

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270011 - **Obrábění, aditivní  
technologie a zabezpečování kvality**

**Studijní specializace:** **Bez specializace**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos**

**Autor:** Bc. Lukáš NEZBEDA

**Vedoucí práce:** Ing. Aneta MILSIMEROVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš NEZBEDA**  
Osobní číslo: **S19N0103P**  
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**  
Studijní obor: **Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**  
Téma práce: **Softwarová optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos**  
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu
3. Návrh typového představitele a aplikace SW optimalizace
4. Technické zhodnocení
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- STANĚK, J., NĚMEJC, J. Metodika zpracování a úprava diplomových prací. Plzeň : ZČU,2005, ISBN 80-7043-363-9.
- MAREK, J. a kol.: Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha, MM publishing, 2014, ISBN: 978-80-260-6780-1.
- Softwarová optimalizace obrábění složitých tvarových ploch při práci na čisto s ohledem na ochranu nástroje [písemná práce ke státní doktorské zkoušce], Libor Hamouz, 2010.
- ŠTULPA, M.: CNC programování obráběcích strojů. Praha, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- Manufacturing automation : metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design / Yusuf Altintas, Cambridge, 2012, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-17247-9.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Aneta Milsimerová, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval své vedoucí práce paní Ing. Anetě Milsimerové, Ph.D., za cenné rady, připomínky a odborné konzultace při psaní této diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat panu konzultantovi Ing. Janu Hnátíkovi, Ph.D. za poskytnuté rady a informace.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Nezbeda	<b>Jméno</b> Lukáš	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Milsimerová, Ph.D.	<b>Jméno</b> Aneta	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	109	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	88	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	5
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Cílem diplomové práce je aplikovat a popsat softwarovou optimalizaci NC kódu pro vybrané díly pomocí Eureka Chronos. Optimalizace NC kódu bude provedena dle umělé inteligence A.I. a uživatelem zadaných omezení. Výsledné programy budou podrobně popsány a porovnány s neoptimalizovanými. Následně proběhne výroba vybraných dílů pomocí optimalizovaných a neoptimalizovaných NC programů. Během tohoto procesu budou zaznamenávány časy obrábění, které budou porovnány s předpokládanými časy výroby. Na konci práce bude provedeno technicko-ekonomické zhodnocení pro využití optimalizačního softwaru Eureka Chronos.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Eureka Chronos, optimalizace, NC program, frézování, posuvová rychlost, A.I.

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Nezbeda	<b>Name</b> Lukáš	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270011 - Machining, additive technology and quality assurance		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Milsimerová, Ph.D.	<b>Name</b> Aneta	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Software optimization of NC code using Eureka Chronos		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	109	<b>TEXT PART</b>	88	<b>GRAPHICAL PART</b>	5
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The aim of thesis is to apply and describe the software optimization of NC code for selected parts using Eureka Chronos. Optimization of NC code will be performed according to artificial intelligence A.I. and user-specified limitations. The resulting programs will be described in detail and compared with non-optimized programs. Then selected parts will be produced using optimized and non-optimized NC programs. The machining times will be recorded during the process and than will be compared with the expected production times. The thesis conclusion will contain techno-economic assessment for the use of optimized software Eureka Chronos.
<b>KEY WORDS</b>	Eureka Chronos, optimization, NC program, milling, feed rate, A.I.

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	11
Seznam obrázků .....	13
Seznam tabulek .....	16
Seznam grafů.....	17
1 Úvod.....	18
2 Analýza současného stavu.....	19
2.1 Tvorba NC programu pomocí SolidCAM.....	19
2.1.1 2,5D operace.....	19
2.1.2 3D operace.....	21
2.1.3 iMachining .....	21
2.2 Optimalizace NC kódu .....	22
2.2.1 Optimalizace off-line systémy – Softwarová optimalizace.....	22
2.3 Eureka Chronos .....	24
2.3.1 Požadavky pro chod Eureka Chronos .....	24
2.3.2 Princip fungování .....	24
2.3.3 Kritická místa optimalizace.....	26
2.3.4 Přínosy Eureka Chronos.....	28
2.4 Konkurenční optimalizační softwary.....	28
2.4.1 Vericut.....	28
2.4.2 NCSimul.....	30
2.4.3 NCBrain .....	30
2.5 Trvanlivost nástroje .....	31
2.6 Kritéria optimálnosti.....	33
2.6.1 Kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů.....	33
2.6.2 Kritérium optimálnosti z hlediska maximální produktivity .....	33
2.6.3 Vícekriteriální optimalizace .....	34
2.7 Omezující podmínky .....	34
2.7.1 Omezení výkonem stroje.....	34
2.7.2 Omezení maximálním kroutícím momentem.....	35
2.7.3 Omezení maximální přípustnou silou řezání.....	36
2.7.4 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy .....	38
2.7.5 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy .....	38
2.7.6 Omezení dané minimálními a maximálními otáčkami .....	38
2.7.7 Omezení dané minimálním a maximálním posuvem.....	39



2.7.8	Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem .....	39
2.7.9	Oblast přípustných řešení .....	39
3	Návrh typového představitele a aplikace SW optimalizace .....	40
3.1	Tvorba/výběr CAD modelu .....	40
3.1.1	Díl 1 .....	41
3.1.2	Díl 2 - Forma .....	41
3.2	Tvorba NC kódu pro vybrané díly .....	42
3.2.1	Díl 1 .....	43
3.2.1.1	Strategie-Drážka 1 .....	44
3.2.1.2	Strategie - Drážka 2 .....	47
3.2.1.3	Strategie-Kapsa-hrubování .....	47
3.2.1.4	Strategie-Kapsa na čisto .....	49
3.2.1.5	Strategie - Díra $\varnothing 12$ mm .....	50
3.2.2	Díl 2 - Forma .....	51
3.2.2.1	Strategie-Frézování rovinné plochy .....	52
3.2.2.2	Strategie - Hrubování tvarových ploch č.1 .....	52
3.2.2.3	Strategie - Hrubování tvarových ploch č.2 .....	54
3.2.2.4	Strategie - Hrubování tvarových ploch č.3 .....	55
3.3	Optimalizace NC kódu .....	55
3.3.1	Optimalizace NC kódu dílu 1 dle A.I. ....	57
3.3.1.1	Optimalizace NC kódu – Drážka 1 .....	58
3.3.1.2	Optimalizace NC kódu – Drážka 2 .....	61
3.3.1.3	Optimalizace NC kódu – Kapsa-hrubování .....	63
3.3.1.4	Optimalizace NC kódu – Kapsa na čisto .....	65
3.3.1.5	Díra $\varnothing 12$ mm .....	67
3.3.1.6	Souhrn poznatků optimalizace dle A.I. ....	68
3.3.2	Optimalizace NC kódu dle uživatelských omezení .....	68
3.3.2.1	Optimalizace NC kódu dle množství odebraného materiálu za jednotku času 68	
3.3.2.2	Optimalizace NC kódu dle tloušťky třísky .....	69
3.3.2.3	Optimalizace NC kódu dle výkonu .....	71
3.3.2.4	Optimalizace NC kódu dle kroutícího momentu .....	72
3.3.2.5	Optimalizace NC kódu kombinací omezení .....	73
3.3.2.6	Souhrn optimalizace dle uživatelem zadaných omezení .....	74
3.3.3	Optimalizace NC kódu dílu 2 -A.I. ....	74

3.3.3.1	Optimalizace NC kódu – Rovinná plocha .....	75
3.3.3.2	Optimalizace NC kódu – Tvarové plochy č.1 .....	77
3.3.3.3	Optimalizace NC kódu – Tvarové plochy č.2.....	78
3.3.3.4	Optimalizace NC kódu – Tvarové plochy č.3.....	79
3.3.3.5	Optimalizace NC kódu –Shrnutí.....	80
3.3.4	Optimalizace NC kódu dílu 2 -User .....	80
3.3.4.1	Optimalizace NC kódu dle krouticího momentu – Rovinná plocha .....	81
3.3.4.2	Optimalizace NC kódu del tloušťky třísky $h_m$ – Tvarová plocha č.1 .....	81
3.3.4.3	Optimalizace NC kódu dle objemu odebraného materiálu za čas Q – Tvarová plocha č.2	82
3.3.4.4	Optimalizace NC dle tloušťky třísky $h_m$ – Tvarová plocha č.3 .....	83
3.4	Výroba vybraných dílů .....	84
3.4.1	Výroba Dílu 1 – Neoptimalizovaný NC kód.....	86
3.4.2	Výroba Dílu 1 – Optimalizovaný NC kód dle A.I. ....	87
3.4.3	Výroba upravené operace Kapsa - R5.....	89
3.4.4	Výroba Dílu 2 – Neoptimalizovaný NC kód.....	91
3.4.5	Výroba Dílu 2 – Optimalizovaný NC kód .....	93
3.4.6	Výroba upraveného Dílu 1 R4 kapsa s cyklem .....	94
3.5	Shrnutí procesu softwarové optimalizace.....	95
3.5.1	Neshoda času simulací .....	95
3.5.2	Neoptimalizované úseky NC kódu.....	96
3.5.3	Nepřesné výpočty .....	98
4	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	99
4.1.1	Technicko-ekonomické zhodnocení Dílu 1.....	99
4.1.2	Technicko-ekonomické zhodnocení Dílu 2.....	101
5	Závěr.....	105
	Seznam použitých zdrojů .....	107
	PŘÍLOHA č. 1.....	i
	PŘÍLOHA č. 2.....	ii
	PŘÍLOHA č. 3.....	iii

## Přehled použitých zkratk a symbolů

CAM – Computer Aided Manufacturing – počítačová podpora výroby

CAD – Computer Aided Design – počítačová podpora konstrukce

DP – Diplomová práce

NC – Numerical Control – číslicově řízený

CNC – Computer numerical control – počítačově řízený

ACC – Adaptive Control with Constraints – adaptivní řízení limitní

ACO – adaptive control optimization – adaptivní řízení optimalizační

A.I. – Artificial intelligence

T – Taylorův vztah

HSC – High Speed Cutting – vysoko-rychlostní obrábění

HFC – High feed cutting – vysoko-posuvové obrábění

HSR – high speed roughing – vysoko-rychlostní hrubování

HSM – High speed milling – vysoko-rychlostní frézování

3D – Three Dimensional – třírozměrný

SK – Slinuty karbid

Q – Objem množství odebraného materiálu za jednotku času [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

P – Výkon [kW]

$h_m$  – průměrná hodnota tloušťky třísky [mm]

$M_k$  – Kroutící moment [N.m]

$N_C$  – Celkové náklady na výroby jednoho kusu

$N_S$  – Náklady na strojní práci

$N_n$  – Náklady na nástroj a jeho výměnu při jednom obrobku

$N_v$  – Náklady na vedlejší práci

$N_{sm}$  – Náklady na minutu strojní práce

$N_{nT}$  – Náklady na nástroj a jeho výměnu, vztažené na jednu trvanlivost

$Z_v$  – Počet výměn nástroje, vztažený na jedno obrobání kusu

$N_{vm}$  – Náklady na minutu vedlejší práce

$t_{As}$  – Jednotkový strojní čas [min]

$t_{Av}$  – Jednotkový vedlejší čas [min]

$t_u$  – Čas operačního úseku [min]

$t_{As}$  – Strojní čas [min]

$t_{vn}$  – Čas výměnu nástroje a jeho seřízení [min]

$z_v$  – Počet výměn nástroje, vztažený na jedno obrobení kusu

$P_c$  – Řezný výkon [W]

$P_{už}$  – Užitečný výkon hlavního elektromotoru stroje [W]

$P_e$  – Výkon elektromotoru stroje [W]

$\eta$  – Mechanická účinnost stroje [%]

$B$  – Šířka odřezávané vrstvy [mm]

$z$  – Počet zubů nástroje

$F_c$  – Řezná síla

$a_p$  – Axiální hloubka řezu [mm]

$a_e$  – Radiální hloubka řezu [mm]

$v_c$  – Řezná rychlost [m/min]

$f_z$  – Posuv na zub [mm/zub]

$v_f$  – Posuvová rychlost [mm/min]

$n$  – Otáčky [m/min]

$m$  – Míra závislosti na řezné rychlosti

$c^T$  – Konstanta

$k_{Fc}$ ,  $x_{Fx}$ ,  $y_{Fc}$ ,  $z_{Fc}$ ,  $u_{Fc}$ ,  $w_{Fc}$  – Empirické konstanty

$R_a$  – Aritmetická úchylka obrobené plochy [ $\mu\text{m}$ ]

$N_{Tv}$  – Náklady na výměnu nástroje vztažené na jednu trvanlivost [min]

$T$  – Trvanlivost nástroje [min]

$Q_{ks}$  – Odhadovaná trvanlivost [ks]

$N_N$  – Náklady na nástroj za kus [Kč/ks]

$N_{N-\text{min}}$  – Náklady na nástroj za minutu [Kč/min]

$C_N$  – Cena nástroje [Kč]

## Seznam obrázků

Obr. 1: Volba technologie u operace kapsa. Foto autor .....	20
Obr. 2: Základní blokové schéma závislosti adaptivního řízení [6] .....	22
Obr. 3: Schéma off-line systému pro optimalizaci procesu obrábění [9].....	23
Obr. 4: Rozdělení bloku do dílčích segmentů [24] .....	25
Obr. 5: Změna hodnoty posuvové rychlosti [24] .....	25
Obr. 6: Frézování rohů [25].....	26
Obr. 7: Nekvalitní povrch v rozích [27] .....	27
Obr. 8: Změna posuvové rychlosti po optimalizaci [24].....	27
Obr. 9: Změna rychlosti z konstantní hodnoty [24] .....	28
Obr. 10: Optimalizace posuvu-OptiPath [28] .....	29
Obr. 11: Optimalizace posuvu - OPTITool [29] .....	30
Obr. 12: Možnosti optimalizace – NCBrain [31] .....	31
Obr. 13: Závislost celkových výrobních nákladů N a jejich složek na řezné rychlosti [32]....	32
Obr. 14 : Závislost opotřebení VB při různých $v_c$ [32] .....	32
Obr. 15: Oblast vhodného utváření třísek [32].....	37
Obr. 16: Oblast vhodného utváření třísek pro matematický model [32].....	37
Obr. 17: Oblast přípustných řešení [32] .....	40
Obr. 18: Díl 1. Foto autor.....	41
Obr. 19: Díl 2 – Forma. Foto autor. ....	42
Obr. 20: Nastavení projektu. Foto autor.....	42
Obr. 21: SolidCAM možnosti. Foto autor.....	43
Obr. 22: Drážka 1. Foto autor. ....	44
Obr. 23: CAM-roviny. Foto autor. ....	45
Obr. 24: CAM-technologie. Foto autor.....	45
Obr. 25: CAM-nájezd/odjezd. Foto autor. ....	46
Obr. 26: Drážka 2. Foto autor. ....	47
Obr. 27 Kapsa-hrubování. Foto autor.....	48
Obr. 28:CAM-nájezd/odjezd. Foto autor. ....	48
Obr. 29: CAM-hodnota překrytí a přídavky. Foto autor.....	49
Obr. 30: CAM-kapsa na čisto. Foto autor. ....	50
Obr. 31 Díra $\varnothing 12$ mm. Foto autor.....	51
Obr. 32: Frézování rovinné plochy. Foto autor .....	52
Obr. 33: Hrubování tvarových ploch č.1. Foto autor .....	53
Obr. 34: CAM-dráhy. Foto autor. ....	53

Obr. 35: CAM- Hrubování tvarových ploch č.2. Foto autor.....	54
Obr. 36: CAM- Hrubování tvarových ploch č.3. Foto autor.....	55
Obr. 37: Převod dat do Eureka. Foto autor. ....	55
Obr. 38 Vlastnosti polotovaru. Foto autor.....	56
Obr. 39: Prostředí Eureka Chronos. Foto autor.....	57
Obr. 40: Podmínky pro optimalizaci NC kódu. Foto autor.....	57
Obr. 41 NC kód před a po optimalizaci. Foto autor.....	59
Obr. 42: Graf posuvové rychlosti a objemu odebraného materiálu za jednotku času. Foto autor. .....	60
Obr. 43: NC kód před a po optimalizaci. Foto autor.....	61
Obr. 44: Pozice frézy. Foto autor. ....	62
Obr. 45: Graf posuvové rychlosti a objemu odebraného materiálu za jednotku času. Foto autor. .....	63
Obr. 46: Pozice fréz A a B v optimalizovaném NC kódu. Foto autor. ....	64
Obr. 47: Graf pro operaci Kapsa-hrubování. Foto autor. ....	65
Obr. 48: Pozice fréz. Foto autor. ....	66
Obr. 49: Graf pro operaci Finiš kapsy. Foto autor. ....	67
Obr. 50: Graf pro díru Ø 12 mm. Foto autor.....	67
Obr. 51: Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	68
Obr. 52 Graf pro opt. dle objemu odebraného materiálu za jednotku času. Foto autor.....	69
Obr. 53: Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	69
Obr. 54: Graf pro opt. dle tloušťky třísky. Foto autor.....	70
Obr. 55: Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	71
Obr. 56: Graf pro opt. dle výkonu. Foto autor. ....	71
Obr. 57: Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	72
Obr. 58: Graf pro opt. dle kroutícího momentu. Foto autor.....	72
Obr. 59: Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	73
Obr. 60 Graf pro opt. dle kombinace omezení. Foto autor. ....	73
Obr. 61: Hodnoty posuvu při nájezdu do materiálu pro omezení M a h. Foto autor. ....	73
Obr. 62: Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	74
Obr. 63: Optimalizace – rovinná plocha. Foto autor.....	76
Obr. 64: Graf pro operaci Rovinná plocha. Foto autor. ....	76
Obr. 65: Optimalizace – tvarové plochy č.1. Foto autor.....	77
Obr. 66: Graf pro operaci Tvarové plochy č.1. Foto autor.....	78
Obr. 67: Optimalizace - tvarové plochy č.2. Foto autor.....	78

Obr. 68: Graf pro operaci Tvarové plochy č.2. Foto autor.....	79
Obr. 69: Optimalizace - tvarové plochy č.3. Foto autor.....	79
Obr. 70: Graf pro operaci Tvarové plochy č.3. Foto autor.....	80
Obr. 71: Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	81
Obr. 72: Graf pro opt. dle kroutícího momentu. Foto autor.....	81
Obr. 73 Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	82
Obr. 74: Graf pro opt. dle tloušťky třísky. Foto autor.....	82
Obr. 75 Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	82
Obr. 76: Graf pro opt. dle objemu odebraného materiálu. Foto autor.....	83
Obr. 77: Podmínky optimalizace. Foto autor. ....	83
Obr. 78: Graf pro opt. dle tloušťky třísky .....	84
Obr. 79: MCU450 V[T]-5X Kovosvit Mas.....	85
Obr. 80: Průběh obrábění. Foto autor.....	86
Obr. 81 Kvalita obrobených rádií.....	87
Obr. 82 Kvalita obrobených rádií. Foto autor. ....	88
Obr. 83: Pozice fréz v rádiích R5 a R4. Foto autor.....	90
Obr. 84: Neoptimalizovaná vs optimalizovaná kapsa. Foto autor. ....	91
Obr. 85: Postup výroby. Foto autor.....	91
Obr. 86: Postup výroby. Foto autor.....	92
Obr. 87: Obrobený Díl 2 .....	93
Obr. 88: Kapsa vyrobená pomocí optimalizovaného programu s cyklem .....	94
Obr. 89 Obrobené Díly 1 .....	94
Obr. 90: Neoptimalizované úseky pro nájezd. Foto autor.....	96
Obr. 91: Neoptimalizovaný úsek. Foto autor. ....	97
Obr. 92: Porovnání operací č.3 a č.4. Foto autor. ....	97

