M ₈₂₉	M ₈₃₀	M ₈₃₁	M ₈₃₂	M ₈₃₃	M ₈₃₄	M ₈₃₅	M ₈₃₆	M ₈₃₇	M ₈₃₈	M ₈₃₉	M ₈₄₀	M ₈₄₁	M ₈₄₂	M ₈₄₃