## Seznam tabulek

Tab. 1: Použitý nástroj .....	43
Tab. 2 Souhrn pro Drážka 1 .....	46
Tab. 3 Souhrn pro Drážka 2 .....	47
Tab. 4 Souhrn pro Kapsa-hrubování .....	49
Tab. 5 Souhrn pro Kapsa na čisto .....	50
Tab. 6 Souhrn pro finiš kapsy .....	51
Tab. 7 Použité nástroje .....	51
Tab. 8 Souhrn pro operaci rovinná plocha .....	52
Tab. 9 Souhrn pro operaci tvarové plochy č.1 .....	54
Tab. 10 Souhrn pro operaci tvarové plochy č.2 .....	54
Tab. 13 Souhrn pro operaci tvarové plochy č.3 .....	55
Tab. 14 Optimalizace Dílu 1 dle A.I. ....	58
Tab. 14: Nastavení performance index pro Drážka 1 .....	59
Tab. 15 Souřadnice pro výjezdy a nájezd frézy .....	60
Tab. 16: Nastavení performance index pro Drážka 2 .....	61
Tab. 16: Souřadnice v okolí rádií .....	62
Tab. 17: Nastavení performance index pro hrubování kapsy .....	63
Tab. 18: Pozice fréz A v oblasti rádií .....	64
Tab. 19: Pozice fréz B v oblasti rádií .....	64
Tab. 20: Nastavení performance index pro finiš kapsy .....	66
Tab. 21: Pozice fréz v oblasti rádií .....	66
Tab. 22: Shrnutí optimalizace .....	69
Tab. 23: Shrnutí optimalizace .....	70
Tab. 24: Shrnutí optimalizace .....	72
Tab. 25: Shrnutí optimalizace .....	73
Tab. 26: Shrnutí optimalizace .....	74
Tab. 27: Optimalizace Dílu 2 dle A.I. ....	75
Tab. 28: Nastavení performance indexu pro operaci Rovinná plocha .....	76
Tab. 29: Nastavení performance indexu pro operaci Tvarové plochy č.1 .....	77
Tab. 30: Nastavení performance indexu pro operaci Tvarové plochy č.2 .....	78
Tab. 31: Nastavení performance indexu pro operaci Tvarové plochy č.3 .....	79
Tab. 31: Optimalizace Dílu 2 dle uživatelských omezení .....	80
Tab. 32: Shrnutí optimalizace .....	81
Tab. 33: Shrnutí optimalizace .....	82



Tab. 34: Shrnutí optimalizace .....	83
Tab. 35: Shrnutí optimalizace .....	84
Tab. 36: Časy výroby .....	87
Tab. 37: Časy výroby .....	88
Tab. 38: Pozice frézy v oblasti rádií R5 .....	89
Tab. 39: Pozice frézy v oblasti rádií R4 .....	89
Tab. 40: Časy výroby .....	90
Tab. 41: Časy výroby. Foto autor.....	92
Tab. 42: Časy výroby .....	93
Tab. 43: Časy výroby .....	93
Tab. 43: Časy výroby .....	95
Tab. 44: Časy výroby z různých zdrojů .....	95
Tab. 45: Náklady na Díl 1 - optimalizovaný NC kód .....	100
Tab. 46: Náklady na Díl 1 - neoptimalizovaný NC kód.....	100
Tab. 47: Úspory pro Díl 1 .....	100
Tab. 48: Náklady na Díl 2-optimalizovaný NC kód .....	103
Tab. 49: Náklady na Díl 2-neoptimalizovaný NC kód.....	103
Tab. 50: Úspory pro Díl 2 .....	103
Tab. 51: Souhrn k dílům 1 a 2 .....	105

## Seznam grafů

Graf 1: Úspora času po optimalizaci .....	58
Graf 2: Úspora času po optimalizaci .....	75
Graf 3: Celková úspora financí na operace .....	100
Graf 4: Celková úspora financí na operace .....	104

# 1 Úvod

V současné době, kdy jsou na kvalitu a produktivitu výroby kladeny čím dál tím vyšší nároky, je důležité, aby byl výrobní proces co nejefektivnější. Toho lze docílit právě například optimalizovaným NC programem. Přestože většina programátorů vytváří NC programy pomocí CAM softwarů, je zde stále značný prostor pro optimalizaci, neboť ne všechny operace v CAM systému jsou uzpůsobeny k práci s aktualizovaným zbytkovým materiálem, ale pouze s daty, jež jsou zadány uživatelem. To může mít za následek to, že řezný proces bude probíhat v oblastech, kde není odebrán žádný objem materiálu nebo jen jeho nepatrné množství. Tím je pak snížena efektivita řezného procesu. Dalším aspektem je také to, že stále velkou část tvorby programu ovlivňuje programátor a tím pádem je kvalita vygenerovaného NC kódu odvíjena od jeho zkušeností a znalostí. K řešení těchto problémů je možné využít některý z optimalizačních softwarů, jako například Eureka Chronos, jež se zabývá optimalizací posuvové rychlosti.

Softwarovou optimalizaci NC kódu lze označit jako adaptivní formu řízení, jež má za cíl dosáhnout maximálního výkonu při požadované kvalitě obrobení, a to například z hlediska drsnosti povrchu či požadovaných tolerancích. Pojmem adaptivní lze označit systémy, jež přizpůsobují své vlastnosti měnícím se podmínkám, v tomto případě jde o změnu posuvové rychlosti. Optimalizace pak vychází ze dvou vstupních údajů, a to kritéria optimálnosti a omezujících podmínek [6].

V diplomové práci budou zkoumány možnosti a vlastnosti optimalizace NC kódu pomocí softwaru Eureka Chronos, který byl vyvinut italskou společností Roboris. „*Chronos je modul, který optimalizuje hotový NC program dynamickou úpravou rychlosti posuvů. Dosahuje jednak harmonizace řezných sil (odstranění silových špiček) a jednak urychlení obrábění o 10-30%*“ [8]. S tímto softwarem lze optimalizovat 3-osé, 4-osé a 5-osé frézovací operace. V praktické části DP budou ověřeny optimalizované NC programy na vybraných modelech. Tyto díly budou vybrány tak, aby svým tvarem ověřily možnosti softwarové optimalizace NC kódu, přičemž tyto díly budou vymodelovány v systému SolidWorks a NC programy budou vytvořeny v systému SolidCAM. Dané díly budou následně obrobena, aby se ověřily a zanalyzovaly teoretické znalosti a vlastnosti optimalizace [8].

Hlavním cílem práce je aplikovat softwarovou optimalizaci na vytvořených NC kódech pro vybrané díly. Přičemž první díl bude navrhnout speciálně pro tuto práci a to tak, aby se zde projevil možnosti optimalizace v kritických oblastech a také aby bylo dosaženo validních výsledků z hlediska hodnot parametrů, dle kterých bude optimalizace probíhat. Jedná se například o oblasti se skokovým nárůstem opásání v rádiích nebo v oblastech, kde najíždí nástroj do materiálu. Druhý díl bude speciálně vybrán již z existujících 3D CAD modelů, které mohou nacházet využití i v praktických podmínkách. Hlavním znakem, podle kterého bude díl vybrán, jsou tvarové plochy. Optimalizace bude následně provedena za různých omezujících podmínek, přičemž jednotlivé výstupní NC programy budou podrobněji analyzovány a porovnány. Výstupem DP tedy bude souhrn vlastností a funkcí softwarové optimalizace pomocí Eureka Chronos a také technicko-ekonomické zhodnocení pro vybrané modely s optimalizovanými NC programy. Předpokládané výstupy práce jsou:

- Tvorba a výběr CAD modelů,
- tvorba NC programů v systému SolidCAM,
- softwarová aplikace NC kódů dle A.I. a uživatelem zadaných omezení,
- analýza a popis výstupních NC programů,
- výroba vybraných dílů pomocí optimalizovaných a neoptimalizovaných NC kódů,
- technické zhodnocení softwarové optimalizace pomocí Eureka Chronos.

## 2 Analýza současného stavu

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tak stále velká část tvorby NC programu v prostředí CAM závisí zejména na programátorovi, ačkoliv CAM systémy již nabízí operace, které fungují jako poloautomatické a vygenerují řezné dráhy na základě předem definované geometrie, které se přizpůsobují aktuálním podmínkám. Jsou zde také na výběr operace plně řízené uživatelem. Řezné dráhy v CAM systémech jsou vytvářeny na základě implementovaných algoritmů, které zpracovávají geometrii daného dílu. Většina operací vytvořena v CAM systémech pracuje s konstantní hodnotou posuvu. Výjimkou pak mohou být nájezdy a výjezdy nástroje z materiálu, tyto parametry nastavuje programátor při generování dané operace a nastavování řezných podmínek.

Konstantní hodnotou posuvové rychlosti mohou být v určitých oblastech NC kódu způsobeny časové ztráty, které jsou příčinou navýšení ceny výrobku vlivem navýšení strojního času. V těchto případech je možné využít některý z dostupných softwarů, které jsou určeny pro optimalizaci posuvové rychlosti, jež dokáží vhodně přizpůsobit posuvovou rychlost aktuálním řezným podmínkám. Díky tomu může být posuvová rychlost v místech, kde není odebírán žádný materiál, výrazně zvýšena nebo naopak snížena v oblastech, kde dojde ke skokovému nárůstu opásání či zvýšení množství odebraného materiálu za čas. Na trhu však existuje celá řada softwarů pro optimalizaci NC kódu s různými vlastnostmi, některé mohou optimalizovat pouze posuvovou rychlost, některé pak i přímo dráhy nástrojů, či kompletní řezné podmínky. Obecně pak u těchto programů platí to, že je neustálá snaha o vylepšování jejich vlastností tak, aby se výstup v podobě NC kódu blížil co nejvíce ideálnímu stavu. Ten může být různý, dle toho, co uživatel od obráběcího cyklu požaduje. Může se tedy jednat o stav, kdy je dosaženo dlouhodobé trvanlivosti řezného nástroje nebo o stav, kdy je dosaženo, co nejvyšší možné produktivity. Ve většině případů se však jedná o kombinaci těchto dvou případů. Nasazení některého z těchto softwarů může zajistit úsporu času až v hodnotě několika 10 %. Dále může dojít ke zvýšení kvality obrobeneho povrchu či ke zvýšení životnosti nástrojů. Nutno však počítat s tím, že původní investice je relativně vysoká, avšak její návratnost může být vcelku rychlá. Zde pak záleží na několika faktorech, jako je například počet strojů ve výrobě nebo na kolik směn podnik funguje [9, 11].

Optimalizační softwary tedy pro svůj chod potřebují informace o použitém stroji, nástrojích a také o obráběném polotovaru. Důležitou částí procesu optimalizace jsou také omezující podmínky či kritéria, kterými se daný optimalizační proces bude řídit. [9,10].

### 2.1 Tvorba NC programu pomocí SolidCAM

K tvorbě NC programů pro optimalizaci bude využit systém SolidCAM. Tento systém nabízí k tvorbě NC programů hned několik operací, přičemž využity budou jak 2,5D tak 3D operace. Ty, které budou využity pro tvorbu programů budou podrobněji popsány v následujících podkapitolách

#### 2.1.1 2,5D operace

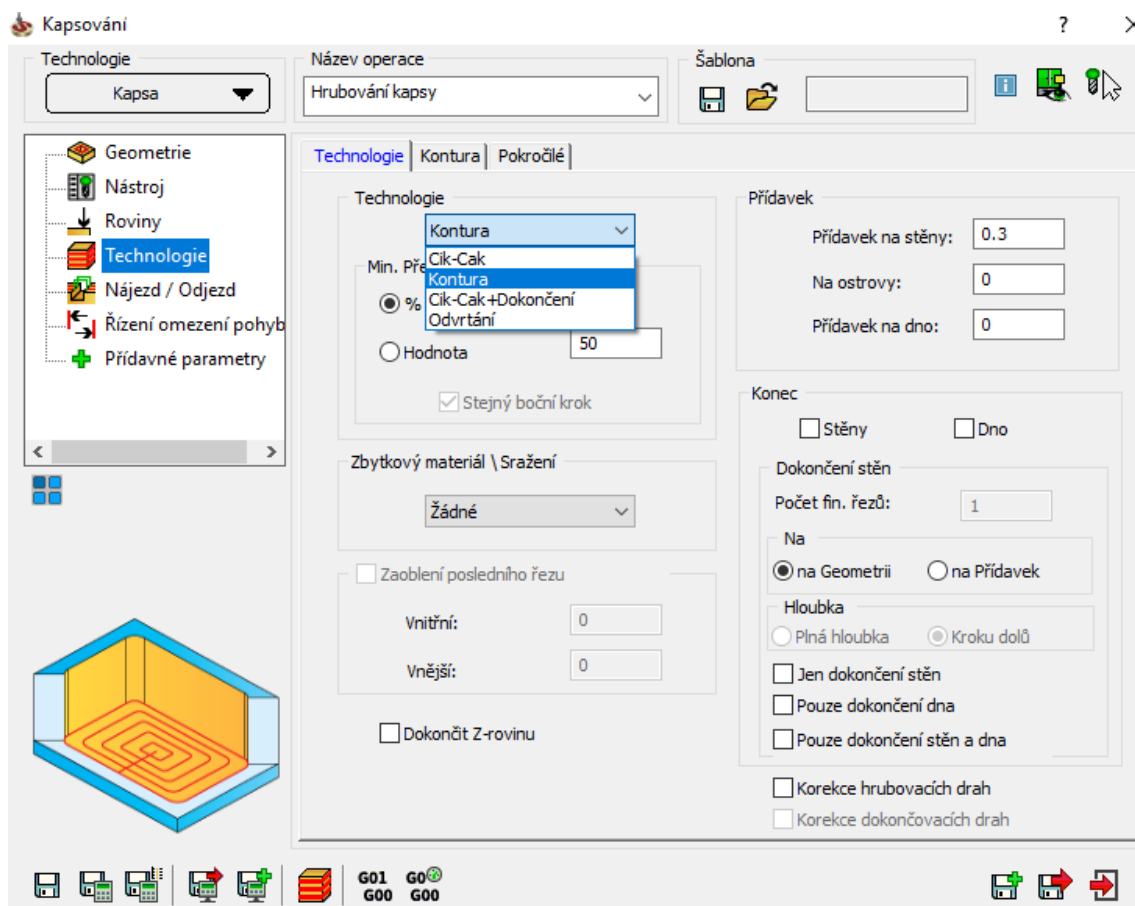
Mezi 2,5D operace patří vrtání, řezání závitů či frézování kontur, kapes a drážek. 2,5D operace nabízí: „Zjednodušený výběr geometrie pomocí CAD skic, automatické rozpoznávání prvků a pokročilé funkce řetězení (offsetování, zkracování, prodloužení), které umožňují změny geometrie bez nutnosti měnit CAD model.“ [12] Při tvorbě 2,5D operací je třeba brát v potaz, že nepracují s aktualizovaným zbytkovým materiálem. K tvorbě NC programů, na nichž bude provedena optimalizace posuvu pomocí Eureka Chronos budou využity pouze operace kapsa a kontura. Kontura je operace, která je plně řízena uživatelem.

Postup tvorby je následující:

- Výběr geometrie,
- nastavení nástroje a řezných podmínek,
- volba hloubky obrábění,
- volba hloubky řezu  $a_p$ ,
- možné nastavení odstupe a vzdáleností mezi jednotlivými řeznými drahami,
- nastavení přídaveků,
- volba, zda hrubovací nebo dokončovací operace. Lze nastavit i kombinaci,
- volba korekce,
- nastavení nájezdů, odjezdů a propojení mezi řezy.

Operace kapsa je též jako kontura řízena plně uživatelem. Řezné dráhy jsou vygenerovány na základě vybrané geometrie. Postup tvorby operace je následující:

- Výběr geometrie,
- nastavení nástroje a řezných podmínek,
- volba hloubky obrábění,
- volba hloubky řezu  $a_p$ ,
- volba technologie, dle které budou vygenerovány řezné dráhy viz obr. 1,
- nastavení hodnoty překrytí nástroje  $a_e$ ,
- nastavení přídaveků,
- volba, zda hrubovací nebo dokončovací operace. Lze nastavit i kombinaci,
- volba korekce,
- nastavení nájezdů, odjezdů a propojení mezi řezy.



Obr. 1: Volba technologie u operace kapsa. Foto autor

Programátor by měl u tvorby těchto operací postupovat tak, aby nevznikaly úseky programu, kde nástroj obrábí zbytečně „na prázdno“ nebo neefektivně vzhledem k objemu odebíraného materiálu za čas. Také by měl navolit vhodný nájezd a odjezd vzhledem k aktuálním podmínkám, a to jak z hlediska posuvové rychlosti, tak z hlediska typu nájezdu.

### 2.1.2 3D operace

V této sekci se nacházejí operace HSR, HSM a HSS. Jedná se o výkonné vysokorychlostní hrubovací i dokončovací operace k 3D frézování, u nichž je při generování řezných drah počítáno i s aktualizovaným zbytkovým materiálem. Jedná se o operace poloautomatické, u nichž CAM vygeneruje řezné dráhy na základě předem definované geometrie, kterou představuje samotný model obrobku. Tyto operace jsou vhodné pro složitější 3D modely jako jsou například formy či díly s mnoha tvarovými plochami. „*HSR/HSM nabízí jedinečné strategie obrábění a propojení. Pro zachování plynulého pohybu nástroje vyhlazuje všude kde je to možné, jak dráhy obrábění, tak dráhy přejezdů. Což je základním požadavkem pro udržení vysokých posuvů a eliminaci prodlev.*“ [13] Z výše zmíněných operací bude pro tvorbu NC programu využito vysokorychlostní hrubování HSR. Tato operace je vhodná zejména pro obrábění tvarových ploch jako obsahuje Díl 2.

Operace HSR-vysokorychlostní hrubování nabízí tyto možnosti obrábění: konturové, lineární, zbytkové a hybridní hrubování žeber. Řezné dráhy vytvořené touto operací jsou již samy z větší části optimalizovány, neboť HSR/HSM zajišťuje „*vyhýbání se ostrým rohům na dráze nástroje, což zajišťuje že nástroj zůstává co možná nejvíce v kontaktu se součásti a také optimalizuje pohyby, které neobrábí pro snížení obrábění naprázdno a generuje hladké a tečné nájezdy a odjezdy*“ [13] Přičemž tvorba programu je pak následující:

- Volba nástroje a řezných podmínek,
- možné omezení z hlediska hranic, jež mohou být plochy, siluety či profily,
- nastavení přídavek,
- výběr horní a dolní roviny Z,
- nastavení hloubky řezu  $a_p$ ,
- volba, zda bude obrábění probíhat s aktualizovaným polotovarem,
- nastavení propojení.

Jak u 3D tak u 2,5D operací může být výsledek práce ověřen pomocí simulace, kde je možné vidět případné kolize.

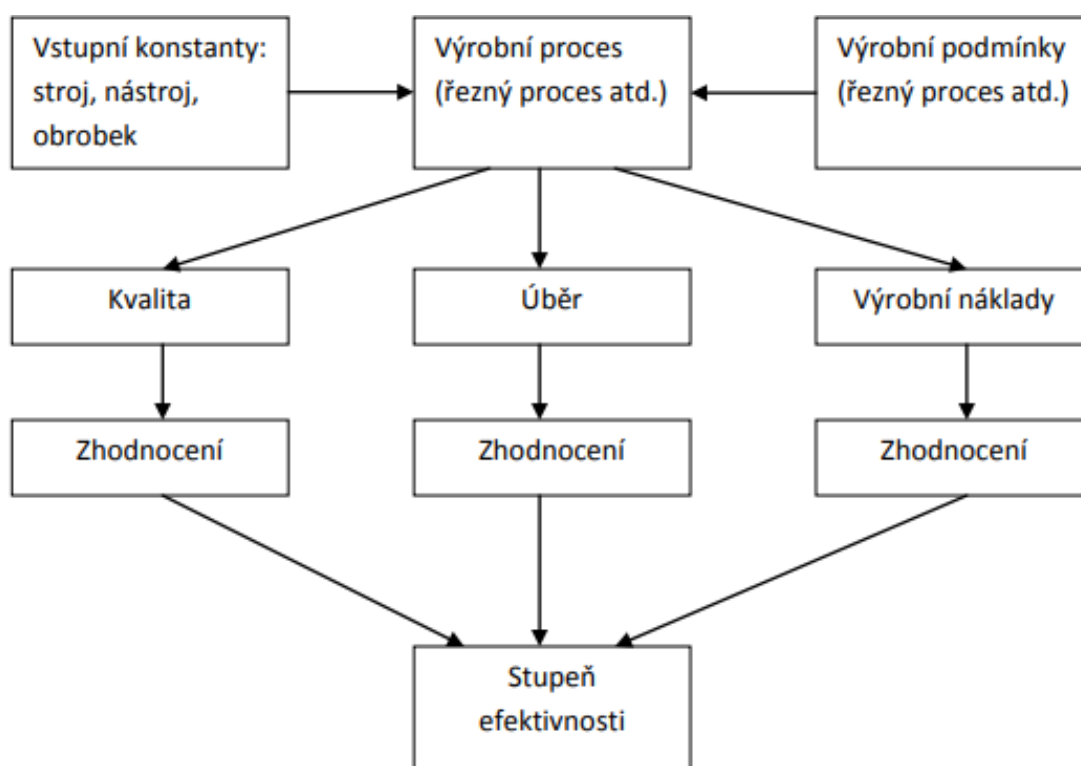
### 2.1.3 iMachining

Jednou z dalších operací, kterou je možné v systému SolidCAM využít je iMachining, jenž je na výběr jak v 2,5D tak 3D verzi. Oproti předešlým operacím je rozdíl v tom, že iMachining generuje již optimalizované dráhy nástroje i s řeznými podmínkami. Optimalizované podmínky pak vycházejí z typu obráběného materiálu a aktualizovaného polotovaru. Jelikož se tedy jedná o již optimalizovanou operaci, nebude iMachining při tvorbě NC programů použit. Sám SolidCAM na svých stránkách udává, že nástroj obrábí s plně optimalizovaným posuvem a otáčkami. Softwarová optimalizace posuvové rychlosti pomocí Eureka Chronos by zde tedy nenašla uplatnění [14].

## 2.2 Optimalizace NC kódu

O optimalizaci NC kódu lze říci, že je formou adaptivního řízení. Pojmem adaptivní lze pojmenovat systémy, jenž přizpůsobují vlastnosti měnícím se podmínkám. Adaptivní řízení lze chápat jako schopnost se přizpůsobit změnám prostředí ve kterém se proces v daný okamžik odehrává. „Jestliže adaptivní systém využívá k udržování nebo zlepšování svých vlastností zkušenosti z předchozí činnosti, nazýváme jej učícím se systémem. Adaptivní řídicí systém musí tedy vykonávat dvě funkce a to identifikaci a řízení [6].“

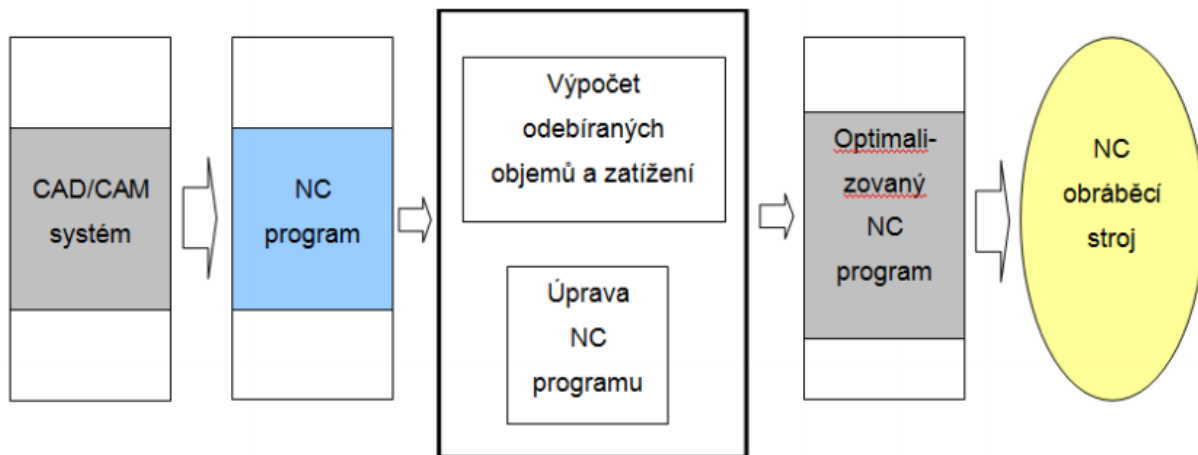
Optimalizaci NC programu lze zajistit dvěma způsoby, a to buď on-line nebo off-line systémy. Při využití on-line systémů dochází k optimalizaci během rezného procesu, zatímco při využití off-line systémů k optimalizaci dochází před samotným obráběním. Tato práce se bude zabývat optimalizací pomocí Eureka Chronos bude se tedy jednat o využití off-line systému [4,9].



Obr. 2: Základní blokové schéma závislosti adaptivního řízení [6]

### 2.2.1 Optimalizace off-line systémy – Softwarová optimalizace

Off-line systémy provádí analýzu obráběcího procesu před samotným obráběním. Tímto způsobem je snížena pravděpodobnost výskytu problému při odzkoušení nového programu. Výhodou je také to, že pro tuto optimalizaci není zapotřebí využití měřících senzorů, čímž se firmě ušetří náklady. Potřeba je pouze nějaký optimalizační software, jehož pomocí je pak optimalizován požadovaný parametr např. rezné podmínky. Optimalizační program může fungovat zcela nezávisle na CAD/CAM systémech nebo také může být součástí samotných CAD/CAM systémů [9].



Obr. 3: Schéma off-line systému pro optimalizaci procesu obrábění [9]

Optimalizační programy pracují s daty daného NC stroje, pro který je NC program optimalizován, dále pak vycházejí z vědomostních databází obráběcích technologií. Dalším důležitým faktorem je pak typ obráběného materiálu. K dispozici pak mohou mít dané optimalizační programy knihovny, kde jsou uloženy jednotlivé materiály i s jejich vlastnostmi. Některé softwary jsou vybaveny funkcí režimu učení, kdy jsou hodnoty rychlosti posuvu načteny z odladěného NC programu. Načtené hodnoty jsou poté uloženy do knihovny a lze je pak použít i pro jiné NC programy pro podobné či stejné materiály obráběné daným nástrojem. Tato vlastnost může uživateli ušetřit mnoho času a práce. Tím pak stačí daný materiál vybrat a již není potřeba zadávat jeho vlastnosti stále dokola. Program poté interpoluje řezné podmínky pomocí materiálových koeficientů, které zohledňují pevnost materiálu nebo jeho tepelné vlastnosti. Tímto procesem vznikne optimalizovaný NC program. Takovým postupem je možné zvýšit jak produktivitu obráběcího cyklu, tak životnost nástrojů [9,21].

Obecný postup pro softwarovou optimalizaci je následující:

- Tvorba NC programu viz kapitola 2.1,
- export dat do optimalizačního programu,
- nadefinování potřebných informací o polotovaru, použitých nástrojích a stroji,
- nadefinování omezujících podmínek pro optimalizační proces.

Dle možností daného softwaru pak lze optimalizovat:

- Řízení přejezdů nástroje rychloposuvem: Optimalizační software provede analýzu a v závislosti na polotovaru upraví přejezdy do takové podoby, aby nehrozila kolize s ještě neobroběným polotovarem, ale také aby přejezdy a nájezdy nebyly zbytečně zdlouhavé.
- Řezné podmínky: vzhledem obráběnému materiálu, a i k řeznému materiálu, může optimalizační program změnit  $v_c$ ,  $v_f$ ,  $a_p$  nebo  $a_e$  tak, aby byl řezný proces co nejefektivnější. Např. pokud byl programátorem nastaven posuv na  $v_f=800$  tak dle omezujících podmínek ho optimalizační program může nastavit do určitého rozmezí v závislosti na momentální situaci.
- Úpravy drah nástroje: Optimalizační software všechny dráhy zanalyzuje a v závislosti na aktualizovaném polotovaru nadbytečné dráhy odstraní či upraví nebo naopak dráhy nástroje přidá, aby zajistil konstantní úběr. Například dráhy, jenž neodebírají materiál ale pouze „vzduch“ jsou v NC programu obsaženy v průměru 5-30 % celkových drah

nástroje. Velké využití nalézá optimalizace také u tvarových ploch, protože standartní operace v CAM systémech využívají pro vygenerování drah pouze geometrii těles.

- Délku vyložení nástroje v držáku: optimalizační software určí optimální délku vyložení nástroje vzhledem k obráběnému dílu a drahám nástroje [9].

## 2.3 Eureka Chronos

Jedná se o software pro optimalizaci NC kódu, jenž je určený pro optimalizaci frézovacích operací ve 3 osách, 4 osách, 5 osách, indexovaně i souvisle. Eureka Chronos pracuje s většinou CAM programů, pro její chod však CAM systém není nutný. V případě, že tedy uživatel nemá systém CAM tak je třeba k danému NC programu nakonfigurovat tabulku použitých nástrojů a polotovar. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2. Analýza současného stavu, tak programy vytvořené v CAM mají při většině operacích konstantní hodnotu posuvové rychlosti. To otevírá prostor pro optimalizační softwary typu Eureka Chronos. Optimalizace probíhá na základě určitých algoritmů, které si společnost udržuje jako své know-how a má za cíl snížit obráběcí časy a případně zvýšit životnost použitých nástrojů [22].

Rozsah využití Eureka Chronos je velmi široký od hrubování, kde je cílem odstranit velký objem materiálu tak, aby byl obráběcí proces stabilní, přes dokončovací metody, až po odstranění problémů s nadměrným opotřebením nástroje. Zvýšením posuvu lze tedy snížit časy obrábění až o 30 %. Eureka Chronos tedy umožňuje využívat optimalizaci z hlediska zvýšení produktivity či z hlediska zvýšení životnosti nástroje. Využití pak nachází zejména u dílu s tvarovými plochami, kde obrábění obsahuje velké množství rezných drah. Může se jednat například o formy či jiné tvarově různorodé díly [10,22].

### 2.3.1 Požadavky pro chod Eureka Chronos

Pro optimalizaci NC kódu pomocí Eureka Chronos nestačí pouze původní neoptimalizovaný NC kód, ale zapotřebí jsou i další vstupy/informace a to:

- Specifikace obráběcího stroje: výkon, max. otáčky, max. posuvová rychlost,
- specifikace rezného nástroje: typ, materiál, počet zubů, rezná geometrie, délka,
- specifikace obráběného materiálu: tepelné a mechanické vlastnosti, rozměry,
- druhy obráběcí operace: hrubování, předdokončování, dokončování a tomu odpovídající rezné podmínky [10].

*„Chronos spolupracuje s většinou CAM programů (samozřejmě i SolidCAMu) a NC program je přenesen automaticky včetně tabulky nástrojů a jejich parametrů a polotovaru. Ale stejně tak může pouze načíst samostatně NC program. Pak je potřeba k programu nakonfigurovat tabulku nástrojů a případně i polotovar.“ [22].*

### 2.3.2 Princip fungování

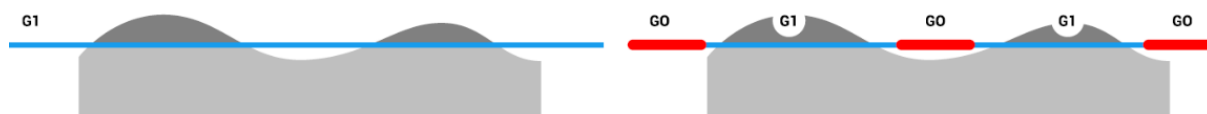
Eureka Chronos analyzuje rezný proces daného NC programu. Při „čtení“ programu analyzuje pohyby nástroje a čte hodnoty, jako je hloubka řezu, šířka řezu, tloušťka odebírané třísky a objem odebraného materiálu. To vše je prováděno s aktualizovaným polotovarem. Tím je zajištěno, že pohyby nástroje a úběr materiálu přesně odpovídají skutečnému proces. Veškerá optimalizace je přitom prováděna bez změny trajektorie rezného nástroje, upravován je pouze posuv. Samotná optimalizace probíhá na základě algoritmu A.I. (patentováno společností Roboris), jenž upravuje rychlost obrábění podle skutečných rezných podmínek nástroje, přičemž v maximální možné míře zohledňuje konstantní množství odebraného materiálu v časové jednotce. Díky takové analýze je Eureka Chronos schopna určit, kdy je nástroj méně



zatížen nebo zda pracuje za podmínek, které překračují naše předpokládané hodnoty. Výsledky analýzy jsou prezentovány ve formě přehledných grafů, které ukazují průběh posuvové rychlosti, a to jak před, tak po optimalizaci [10].

Je nutné si ovšem uvědomit, že s narůstající velikostí odřezávané tloušťky třísky se sice zvyšuje účinnost obrábění, ale její hodnota odřezávané tloušťky třísky příliš vysoká může dojít k „utavení“ nástroje nebo k plastické deformaci jenž může způsobit prasknutí nástroje. Naopak když je odřezávaná tříska příliš tenká může docházet k předčasnému otupení nástroje vlivem tření a tepla. Především má pak malá tloušťka odřezávané vrstvy vliv na nízkou produktivitu, což je zejména při sériové výrobě velice nežádoucí jev. Klíčem k efektivnímu obrábění je optimální posuvová rychlost vzhledem k odřezávané vrstvě. Optimalizační software Eureka Chronos je schopen vypočítat tloušťku odřezávané vrstvy v každém bodě. S touto znalostí poté může software pohyb nástroje rozdělit na menší segmenty a k těm přiřadit optimální posuvovou rychlost. Software poté odešle optimalizovanou dráhu nástroje, která je stejná jako ta původní jen s optimalizovanou rychlostí posuvu pro konkrétní body [10,23]

*„Chronos modifikuje posuvy v originálním NC programu. Pokud geometrie dráhy obsahuje dlouhý pohyb řízený jedním řádkem (dlouhý lineární řez), Chronos ho rozdělí do více částí (řádků) aby mohla realizovat různé posuvy (akceleraci a deceleraci). Geometricky ale dráha bude 100% stejná jako originální.“* [22] Toto rozdělení lze vidět na obr.8 kde je jeden dlouhý lineární pohyb s konstantním posuvem rozdělen na několik dílčích pohybů s různou rychlostí posuvu.



Obr. 4: Rozdělení bloku do dílčích segmentů [24]



Obr. 5: Změna hodnoty posuvové rychlosti [24]

Tímto způsobem tak harmonizuje řezné síly (odstraňuje silové špičky) a snižuje časy obrábění. Dané algoritmy si společnosti udržují jako své know-how [10].

Každý obráběcí proces je jiný, a tím se mohou měnit i cíle optimalizace. Při optimalizaci pomocí A.I. lze nastavit, zda chceme maximálně možné zvýšit produktivitu či životnost nástroje. Toto nastavení probíhá skrze tzv. performance indexu, jež má hodnotu 1 až 5, přičemž jedna je maximální životnost řezného nástroje a hodnota 5 značí maximálně možnou produktivitu. Proces optimalizace pak může být proveden nejen pomocí umělé inteligence A.I. ale i skrze následující uživatelská optimalizační omezení:

- Kroutící moment/síla – pomocí těchto metod lze optimalizovat tak, aby byl využit maximální výkon stroje. (Vhodné pro hrubovací operace),
- objem odebraného materiálu – cílem této metody je pokud možno dosáhnout konstantního úběru materiálu za jednotku času,

- tloušťka třísky – metoda určená k dosažení konstantní tloušťky třísky, jenž je určujícím faktorem pro opotřebení nástroje,
- kombinace metod – uživatel může kombinovat výše uvedené metody tak, aby bylo kontrolováno více parametrů najednou.

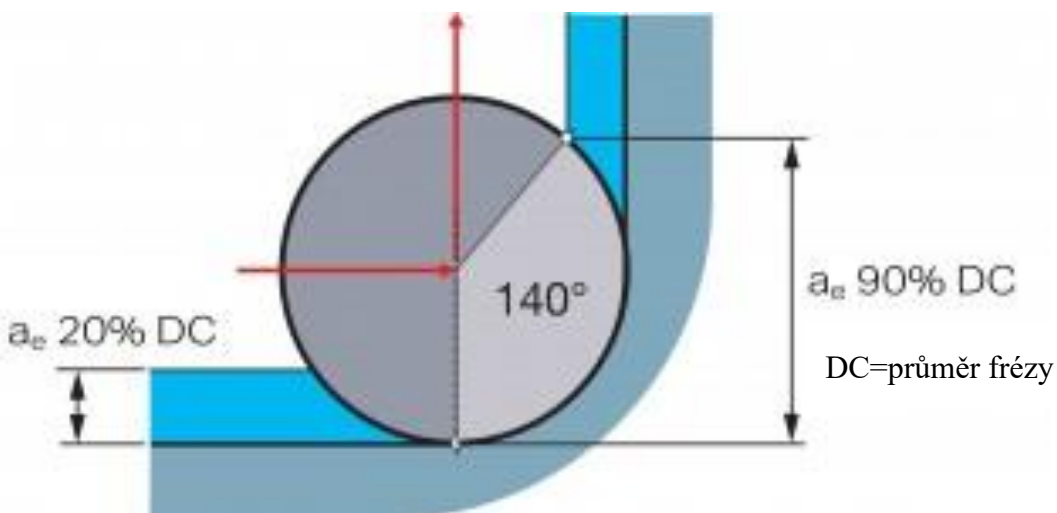
Optimalizace pomocí umělé inteligence A.I. je přívětivá i pro uživatele, kteří nemají hlubší znalosti z hlediska teorie obrábění. Samotný proces optimalizace je vcelku bezstarostný a uživatel pouze volí omezení z hlediska možného zvýšení či snížení posuvové rychlosti a nastavení performance indexu. Umělá inteligence nepracuje s druhem obráběného materiálu, jejím cílem je pouze optimalizovat posuv v daném rozsahu v jakém ho uživatel dovolí a tím harmonizovat řezné síly při obrábění. Omezení z hlediska posuvu je však potřebné navolit i pro uživatelské metody optimalizace. Je tedy velice důležité, aby programátor správně zvolil řezné podmínky pro daný obráběcí proces s ohledem na využití nástroje, obráběný materiál či použité operace. Uživatel se může rozhodnout, že každý nástroj bude optimalizován různou metodou, což dává příležitost sladit příslušnou metodu s možnostmi každého nástroje [10].

### 2.3.3 Kritická místa optimalizace

Během obrábění může docházet v určitých oblastech ke skokovému nárůstu řezných sil, jenž pak mají za následek nekvalitní povrch obrobku, zvýšené opotřebení nástroje nebo v krajním případě vznik zmetku či zničení řezného nástroje. Tyto oblasti lze označit za kritická místa. V těchto oblastech je důležité, aby programátor zvolil správnou strategii/technologie obrábění a aby též byla zvolena vhodná posuvová rychlost. Pro tyto případy je pak vhodné využít optimalizační software, který zajistí upravení posuvové rychlosti. Takto lze zabránit vznikajícím vibracím a zároveň zamezit zbytečným prodlevám kvůli příliš nízkému posuvu [25].

- **Místa se skokovým nárůstem opásání frézy**

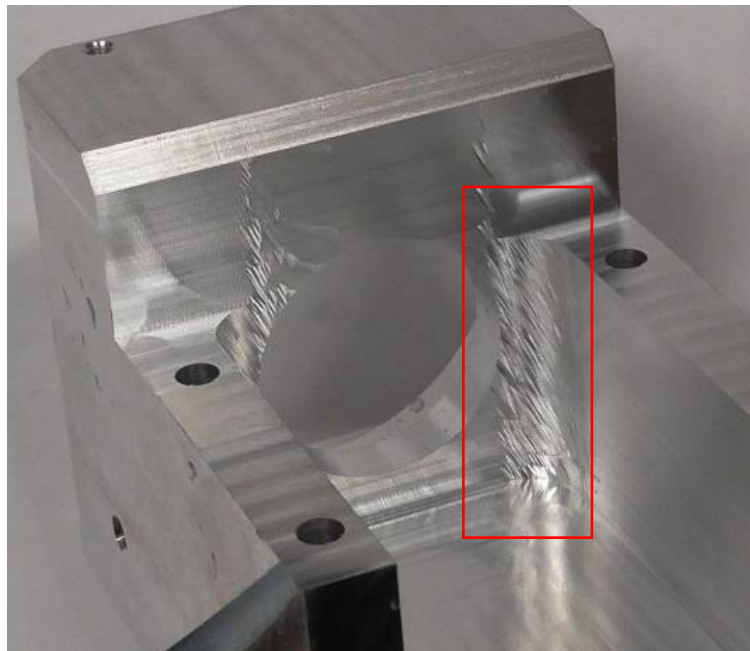
Kritickými místy mohou být z hlediska posuvů například vnitřní rohy obrobku, kdy při nájezdu do vnitřního rádiu dochází ke zvětšení radiálního oblouku (viz obr), jenž pak klade extrémní nároky na břit. Dochází zde také ke skokovému nárůstu odebraného materiálu za čas, tento problém však lze eliminovat snížením posuvové rychlosti.



Obr. 6: Frézování rohů [25]

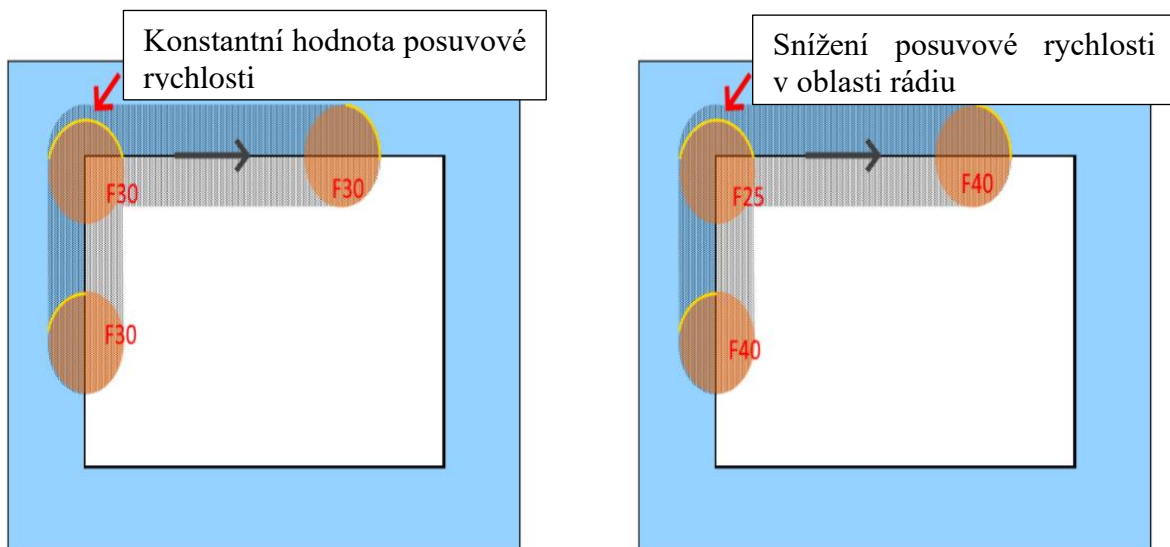
To pak může způsobit již zmíněné problémy jako je nekvalitní povrch, který lze vidět na obr.6 či poškození nebo zvýšené opotřebení nástroje. Tyto jevy jsou způsobeny ztrátou stability obráběcího cyklu a vzniku vibrací. Při větším kolísáním řezných sil

může dojít též k podříznutí rohu. Pro obrábění těchto vnitřních rohů je vždy vhodné použít nástroj o menším poloměru, než je obráběný rádius, avšak mohou být i situace, kdy je nutné využít frézu o stejném poloměru jako je poloměr rádiu nástroje [25].



Obr. 7: Nekvalitní povrch v rozích [27]

Na obr. 8 lze vidět, jak pomocí Eureka Chronos byla změněna konstantní hodnota posuvové rychlosti na optimalizovanou hodnotu v určitém rozsahu dle aktuální situace. Tedy v určitých oblastech, kde jel nástroj zbytečně pomalu, byla posuvová rychlost zvýšena, ale v oblasti rádiu, kde došlo ke skokovému nárůstu opásání a též množství odebraného materiálu za jednotku času byla posuvová rychlost snížena. [24,25]



Obr. 8: Změna posuvové rychlosti po optimalizaci [24]

- **Nájezdy a výjezdy frézy z materiálu**

Při tvorbě programu by měl programátor, pokud je to možné zajistit to, aby fréza zbytečně nevycházela ze záběru a následně poté nemusela do materiálu opětovně

zajíždět, neboť tyto nájezdy a výjezdy by mohly způsobit vznik pnutí v břitě nebo vyvolat nepříjemné vibrace a zvukové emise během procesu obrábění. V případě, že to situace neumožňuje, je vhodné zajistit alespoň vhodný typ nájezdu například, aby dráha byla odvalovací nebo po oblouku a také přizpůsobit řezné podmínky daným okolnostem [26].



Obr. 9: Změna rychlosti z konstantní hodnoty [24]

### 2.3.4 Přínosy Eureka Chronos

„Použití programu Eureka Chronos k optimalizaci NC kódu přináší měřitelné výhody v podobě sníženého opotřebení nástroje a kratší doby obrábění. Použití optimalizace nejčastěji vede ke snížení doby obrábění o 10–15%. U delších procesů nebo operací, kde se odstraňuje velké objemy materiálu, mohou úspory času dosáhnout až 30%. To se promítá přímo do nákladů na zpracování a zisku pro celou společnost.“ [10]

Požizovací cena kompletní Eureka Chronos se pohybuje okolo 250 000 Kč. Návratnost si lze vypočítat pomocí investiční kalkulačky jenž je k dispozici na stránkách: <https://www.roboris.it/cs/eureka-chronos/>. Obecně platí, že se zvyšujícím se objemem výroby roste rychlost finanční návratnosti. Zde je uvedena modelová situace možného využití a návratnosti: „Předpokládejme že máte jeden tříosý CNC stroj s průměrným využitím okolo 50 hodin týdně a hodinu na stroji počítáte (pro jednoduchost) 1000,- Kč. Při průměrné 20% úspoře času ušetříte týdně 10 hodin, tedy 10.000,- Kč. Za měsíc je to již 40.000,- Kč a Chronos se vám zaplatí přibližně za 6-7 měsíců. Při větším počtu strojů, více směnách se návratnost výrazně zkracuje.“ [22].

Využití Eureka Chronos tedy může přinést následující výhody.

- Zkrácená doba obrábění,
- snížení nákladů na nástroje,
- redukce vibrací,
- zvýšení kvality povrchu,
- harmonizace řezných sil,
- průmysl 4.0,
- umělá inteligence A.I. [24].

## 2.4 Konkurenční optimalizační softwary

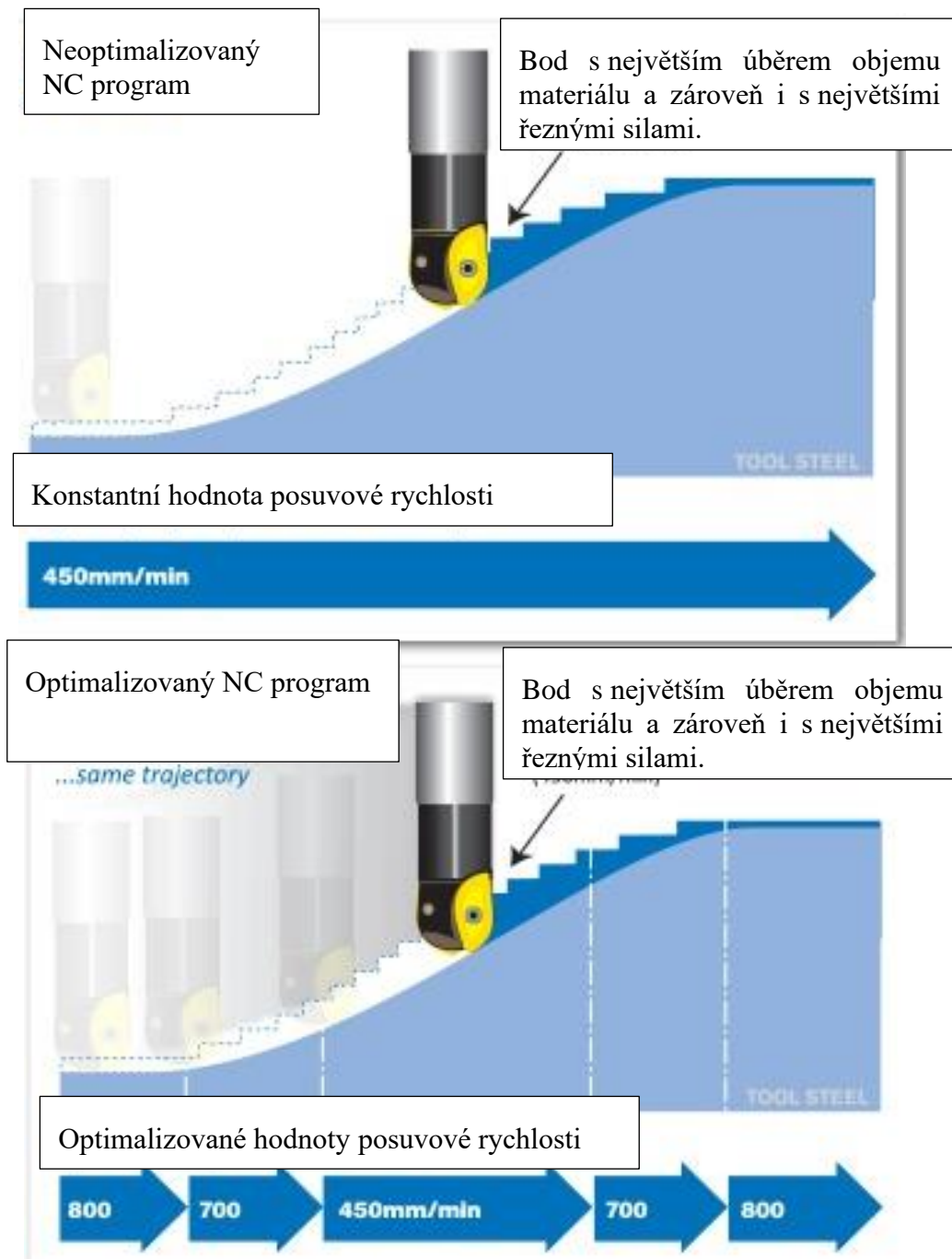
Na trhu existuje celá řada optimalizačních softwarů, v této kapitole budou ve zkratce popsány některé z nich.

### 2.4.1 Vericut

Tento program je určen pro verifikaci drah a optimalizaci NC kódu. Vericut dokáže detekovat kolize, chyby v NC kódu nebo oblasti neefektivního obrábění. Pomocí modulů OptiPath a Force Turning dokáže též Vericut optimalizovat NC program, čímž je možné zvýšit produktivitu a kvalitu povrchu. Tento program je využíván v průmyslu již od roku 1988.

Vericut využívá i jako jiné optimalizační programy databázi dat a koeficientů určených pro optimalizaci, které byly experimentálně získány skrze velké počty analýz. Jeho moduly nacházejí využití jak u 3-osého tak u víceosého obrábění [20].

- OptiPath je modul pomocí něhož probíhá optimalizace posuvové rychlosti tak, aby bylo dosaženo optimálního zatížení pro maximální produktivitu obráběcího procesu. Proces úprav NC programu probíhá pomocí optimalizačních algoritmů. Díky těmto úpravám se pak sníží opotřebení nástrojů, sníží se čas obrábění a také se zlepší kvalita obráběných ploch [28].



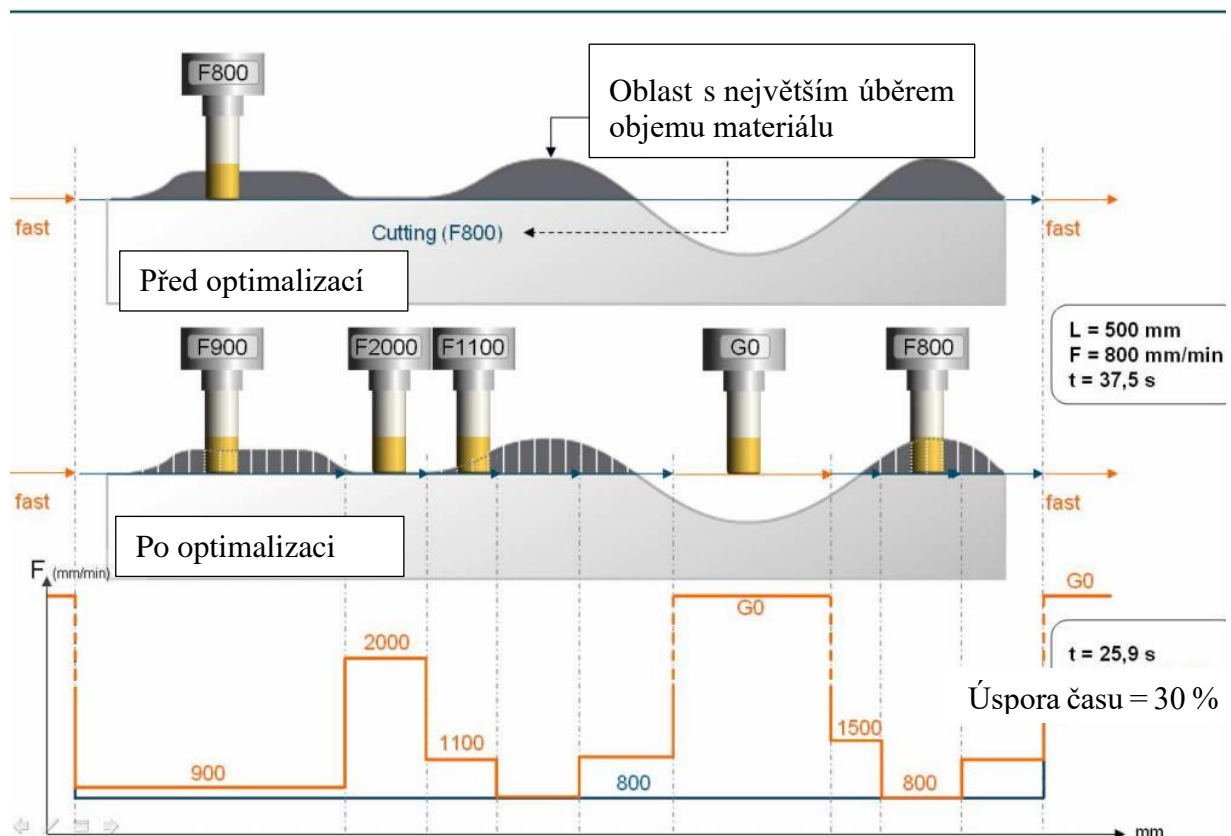
Obr. 10: Optimalizace posuvu-OptiPath [28]

- VERICUT Force je optimalizační modul, který analyzuje a optimalizuje řezné podmínky v NC programu na základě typu obráběného materiálu, nástroje a stroje. Tento modul pracuje s maximální řeznou silou a dle toho je upravována posuvová rychlost pro různé situace [9].

#### 2.4.2 NCSimul

Jedná se o modulární systém společnosti HEXAGON, jenž má za cíl předcházet kolizím, optimalizovat řezné podmínky a zvýšení efektivity obráběcího cyklu. Využití nachází jak pro 3-osé tak více osé obrábění. OPTITOOL se zaměřuje na přejezdy ve vzduchu a optimalizaci posuvu:

- Přejezdy mimo materiál: co se týče přejezdů na prázdko, tak ty se modul snaží odstranit, přičemž OPTITOOL si vytvoří obálku nad obráběnými plochami, jenž definuje mez, od které se přepíná posuv a rychloposuv.
- Optimalizace posuvu: zde systém rozdělí již existující řádky NC kódu na menší segmenty, jenž reagují na změny řezných podmínek dle různých parametrů. Například dle množství odebraného materiálu za jednotku času. Optimalizace pak probíhá bez změny dráhy obrábění, pouze optimalizuje posuv v rozsahu, jenž zadal uživatel. Tyto změny vedou k zvýšené životnosti nástrojů a k snížení doby obrábění zhruba o 10-20 % [29, 30].

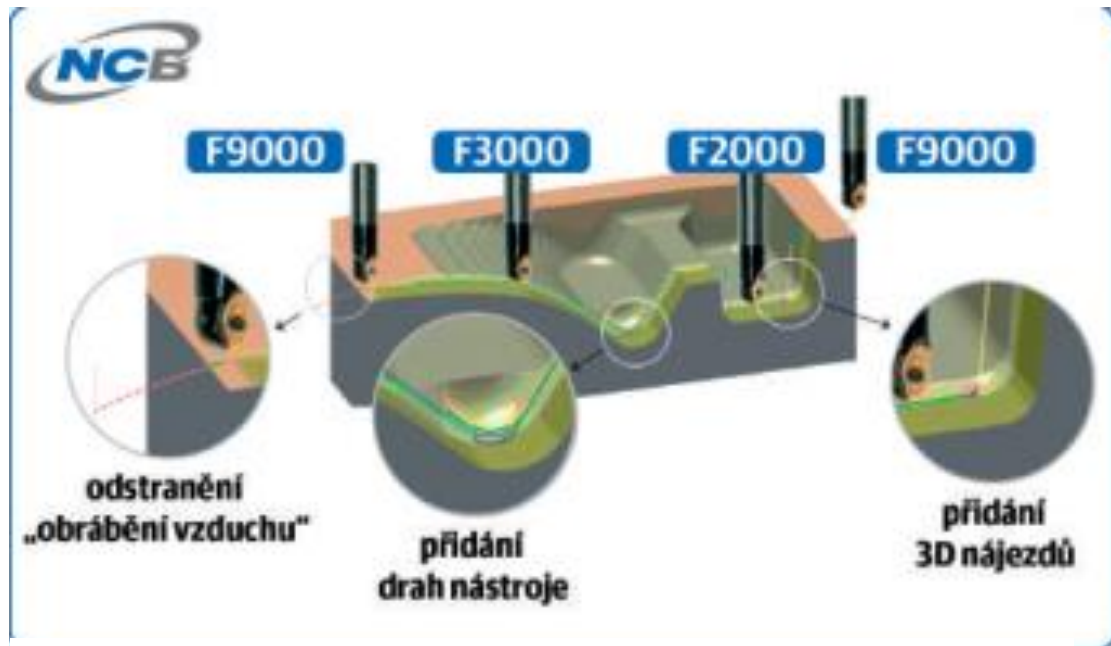


Obr. 11: Optimalizace posuvu - OPTITOOL [29]

#### 2.4.3 NCBrain

Tento optimalizační software má za cíl odstranit obrábění ve „naprázdno“, optimalizaci řezných podmínek či přidání řezných drah nástroje nebo také určení vhodného vyložení

nástroje. Na obr.12 níže lze vidět jak NCBrain jako i ostatní optimalizační softwary upravuje hodnotu posuvu vzhledem k aktuálním řezným podmínkám.



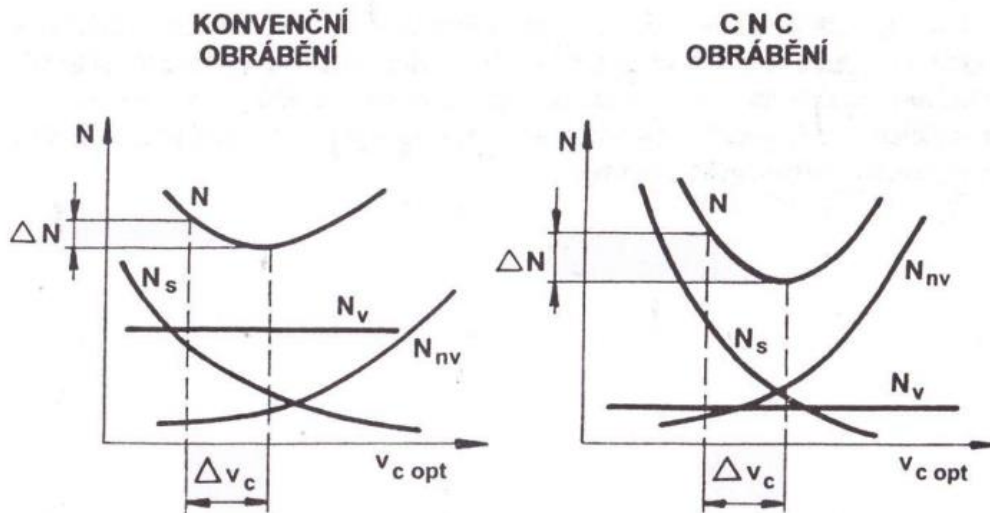
Obr. 12: Možnosti optimalizace – NCBrain [31]

- Při optimalizaci NC kódu dochází k analýze kolik materiálu je v jakém momentě odebráno a z těchto informací následně proběhne optimalizace posuvové rychlosti. Opět jako u všech již zmíněných softwarech i zde nastavuje uživatel podmínky a omezení, kterými se bude optimalizace řídit.
- Změny způsobené optimalizací NC kódu tedy mohou zvýšit produktivitu, vyšší kvalitu obrobenech ploch a předejetím případným kolizím v soustavě stroj-nástroj-obrobek [31].

## 2.5 Trvanlivost nástroje

Přestože Eureka Chronos nabízí optimalizaci pomocí umělé inteligence i za účelem zvýšení trvanlivosti nástroje, kde není vyžadována hlubší znalost z hlediska teorie obrábění, tak je zde také možnost optimalizace dle uživatelem zadaných omezení. Pro tento případ je potřeba znát hlubší souvislosti, a tedy i určitá kritéria a omezující podmínky pro správně fungující program. Volba řezných podmínek má na trvanlivost nástroje značný vliv. K řezným nástrojům výrobce sice přidává doporučené řezné podmínky, při aplikaci těchto podmínek však nelze vždy zaručit, že jsou optimální pro daný řezný proces. Tyto podmínky je pak třeba optimalizovat pro daný typ operace. Optimalizaci řezných podmínek lze v současnosti provést pomocí komplexního výpočtu, jehož výstupem by měly být optimální řezné podmínky a trvanlivost břitů. Jedná se o složité výpočty, proto se v praxi tyto hodnoty nejčastěji získávají skrze vhodný software [32].

Z hlediska řezných podmínek má pak největší vliv na životnost nástroje řezná rychlost  $v_c$ . Nutno však brát v potaz to, že optimální hodnoty  $v_c$  jsou jiné pro moderní CNC stroje ve srovnání například s konvenčními stroji. Vliv řezné rychlosti a také rozdíl mezi konvenčním obráběním a CNC obráběním lze vidět na obr.13.



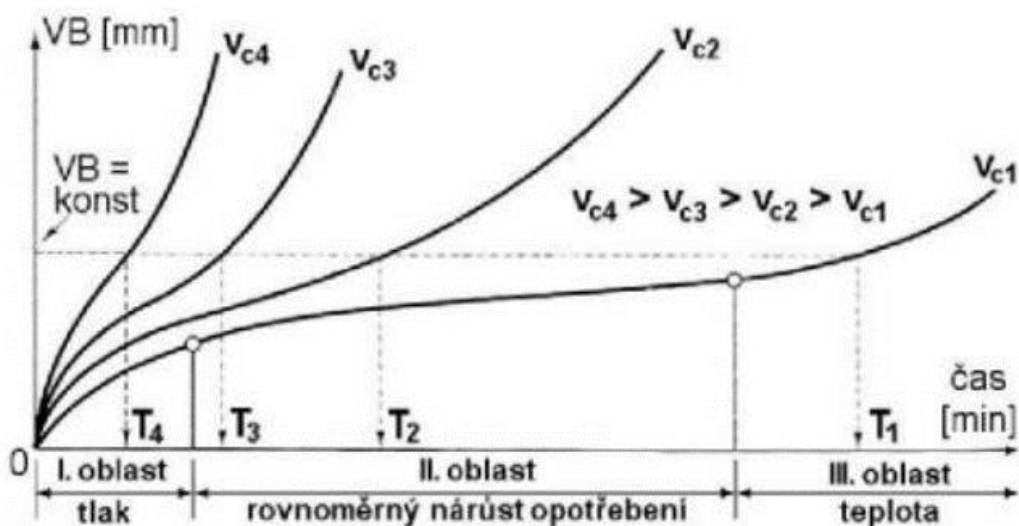
Obr. 13: Závislost celkových výrobních nákladů N a jejich složek na řezné rychlosti [32]

Jak již bylo řečeno největší vliv na trvanlivost nástroje má řezná rychlost, už pouhé zvýšení řezné rychlosti o 10 % může způsobit zkrácení trvanlivosti až o 50 %. Tuto skutečnost lze ověřit pomocí Taylorova vztahu. Tento vztah byl vyjádřen v počátcích 20. století americkým strojním inženýrem Fredericem Winslowem Taylorem a je zaměřen na účinek řezných rychlostí při konstantní rychlosti posuvu a hloubce řezu [32, 33].

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}]$$

Kde:

- $v_c$ : řezná rychlost [m/min],
- $m$ : míra závislosti na řezné rychlosti,
- $c^T$ : konstanta.



Obr. 14 : Závislost opotřebení VB při různých  $v_c$  [32]

Dalším aspektem, jenž ovlivňuje trvanlivost je hloubka řezu, když bychom opět uvažovali o zvýšení hodnoty o 10 % tak by se trvanlivost nástroje mohla zmenšit zhruba o 5 %. V případě



že dojde k zvýšení hodnoty hloubky řezu a zároveň se k němu vhodně navolí zbylé řezné podmínky je pak vliv na opotřebení relativně zanedbatelný. Dalším důležitým faktorem je volba posuvové rychlosti. Touto problematikou se bude tato DP zabývat nejvíce, neboť v praktické části se bude optimalizovat právě posuvová rychlost pomocí Eureka Chronos. Hodnotu posuvu volí programátor takovou, aby obrábění bylo dostatečně efektivní. Obecně opět platí, že se zvyšující se rychlostí posuvu klesá trvanlivost nástroje. Hodnota posuvu už hraje znatelně větší roli například oproti hloubky řezu, při zvýšení posuvu o 10 % může dojít ke snížení trvanlivosti zhruba o 20 %. Nutno ovšem brát v potaz, že tyto hodnoty se budou lišit dle obráběného materiálu a také dle jeho tepelného zpracování. Další velký vliv bude mít použití moderních technologií obrábění jako například HSC-vysokorychlostní obrábění nebo HFC-vysoko posuvové obrábění a k tomu vybraný obráběcí nástroj [32, 33].

## 2.6 Kritéria optimálnosti

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, tak pro optimalizaci pomocí uživatelem zadaných omezení je vyžadována hlubší znalost z hlediska teorie obrábění. Optimalizace je obecně prováděna na základě dvou kritérií, jedná se o kritérium optimálnosti a jednotlivých omezujících podmínek. Kritérium optimálnosti lze rozumět jako vybranému postupu výpočtu, dle kterého je pak řešena optimalizace řezných podmínek. V praktické části bude využita a podrobně zkoumána optimalizace dle uživatelem zadaných omezení.

### 2.6.1 Kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů

Cílem tohoto kritéria je docílit minimálních výrobních nákladů s optimalizovanými řeznými podmínkami. V praxi se jedná o nejvíce využívané kritérium. Lze ho vyjádřit následujícím vztahem:

$$\begin{aligned}N_c &= N_s + N_n + N_v \\N_s &= t_{AS} + N_{sm} \\N_n &= z_v + N_{nT} \\N_v &= t_{AV} + N_{vm}\end{aligned}$$

Kde:

- $N_c$ : celkové náklady na výroby jednoho kusu,
- $N_s$ : náklady na strojní práci,
- $N_n$ : náklady na nástroj a jeho výměnu při jednom obrobku,
- $N_v$ : náklady na vedlejší práci,
- $N_{sm}$ : náklady na minutu strojní práce,
- $N_{nT}$ : náklady na nástroj a jeho výměnu, vztažené na jednu trvanlivost,
- $z_v$ : počet výměn nástroje, vztažený na jedno obrobení kusu,
- $N_{vm}$ : náklady na minutu vedlejší práce,
- $t_{AS}$ : jednotkový strojní čas [min],
- $t_{AV}$ : jednotkový vedlejší čas [min].

Náklady jsou dány v měně, se kterou daná firma operuje [32].

### 2.6.2 Kritérium optimálnosti z hlediska maximální produktivity

Toto kritérium lze chápat jako maximální počet vyrobených dílů za jednotku času. Využití nachází zejména v těch případech, kdy je výrobní podnik tlačen termínem dodání. „V případě

*určitého termínu je možné kombinovat kritérium maximální produktivity s kritériem minimálních výrobních nákladů, tak aby náklady na obrábění byly minimální a současně, aby byl dodržen termín dohotovení dávky výrobků“ [32].*

$$t_u = t_{As} + t_{vn} \times z_v$$

Kde:

- $t_u$ : čas operačního úseku [min],
- $t_{As}$ : strojní čas [min],
- $t_{vn}$ : čas výměnu nástroje a jeho seřízení [min],
- $z_v$ : počet výměn nástroje, vztažený na jedno obrobení kusu.

### 2.6.3 Vícekriteriální optimalizace

V praxi je často požadován kompromis mezi maximální produktivitou a minimálními výrobními náklady. Pro takové případy pak slouží vícekriteriální optimalizace. Přičemž důležitost určitému kritériu dodává váhový koeficient  $r$  [32].

Vícekriteriální optimalizaci lze vyjádřit následující rovnicí:

$$K_V = r \times \frac{N}{N_0} + (1 - r) \times \frac{t_u}{t_{u0}} \text{ [min]}$$

Kde:

- $r$ : váhový koeficient  $0 \leq r \leq 1$ ,
- $N_0$ : odhad hodnoty nákladové funkce  $N$ ,
- $t_{u0}$ : odhad hodnoty  $t_u$  [32].

## 2.7 Omezující podmínky

Při tvorbě NC programu je třeba brát v potaz omezující podmínky pro daný obráběcí proces. Obecně lze říci, že čím více omezujících podmínek proces má, tím se stává jeho optimalizace složitější. Tyto omezení jsou dány obráběcí soustavou, jenž tvoří stroj, nástroj, obrobek (S-N-O) a roli hraje též řezné prostředí. Omezující podmínky pak lze vyjádřit jako soubor nerovnic s výjimkou Taylorova vztahu jenž je tvořen rovnicí. Nyní bude následovat popis nejčastějších omezení, jenž se v praxi vyskytují. Jedná se o technická a technologická omezení. S těmito omezeními se mohou firmy potýkat relativně často, potřebné je pak aby programátor zvolil takové technologie, které budou s danými možnostmi proveditelné a také co nejefektivnější [32].

### 2.7.1 Omezení výkonem stroje

Jedná se o nejdůležitější omezení z hlediska hrubování, jenž je dáno vztahem:

$$P_c \leq P_{u\dot{z}} = P_e \times \eta$$

Kde:

- $P_c$ : řezný výkon [W],
- $P_{u\dot{z}}$ : užitečný výkon hlavního elektromotoru stroje [W],
- $P_e$ : výkon elektromotoru stroje [W],

- $\eta$ : mechanická účinnost stroje [%].

$$P_c \leq P_{u\dot{z}} = P_e \times \eta$$

$$P_c = \frac{F_c \times v_c}{60} \text{ [W]}$$

Pro frézování se pak vyjádří řezná síla dle empirického vztahu:

$$F_c = k_{Fc} \times a_p^{x_{Fc}} \times f_z^{y_{Fc}} \times v_c^{z_{Fc}} \times B^{u_{Fc}} \times z \times D_n^{w_{Fc}} \text{ [N]}$$

Kde:

- $F_c$ : řezná síla [N],
- $B$ : šířka odřezávané vrstvy [mm],
- $f_z$ : posuv na zub [mm],
- $z$ : počet zubů nástroje,
- $a_p$ : hloubka řezu [mm],
- $D$ : průměr frézy [mm],
- $k_{Fc}$ ,  $x_{Fc}$ ,  $y_{Fc}$ ,  $z_{Fc}$ ,  $u_{Fc}$ ,  $w_{Fc}$ : empirické konstanty.

Lze uvažovat, že vliv řezné síly na řeznou rychlost je zanedbatelný, pak lze vyjádřit omezující podmínku následujícím vztahem: [32]

$$a_p^{x_{Fc}} \times f_z^{y_{Fc}} \times n \leq \frac{1000 \times 60 \times P_e \times \eta}{k_{Fc} \times \pi \times B^{u_{Fc}} \times z \times D_n^{w_{Fc}+1}}$$

### 2.7.2 Omezení maximálním kroutícím momentem

Tato podmínka je důležité zejména ke vztahu k upínání obrobku. Hodnota kroutícího momentu by tedy neměla přesáhnout určité meze, aby nedošlo k uvolnění obrobku. Kontrolovat tuto podmínku lze eventuálně i z jiných důvodů [32].

Podmínka je dána vztahem:

$$M_k \leq M_{k \max}$$

Kde:

- $M_{k \max}$ : maximální přípustný kroutící moment [N.m],
- $M_k$ : kroutící moment na vřetenu [N.m].

$$M_k = F_c \times \frac{D}{2}$$

Při dosazení do rovnice  $M_k \leq M_{k \max}$  a následné úpravě získáme následující vztah

$$a_p^{x_{Fc}} \times f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{2 \times M_{k \max}}{k_{Fc} \times D}$$

Následně se analogicky odvodí omezující podmínka pro frézování

$$a_p^{x_{Fc}} \times f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{2 \times M_{k \max}}{k_{Fc} \times B^{u_{Fc}} \times z \times D_n^{w_{Fc}+1}}$$

### 2.7.3 Omezení maximální přípustnou silou řezání

Tato omezující podmínka je brána z hlediska pevnosti nástroje nebo obrobku. Ačkoliv lze uvažovat s působením všech složek sil, tak se v praxi pro zjednodušení obvykle uvažuje pouze s řeznou složkou síly. Omezující podmínku pak lze vyjádřit takto [32]:

$$F_c \leq F_{c \max}$$

Po dosazení za  $F_c$ :  $F_c = k_{Fc} \times a_p^{x_{Fc}} \times f_z^{y_{Fc}} \times v_c^{z_{Fc}} \times B^{u_{Fc}} \times z \times D_n^{w_{Fc}} [N]$

Získáváme následující tvar:

$$a_p^{x_{Fc}} \times f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{F_{pc \max}}{k_{Fc} \times v_c^{z_{Fc}} \times B^{u_{Fc}} \times z \times D_n^{w_{Fc}}}$$

V některých případech je pak třeba uvažovat kombinované namáhání výslednou silou, jenž je výslednicí pasivní a řezné síly

$$a_p^{x_{Fc}} \times f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{F_{pc \max}}{\sqrt{1 + k_{pc}^2} \times k_{Fc} \times B^{u_{Fc}} \times z \times D_n^{w_{Fc}}}$$

Kde:

- $F_{pc \max}$ : maximálně přípustná velikost výslednice řezné a pasivní síly [N],
- $k_{pc}^2$ : konstanta.

Lze také omezující podmínku maximální řezné síly vyjádřit z následujícího jednoduchého tvaru:

$$f \leq f_{\max}$$

Kde:

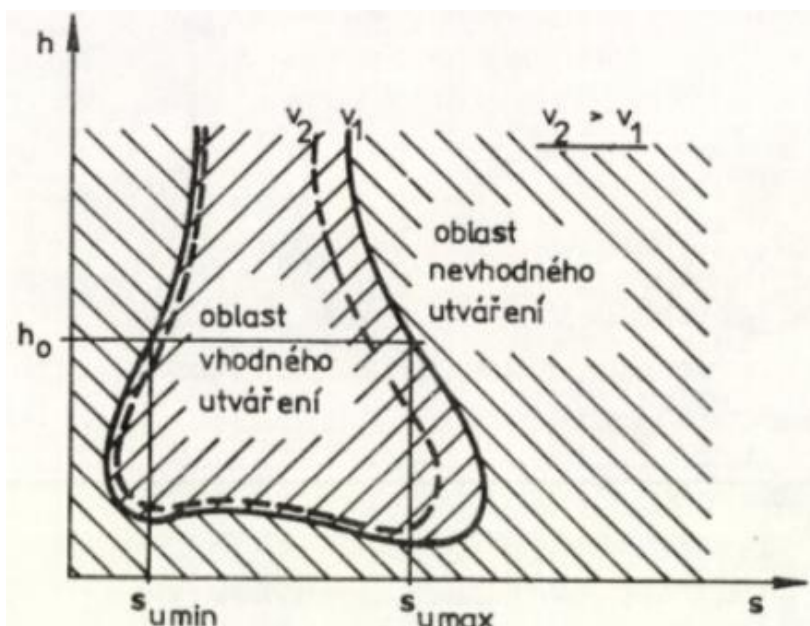
- $f_{\max}$ : maximální přípustná velikost posuvu z hlediska působení řezné síly v [mm/ot]

Využití nachází tato omezující podmínka především z hlediska křehkých lomů bříty. Velikost  $f_{\max}$  je pak určena experimentálně nebo jsou využity zkušenosti při obrábění ve stejných či velmi podobných řezných podmínkách [32]. Omezení vhodným utvářením třísky

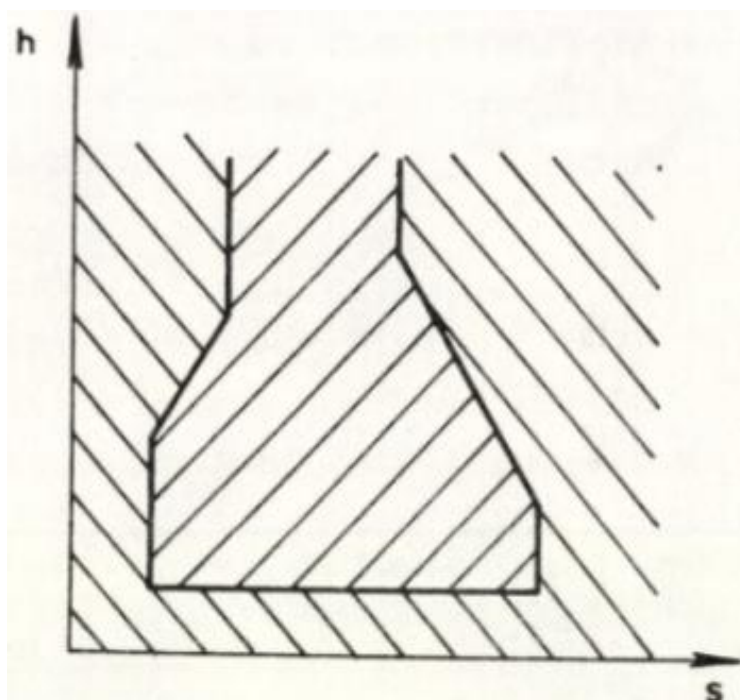
Při obráběcích operacích je třeba zajistit to, aby docházelo k vhodnému utváření třísky, a to proto aby:

- Se třísky nedostávaly zpět k ostří, což by mohlo mít za následek poškození bříty.
- Se třísky neomotávali kolem nástroje a tím nezpůsobily problém během výměny nástrojů.

Oblasti vhodného utváření třísek jsou získávány pomocí experimentálních měření pro určitý nástroj a obráběný materiál. Oblasti utváření třísek se mění dle řezných podmínek, hlavní roli pak hraje zejména řezná rychlost [32].



Obr. 15: Oblast vhodného utváření třísek [32]



Obr. 16: Oblast vhodného utváření třísek pro matematický model [32]

Dle grafů, lze vidět, že se zvýšenou řeznou rychlostí se oblast vhodného utváření zmenšuje, se zvýšeným posuvem je toto zmenšení ještě ztelnější. Pro matematický model hranice je využívána lomená čára, tento typ diagramu lze vidět na obr... Tuto čáru pak lze vyjádřit pomocí systému nerovnic.

Pro optimalizaci řezných podmínek je pak vhodné využít určitou hloubku řezu  $a_p$ . Pak lze vyjádřit omezující podmínku v následujícím tvaru [32]:

$$f \leq f_{u \max}$$

$$f \geq f_{u \min}$$

Kde:

- $f_{u \min}$ : minimální přípustná velikosti posuvu [mm/ot],
- $f_{u \max}$ : maximální přípustná velikosti posuvu [mm/ot].

„Pro stanovení správných řezných podmínek musíme znát oblasti vhodného utváření třísek. Někteří výrobci obráběcích nástrojů uvádějí tyto oblasti v katalozích nabízeného sortimentu. Pokud tyto oblasti neznáme, musíme je stanovit experimentálně [35].“

#### 2.7.4 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy

Toto omezení nabývá na významu při obrábění na čisto. Vyjadřuje určité omezení z hlediska požadované drsnosti obrobené plochy, lze jej vyjádřit takto:

$$R_a \leq R_{a \max}$$

Kde:

- $R_a$ : aritmetická úchylka obrobené plochy [ $\mu\text{m}$ ],
- $R_{a \max}$ : maximálně přípustná aritmetická úchylka obrobené plochy [ $\mu\text{m}$ ].

V odborné literatuře je možné nalézt mnoho empirických a odvozených vztahů, ty jsou však vždy vyjádřeny pro určité podmínky obrábění [32].

#### 2.7.5 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy

V případě, že není předpokládáno radiální otupení nástroje tak lze způsobenou nepřesnost přisoudit elastické deformaci soustavy S-N-O tedy stroj – nástroj – obrobek, vlivem působení řezných sil. U nepřesnosti má většinou primární roli pouze deformace jednoho ze zmíněných členů soustavy S-N-O, přičemž pak deformace dalších členů jsou při výpočtu zanedbatelné. Podmínka je popsána následující rovnicí:

$$d(\sigma) \leq d_{\max}$$

Kde:

- $d$ : deformace příslušného členu pod působením řezné síly [mm],
- $d_{\max}$ : maximální přípustná velikost deformace z hlediska tolerance obrobené plochy [mm].

Deformace určitého členu vlivem řezných sil je formulována jako funkce řezné síly případně jako funkce složek řezných sil a omezující podmínka je pak určena z pohledu požadované přesnosti dané obráběné plochy [32].

#### 2.7.6 Omezení dané minimálními a maximálními otáčkami

Toto omezení je třeba formulovat tak, aby mohly být otáčky nastaveny v určitém rozsahu. Toto omezení je dáno následující rovnicí.

$$n \leq n_{\max}$$

$$n \geq n_{\min}$$

Kde:

- $n$ : otáčky [m/min],
- $n_{\max}$ : maximálně možné otáčky k danému stroji,
- $n_{\min}$ : minimálně možné použitelné(dosažitelné) otáčky na daném stroji[32].

### 2.7.7 Omezení dané minimálním a maximálním posuvem

S ohledem na to, že posuvy u stroje lze nastavit v určitém rozsahu

$$f \leq f_{\max}$$

$$f \geq f_{\min}$$

Kde:

- $f$ : posuv [mm/min],
- $f_{\min}$ : minimální posuv dosažitelný na stroji [mm/min]
- $f_{\max}$ : maximální posuv dosažitelný na stroji [mm/min].

Pro stroje s posuvy v mm na otáčku:

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} [32]$$

### 2.7.8 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem

Jedná se o nejvýznamnější omezení a je dáno rovnicí jenž je i funkcí trvanlivosti nástroje. Tento fakt ovlivňuje významně matematické řešení úloh ohledně optimalizace řezných podmínek. Obrobitelnost daného materiálu pak lze vyjádřit funkčním vztahem mezi proměnnými řezného procesu. Pro vyjádření obrobitelnosti, řezivosti a řezného prostředí je využíván komplexní Taylorův vztah [32]:

$$v_c = \frac{c_v}{a_p^{x_v} \times f^{y_v} \times T^{\frac{1}{m}}}$$

Kde:

- $c_v, x_v, y_v$ : empirické konstanty,
- $m$ : materiálová konstanta.

Pro frézování je pak dán následující tvar:

$$v_c = \frac{c_v \times D_n^{w_v}}{a_p^{x_v} \times f^{y_v} \times B^{u_v} \times z^{q_v} \times T^{\frac{1}{m}}}$$

Kde:

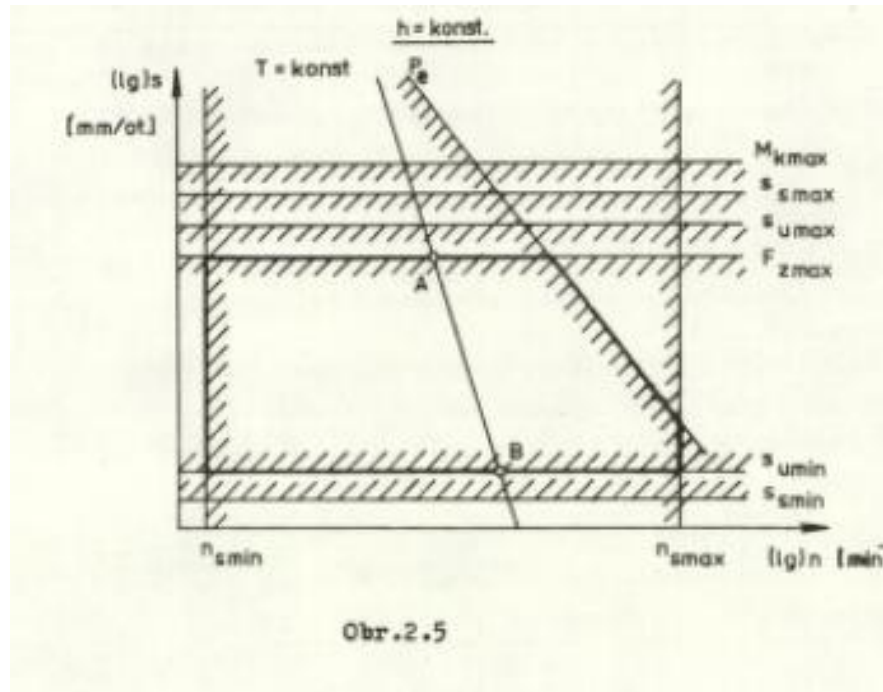
- $u_v, q_v, w_v$ : empirické konstanty,
- $B$ : šířka odřezávaná šířka vrstvy [mm].

*„Omezující podmínku z hlediska komplexního Taylorova vztahu se může uvažovat spolu s ostatními omezujícími podmínkami nebo ji lze začlenit do kritéria optimálnosti, kde dosadíme za  $T$  z komplexního Taylorova vztahu [32].“*

### 2.7.9 Oblast přípustných řešení

Tato oblast popisuje všechny omezující podmínky, jenž se v dané optimalizační úloze vyskytují. Některé z omezujících podmínek jsou mocninového charakteru, lze je tedy linearizovat pomocí logaritmování. Tím pádem je lze zobrazit v logaritmických souřadnicích viz obr.17. Na tomto grafu je vidět oblast přípustných řešení. Ohraničená část diagramu ukazuje kombinaci otáček a posuvů, jenž je možné pro danou optimalizační úlohu využít. Pouze

však za předpokladu, že není uvažováno omezení z hlediska komplexního Taylorova vztahu. Pro vyobrazení komplexního Taylorova vztahu v diagramu je zapotřebí vycházet z konstantní trvanlivosti bříty rezného nástroje. Poté se komplexní Taylorův vztah zobrazí jako přímka. Pro příslušný diagram, jenž lze vidět na obr.17, je oblast přípustných řešení úsečka A-B [32].



Obr. 17: Oblast přípustných řešení [32]

### 3 Návrh typového představitele a aplikace SW optimalizace

Cílem DP je optimalizovat posuvovou rychlost NC programu vytvořeného v systému SolidCAM pomocí Eureka Chronos, a to dle umělé inteligence A.I. a uživatelem zadaných omezení. U optimalizovaných programů budou popsány a porovnány změny, které nastaly oproti původní neoptimalizované verzi. U optimalizace dle uživatelem zadaných omezení budou provedeny kontrolní výpočty, zda souhlasí hodnoty zobrazené v Eureka Chronos s hodnoty vypočtenými pro DP. Pro získání požadovaných výstupů byl zvolen následující algoritmus:

- Tvorba/výběr CAD modelu
- Tvorba NC kódu v CAM systému
- Optimalizace NC kódu
- Výroba vybraných dílů
- Zhodnocení přínosnosti softwarové optimalizace

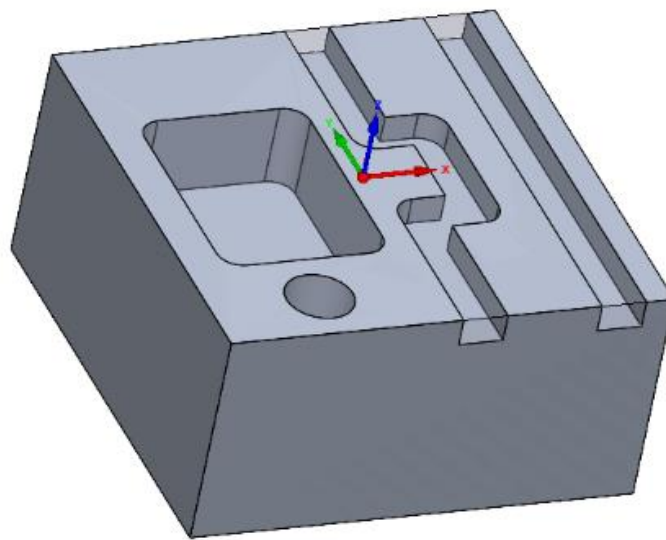
#### 3.1 Tvorba/výběr CAD modelu

Pro tvorbu NC kódu v programu SolidCAM je zapotřebí dodat CAD model, pro který bude daný program vytvořen. První díl byl navrhnout speciálně pro tuto práci v CAD systému SolidWorks a druhý díl byl vybrán a následně stažen z knihovny webových stránek [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com). Pro oba díly byl vybrán stejný materiál, a to slitina hliníku EN AW 5754.



### 3.1.1 Díl 1

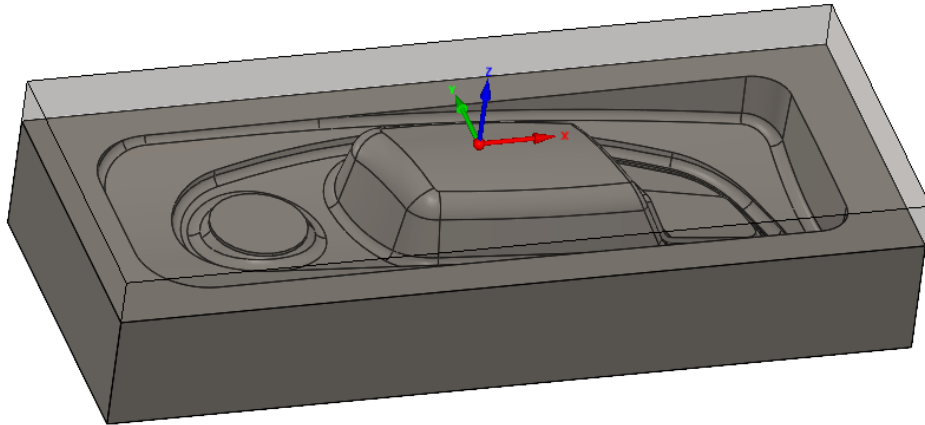
Jak již bylo řečeno, tak pro tvorbu CADF modelu byl vybrán systém SolidWorks, při tvorbě tohoto dílu bylo cílem vytvořit takový model, jenž nebude obsahovat žádné složité tvarové plochy. K tvorbě NC programu by pak byly potřeba pouze jednoduché 2.5D operace typu kontura, drážka či kapsa. Tím by bylo možné pomocí optimalizace dosáhnout validních výsledků, jenž by se daly i snadněji popsat, a to zejména v kritických oblastech obrábění. Jedná se například o oblasti se skokovým nárůstem opásání či nájezdů a výjezdů rezného nástroje z materiálu. Co se týče rádií u jednotlivých vybrání, tak ty byly nastaveny na  $r=4$  mm. Pro obrábění tohoto dílu bude využita fréza o průměru 8 mm a to proto, aby bylo v těchto místech dosaženo nepříznivých podmínek pro obrábění. Oblasti rádií pak budou sledována v Eureka Chronos. Optimalizace NC kódu pro tento díl proběhne jak pomocí AI, tak pomocí uživatelem daných hodnot. Model, který byl vytvořen z výše zmíněných požadavků je zobrazen na obr.18. Výkres k dílu viz. příloha č.1.



Obr. 18: Díl 1. Foto autor.

### 3.1.2 Díl 2 - Forma

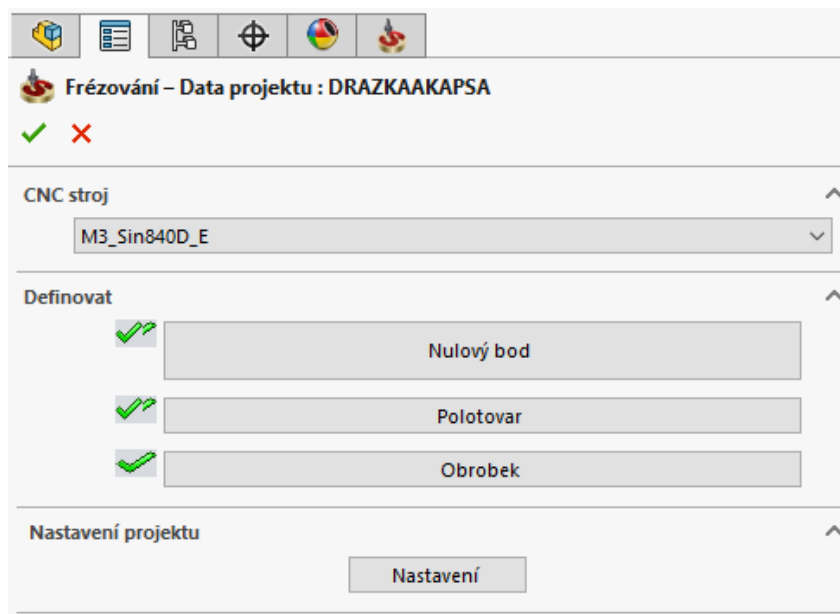
Hlavními kritérii pro výběr druhého dílu byla na rozdíl od prvního dílu tvarová složitost. Cílem bylo tedy vybrat díl, jenž bude obsahovat velké množství tvarových ploch, které zajistí velký počet přejezdů, nájezdů a výjezdů z materiálu a tím i značný prostor pro optimalizaci posuvové rychlosti. Typem takového dílu jsou například modely forem. Oproti prvnímu dílu bylo rozhodnuto, že tento díl nebude speciálně vymodelován pro DP, ale že bude vybrán z již existujících modelů. Nalezen byl z řad již zmíněných forem, a to z webové knihovny CAD modelů [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com). Z obr. 19 je zřejmé, že výběrem tohoto dílu byly splněny výše zmíněné požadavky. Výkres k dílu viz. příloha č.1.



Obr. 19: Díl 2 – Forma. Foto autor.

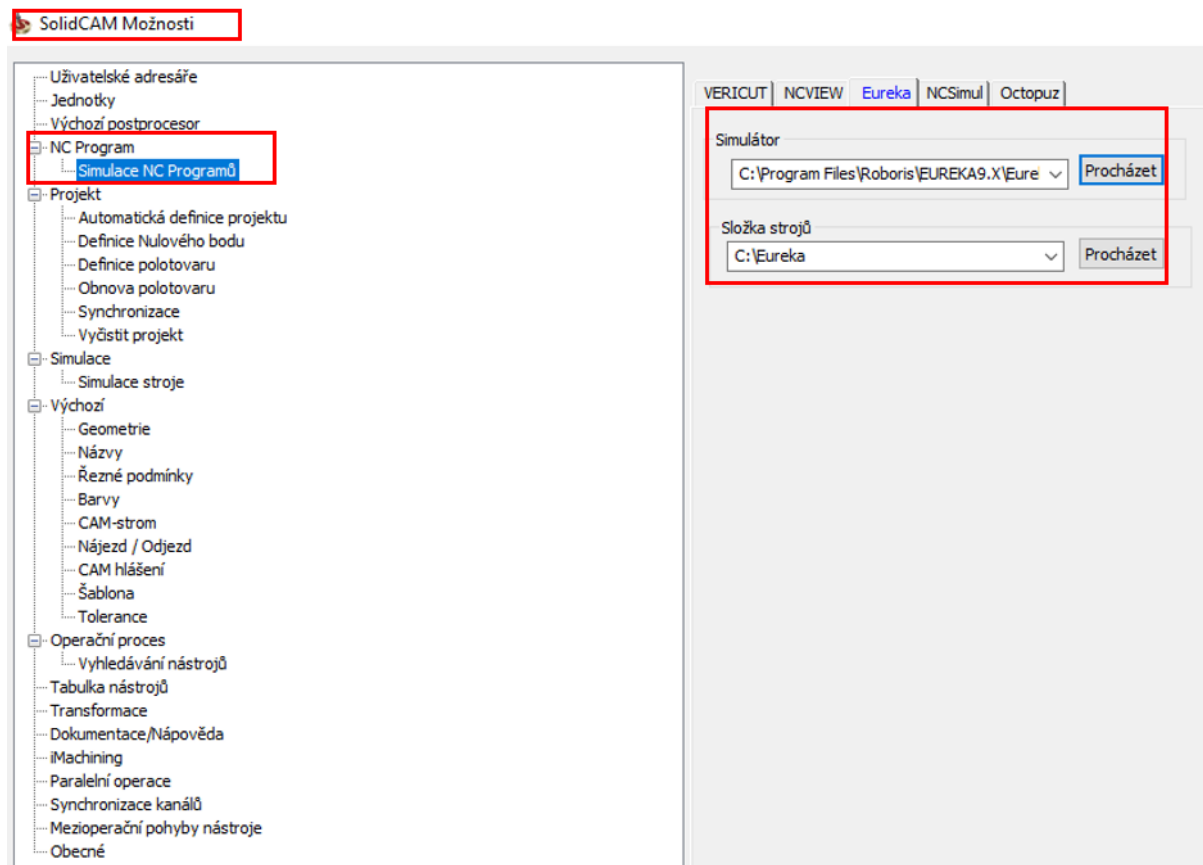
### 3.2 Tvorba NC kódu pro vybrané díly

Tvorba NC kódu bude probíhat pomocí CAM systému, jenž již byl popsán v kapitole 2.1. Řezné podmínky budou nastaveny dle doporučených hodnot pro obrábění hliníkových slitin. Jak již bylo zmíněno v kapitole... je potřeba navolit následující informace ke CAM projektu jako jsou použitý stroj, nulový bod, polotovar a obrobek (CAD model). Dále je pak třeba v Nastavení projektu v záložce Simulace NC programu zvolit správný stroj. Výroba daných dílů proběhla na stroji MCU 450 V[T]-5X Kovosvit Mas v prostorách KTO na ZČU. Postprocessor byl zvolen z interní knihovny postprocesorů SolidCAM.



Obr. 20: Nastavení projektu. Foto autor.

V případě že je počítáno s tím, že vytvořený NC kód bude ještě optimalizován pomocí vybraného softwaru, musí být v záložce SolidCAM-Možnosti navoleny k NC programu určené složky k strojům a k simulátoru. Na obr.21 jsou výše zmíněné požadavky ohraničeny červeným obrysem.



Obr. 21: SolidCAM možnosti. Foto autor.

### 3.2.1 Díl 1

Pro tvorbu tohoto programu byly v CAM využity 2,5D operace typu kontura a kapsa. Tyto operace jsou ideální pro obrábění kapes, drážek či děr, které obsahuje Díl 1. U těchto operací musí uživatel nastavit geometrii, jenž může být definována jako hrana modelu, entity výkresu nebo skica. Dle definované geometrie pak CAM vygeneruje řezné dráhy. Tudiž pokud uživatel označí například nějaký profil, jenž je již z části obroben, může u dané operace nástroj jezdit na prázdno. Z tohoto pohledu lze tedy také vidět určitý prostor pro optimalizaci pomocí Eureka Chronos, nutno však podotknout, že programátor by se neměl dopustit takové „chyby“ jako je obrábění mimo materiál, které ve finále může stát firmu mnoho cenného času. Pro všechny operace byl zvolen následující nástroj:

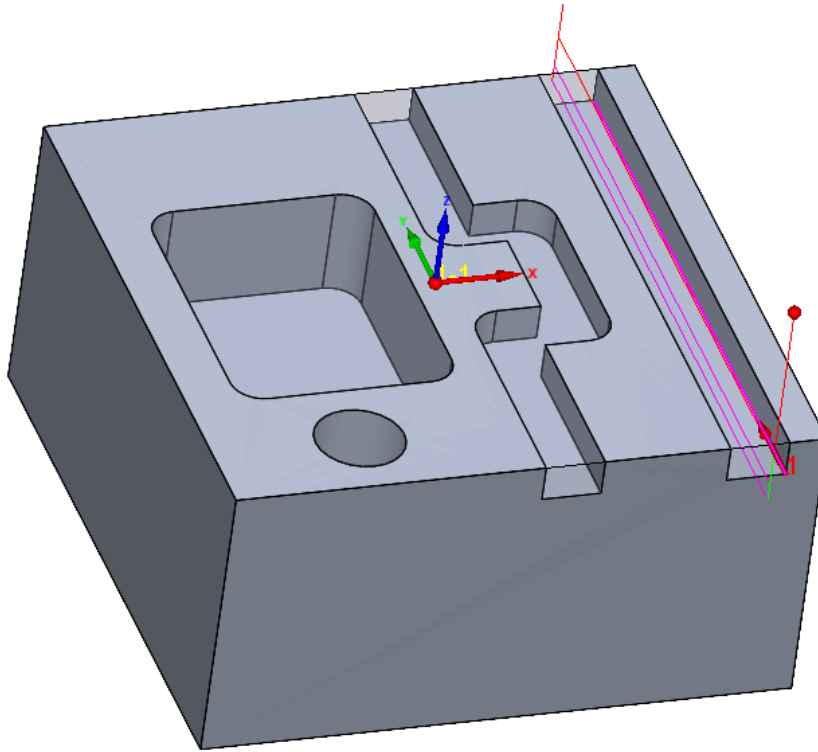
Tab. 1: Použitý nástroj

Použité nástroje	Průměr nástroje [mm]	Délka nástroje [mm]	Vyložení nástroje [mm]	Řezná část [mm]	Počet zubů	R [mm]	Typ frézy	Materiál
FR-D8 Z4	8	60	30	19	4	0	monolitní	SK

Tento nástroj byl v tabulce nástrojů nakopírován pro každou operaci zvlášť. To z toho důvodu, že optimalizace pomocí Eureka Chronos není prováděna pro jednotlivé operace jednotlivě, ale pouze pro jednotlivé nástroje.

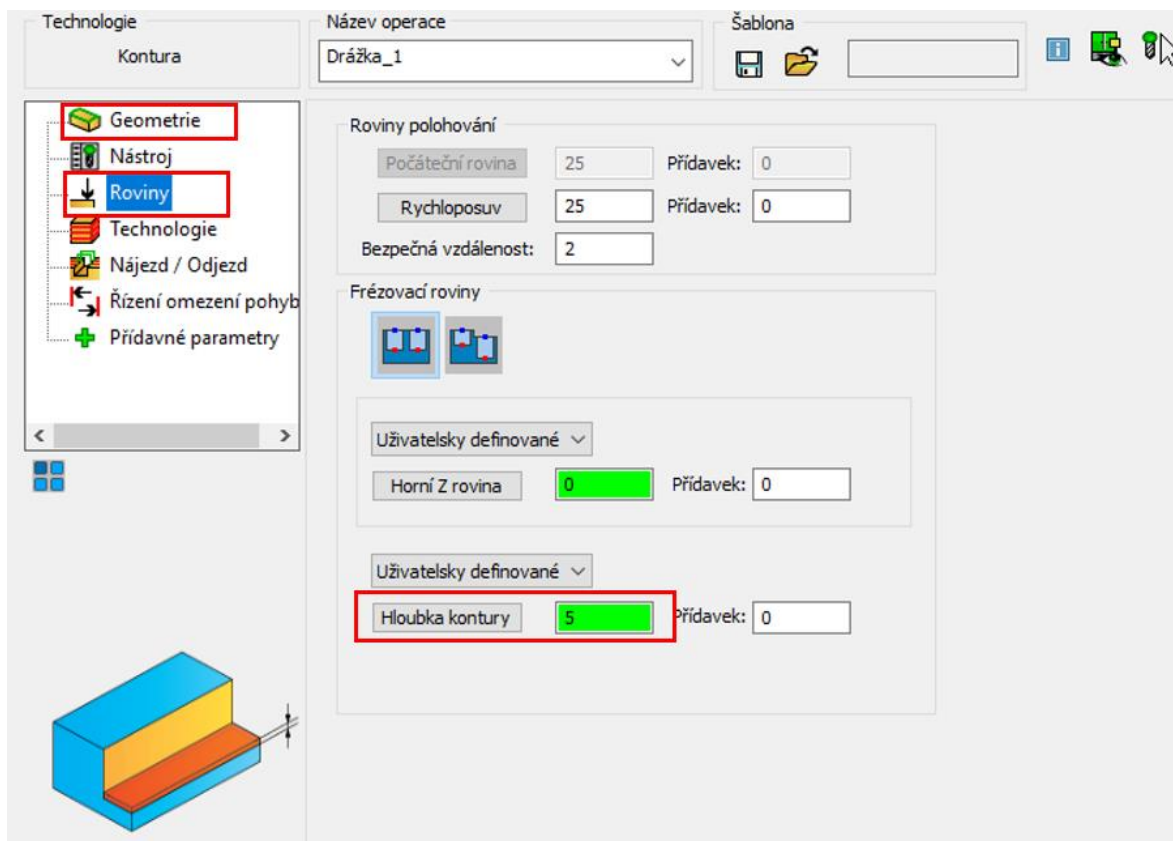
### 3.2.1.1 Strategie-Drážka 1

Pro obrobení Drážky 1 byla zvolena operace kontura. Nejprve byla vybrána geometrie, dle které byly vygenerovány řezné dráhy. V tomto případě byla vybrána vnitřní hrana drážky, jež je zobrazena na obr. 22 jako šipka.

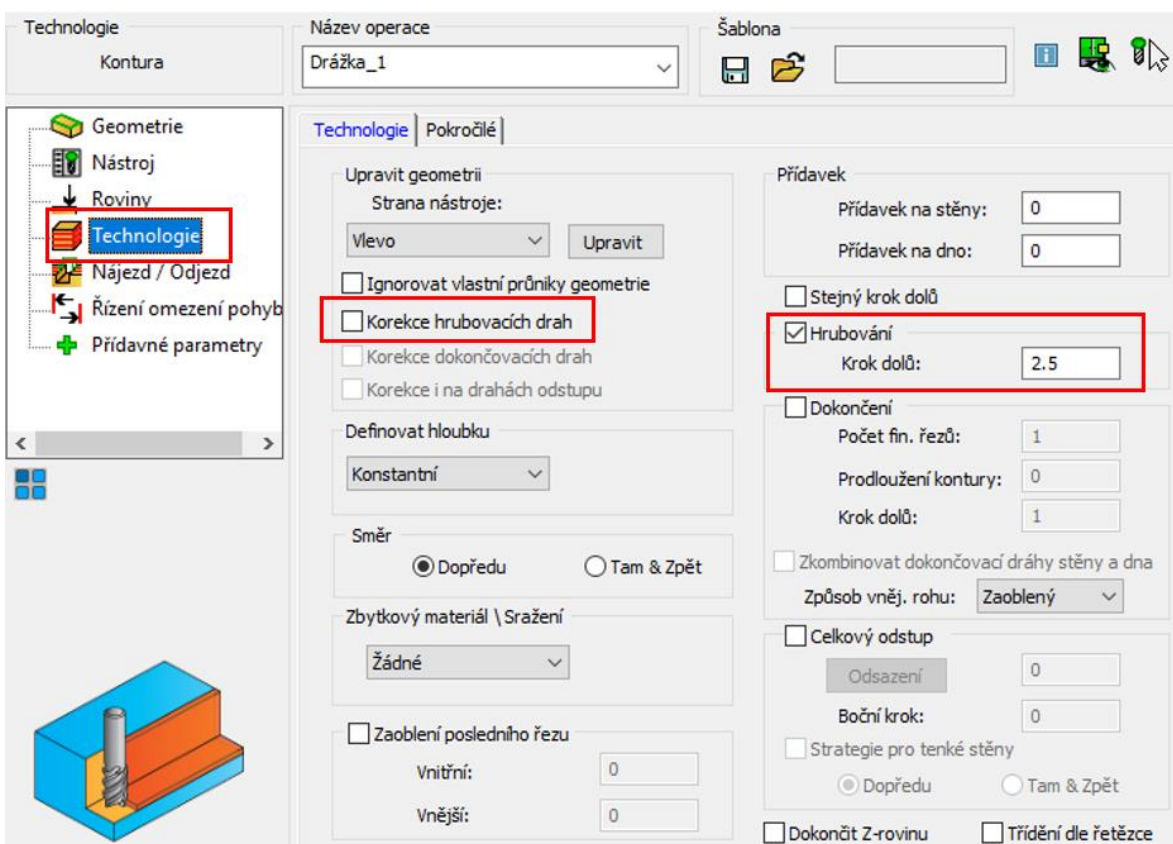


Obr. 22: Drážka 1. Foto autor.

Dále bylo zvoleno, že obrábění proběhne bez přídavek a hodnota hloubky řezu byla zvolena  $a_p=2,5$  mm. Tato hodnota byla nastavena tak, aby bylo dosaženo většího úběru materiálu s ohledem na možnosti nástroje. Výsledkem je pak lineární pohyb nástroj v celé délce řezu. Výše nastavené parametry jsou zobrazeny na obr. níže.

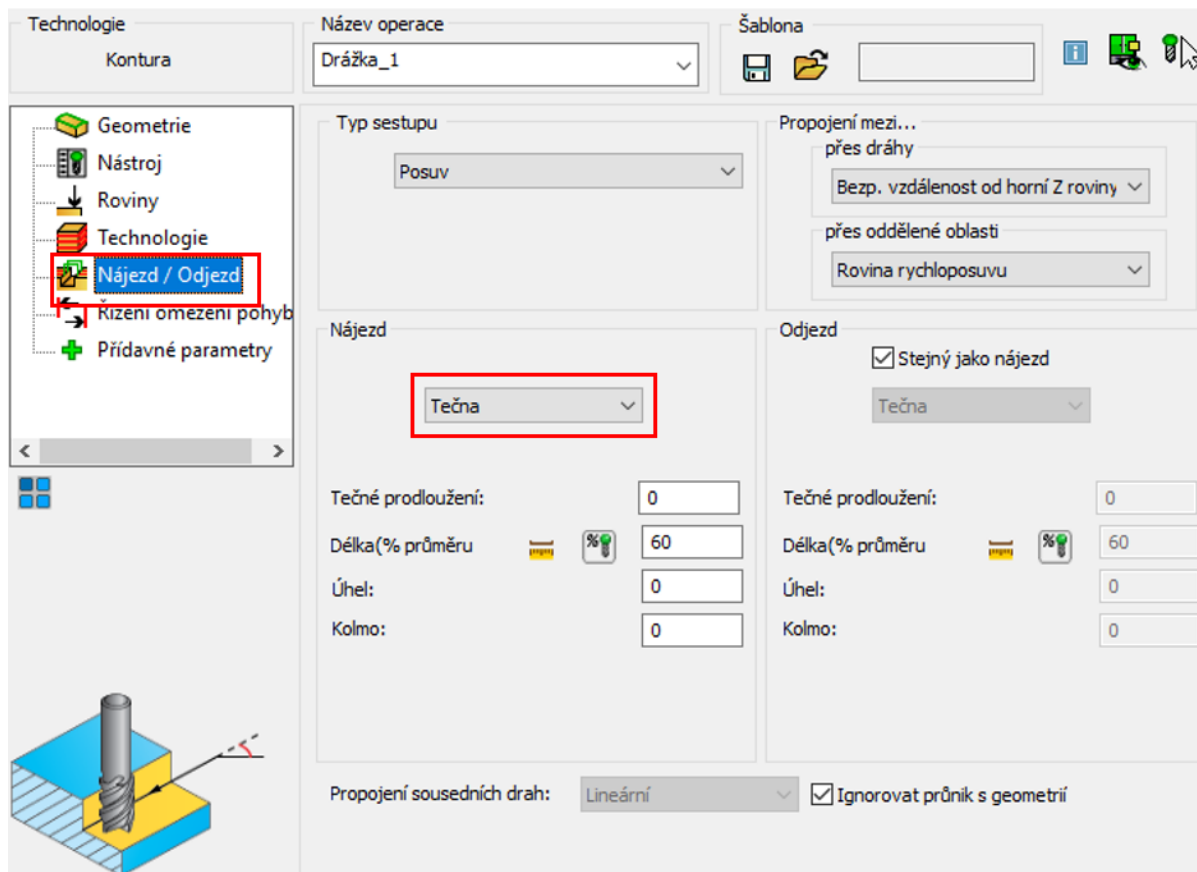


Obr. 23: CAM-roviny. Foto autor.



Obr. 24: CAM-technologie. Foto autor.

Pro zachování lineární trajektorie řezné dráhy byl zvolen tečný nájezd.



Obr. 25: CAM-nájezd/odjezd. Foto autor.

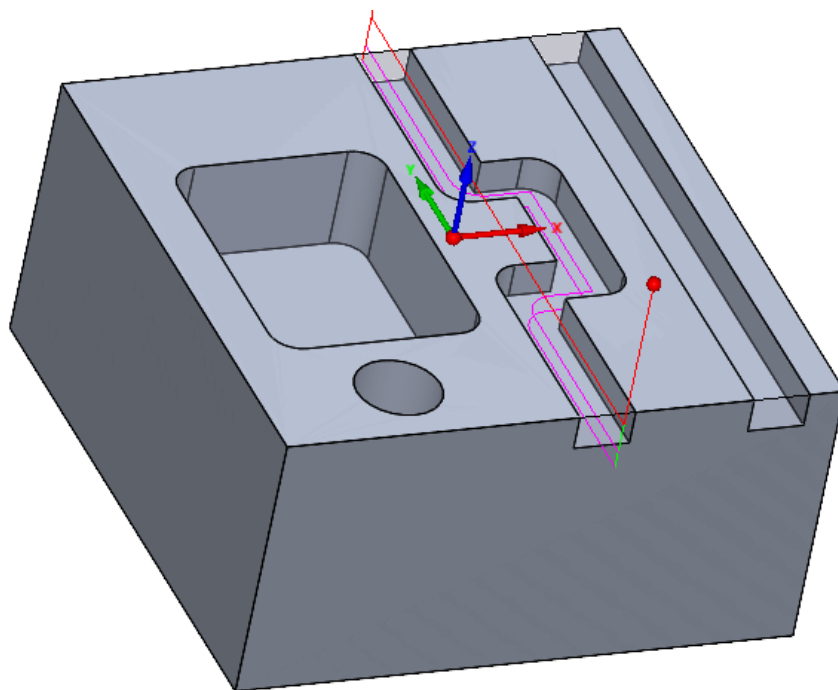
Nakonec byly zvoleny vhodné řezné podmínky viz. tabulka 2 níže.

Tab. 2 Souhrn pro Drážka 1

<b>nástroj</b>	FR-D8 Z4
<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	400
<b><math>f_z</math> [mm/z]</b>	0,03
<b><math>a_p</math> [mm]</b>	2,5
<b>hloubka obrábění [mm]</b>	5
<b>nájezd</b>	tečný

### 3.2.1.2 Strategie - Drážka 2

U Drážky 2 byly podmínky pro tvorbu operace nastaveny obdobně jako u předešlé operace. Rozdílný byl pouze výběr geometrie. Výsledné řezné dráhy jsou zobrazeny na obr. 26 níže.



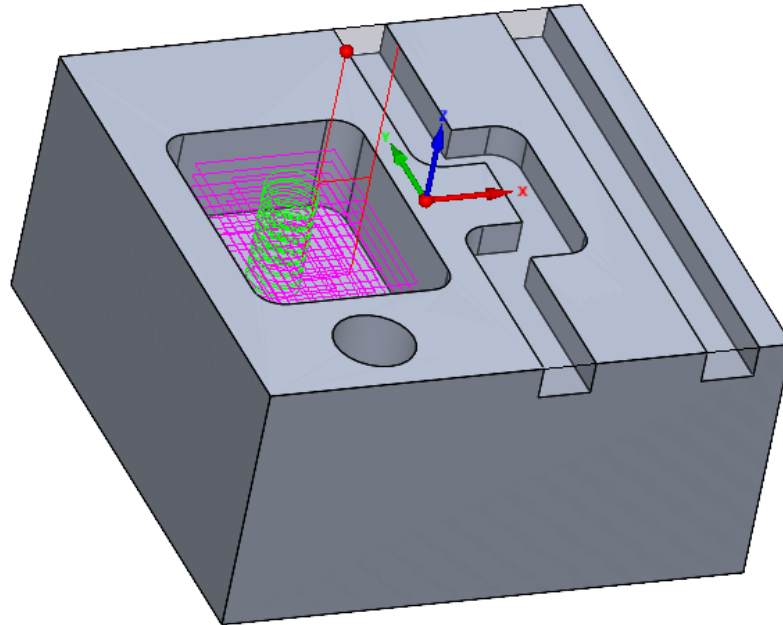
Obr. 26: Drážka 2. Foto autor.

Tab. 3 Souhrn pro Drážka 2

<b>nástroj</b>	FR-D8 Z4
<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	400
<b><math>f_z</math> [mm/z]</b>	0,03
<b><math>a_p</math> [mm]</b>	2,5
<b>hloubka obrábění [mm]</b>	5
<b>nájezd</b>	tečný

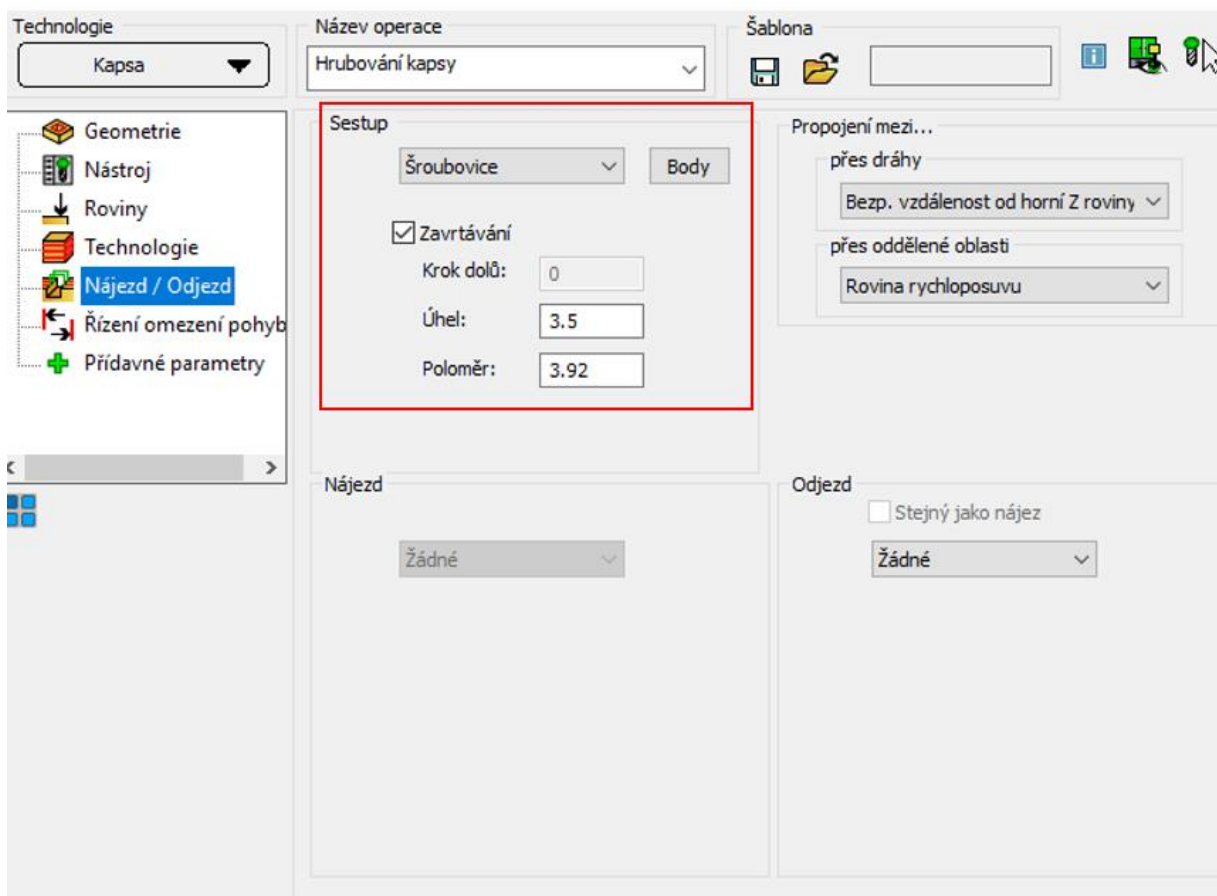
### 3.2.1.3 Strategie-Kapsa-hrubování

Pro obrábění daného vybrání s rádií R 4 mm byla použita operace kapsa, na rozdíl od předešlých operací, pro které byla použita kontura. Dalším rozdílem u této operace je to, že nájezd nástroje do materiálu byl zvolen pomocí šroubovice, a ne tečně z vnějšku. Na obr. 27 jsou pak vidět vygenerované řezné dráhy a též zeleně vyznačené dráhy šroubovice po které je uskutečněn sestup frézy do materiálu.



Obr. 27 Kapsa-hrubování. Foto autor

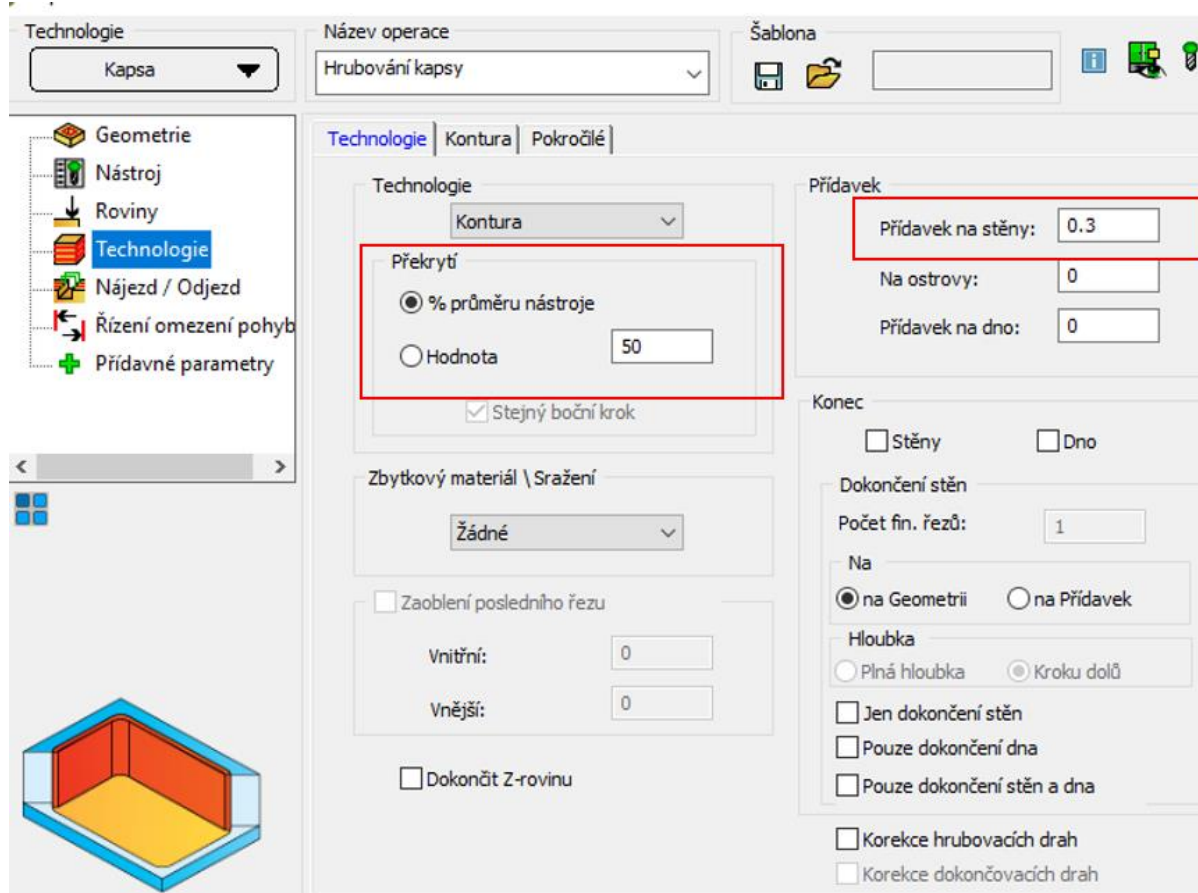
Sestup do materiálu byl zvolen jako šroubovice. Pro tento typ sestupu je nutné navolit správné hodnoty. Jmenovitě úhel a poloměr šroubovice, tyto hodnoty byly nastaveny tak, aby nedošlo k podříznutí obrobku, nebo aby nezbyl uprostřed šroubovice ostrůvek neobrobeného materiálu.



Obr. 28:CAM-nájezd/odjezd. Foto autor.



U operace Kapsa byl nastaven přídavek 0,3 mm na následnou dokončovací operaci, která obrobí boční stěny na čisto. K hrubování byla nastavena strategie kontura a hodnota  $a_e$  byla nastavena na 50 % průměru frézy.



Obr. 29: CAM-hodnota překrytí a přídávky. Foto autor.

V CAMu je možné nastavit rádius pro řezné dráhy a to proto, aby nástroj nenajížděl do ostrých rohů, kde nastává skokový nárůst opásání. V tomto případě však žádný rádius nastaven nebyl, a to z toho důvodu, aby bylo ověřeno, jak se umí Eureka Chronos vyrovnat se skokovým nárůstem opásání frézy.

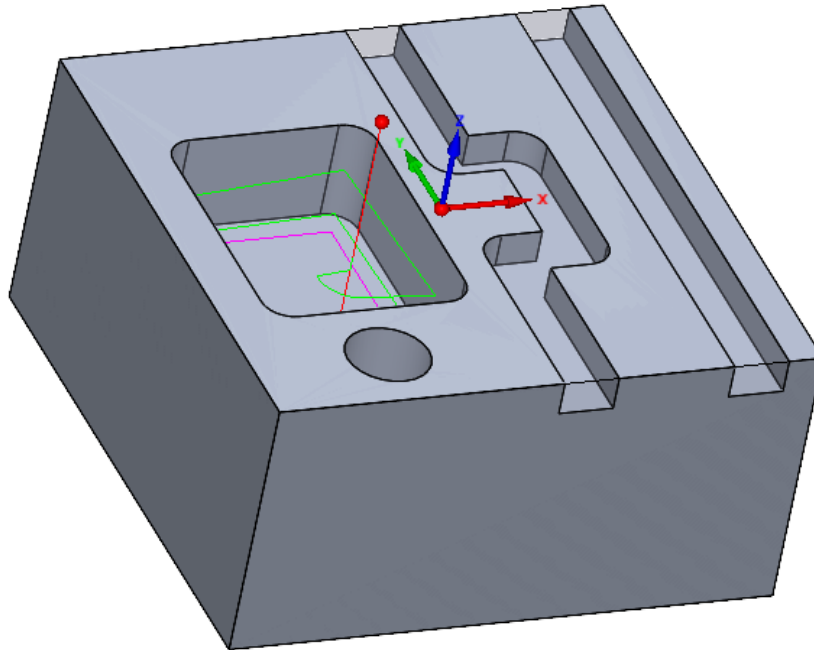
Tab. 4 Souhrn pro Kapsa-hrubování

<b>nástroj</b>	FR-D8 Z4
<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	400
<b><math>f_z</math> [mm/z]</b>	0,03
<b><math>a_p</math> [mm]</b>	10
<b>hloubka obrábění [mm]</b>	15
<b>nájezd</b>	šroubovice

### 3.2.1.4 Strategie-Kapsa na čisto

V této dokončovací operaci bude využita operace kontura. Obráběn bude přídavek 0,3 mm, jenž byl navolen v předešlé operaci. K obrobení stěn kapsy na čisto byl nastaven sestup pomocí

šroubovice. To má za následek to, že je řezný nástroj neustále v záběru. Z obr. 30 je viditelné, že řezná dráha nástroje nemá konstantní hodnotu Z-ové souřadnice.



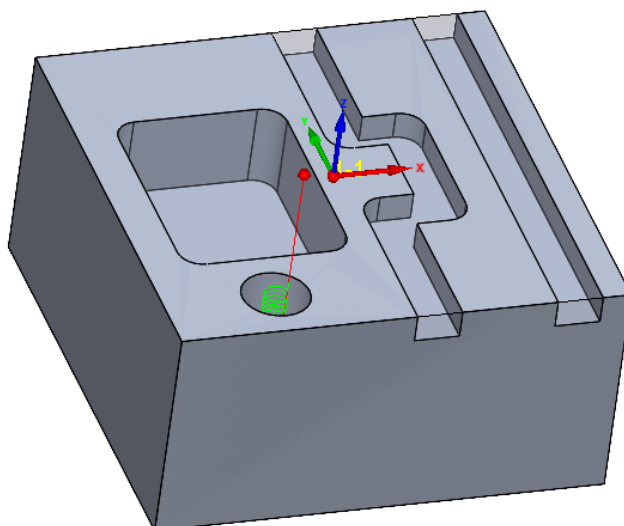
Obr. 30: CAM-kapsa na čisto. Foto autor.

Tab. 5 Souhrn pro Kapsa na čisto

<b>nástroj</b>	FR-D8 Z4
<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	400
<b><math>f_z</math> [mm/z]</b>	0,03
<b><math>a_p</math> [mm]</b>	10
<b>hloubka obrábění [mm]</b>	15
<b>nájezd</b>	oblouk
<b>sestup</b>	šroubovice

### 3.2.1.5 Strategie - Díra $\varnothing 12$ mm

Pro díru  $\varnothing 12$  mm byla použita operace kontura. Sestup frézy do materiálu byl nastaven pomocí šroubovice. Začátek sestupu byl nastaven o 0,5 mm výše a to proto, aby nástroj nenajel rychloposuvem do obrobku, v případě že by nebyla horní hladina plochy Z přesně obrobena.



Obr. 31 Díra  $\varnothing 12$  mm. Foto autor.

Tab. 6 Souhrn pro finiš kapsy

nástroj	FR-D8 Z4
vc [m/min]	400
$f_z$ [mm/z]	0,03
ap [mm]	1
hloubka obrábění [mm]	10
nájezd	žádný
sestup	Šroubovice

### 3.2.2 Díl 2 - Forma

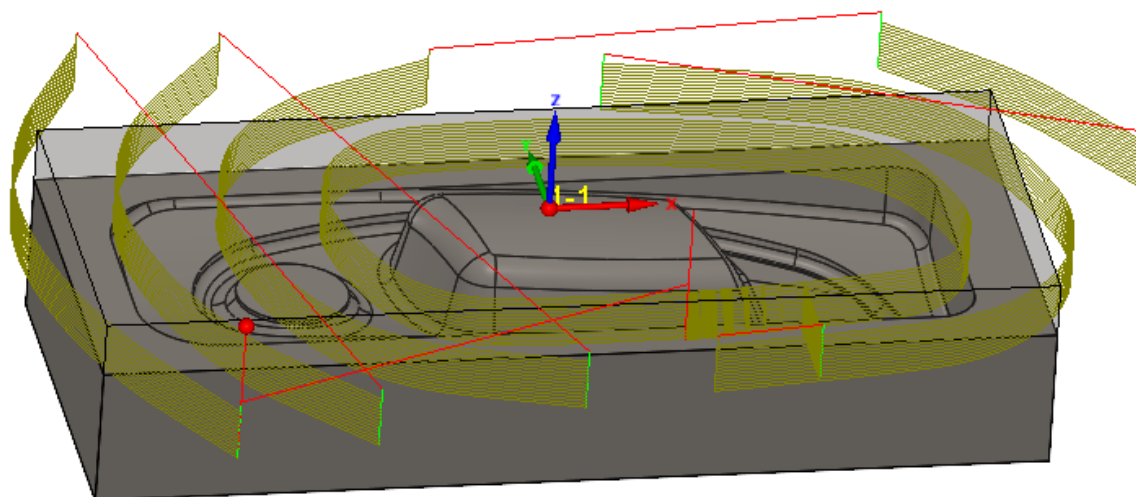
U tvorby programu pro Díl 2 již byly využity 3D operace z nabídky SolidCAM, a to jmenovitě operace HSR (vysokorychlostní hrubování). Na rozdíl od operací, které byly využity u předešlého dílu tak u HSR lze nastavit, že operace bude pracovat s aktualizovaným zbytkovým materiálem. Řezné dráhy tedy budou vygenerovány pouze v oblastech, kde zůstává materiál k obrobení. „HSR/HSM nabízí jedinečné strategie obrábění a propojení. Pro zachování plynulého pohybu nástroje vyhlazuje všude kde je to možné, jak dráhy obrábění, tak dráhy přejezdů. Což je základním požadavek pro udržení vysokých posuvů a eliminaci prodlev.“ [13] K tvorbě programu pro Díl 2 byly vybrány následující nástroje.

Tab. 7 Použité nástroje

Použité nástroje	Průměr nástroje [mm]	Délka nástroje [mm]	Vyložení nástroje [mm]	Řezná část [mm]	Počet zubů	R [mm]	Typ frézy	Materiál
Fr D32 r2 L9 z5 (Safety)	31,84	128	80	9	5	2	VBD	SK
FR-D16 Z4	16	92	50	38	4	0,1	Monolitní	SK
FR-D10 Z4	10	72	33	22	4	0,4	Monolitní	SK

### 3.2.2.1 Strategie-Frézování rovinné plochy

Pro obrobení rovinné plochy byla použita operace kapsa. Jako u jediné operace ze všech byl zde zvolen nástroj s VBD, a to pětizubá fréza průměru 32 mm. Postup tvorby programu je zde obdobný jako v kapitole 3.2.1.3. Rozdílem je pouze to, že nástroj najíždí do materiálu tečně zvenku.



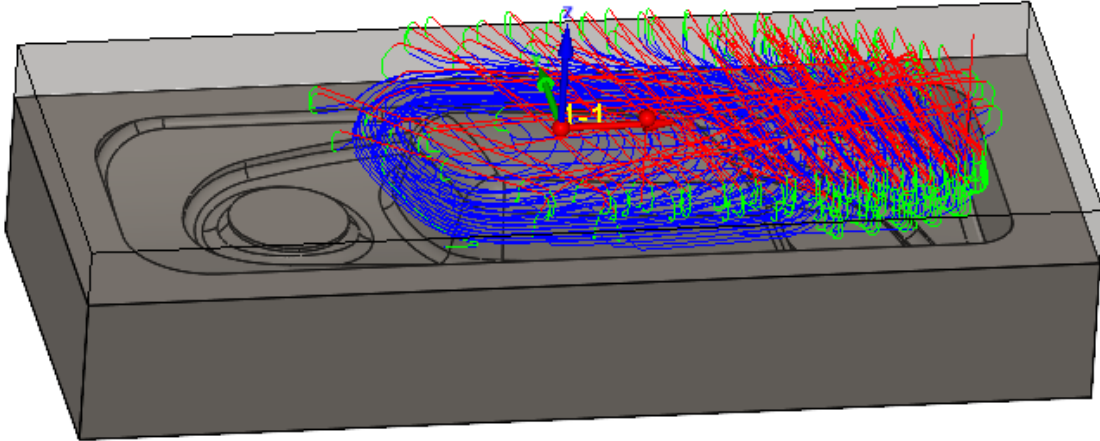
Obr. 32: Frézování rovinné plochy. Foto autor

Tab. 8 Souhrn pro operaci rovinná plocha

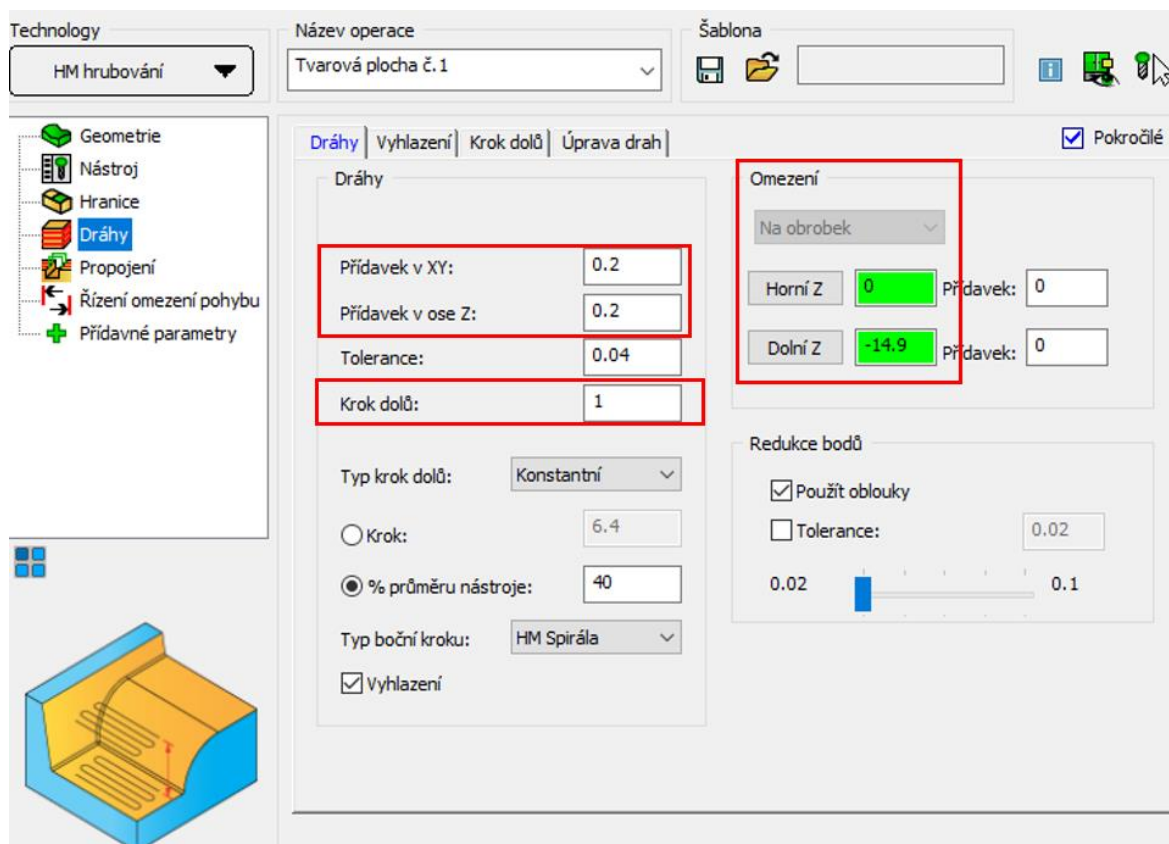
<b>nástroj</b>	Fr D32 r2 L9 z5 (Safety)
<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	600
<b><math>f_z</math> [mm/z]</b>	0,15
<b><math>a_p</math> [mm]</b>	1
<b><math>a_e</math> [%]</b>	75
<b>hloubka obrábění [mm]</b>	14.9
<b>přídavek [mm]</b>	0
<b>nájezd</b>	tečna

### 3.2.2.2 Strategie - Hrubování tvarových ploch č.1

Pro hrubování vnější části tvarové plochy byla zvolena toroidní fréza o průměru 16 mm. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2.2, tak operace HSR pracuje s aktualizovaným zbytkovým materiálem. Řezné dráhy jsou tedy vygenerovány pouze v místech, kde zbývá materiál k obrobení. Pro obráběné plochy byl nastaven přídavek 0,2 mm. Omezení z hlediska horní a dolní roviny Z bylo zvoleno tak, aby byly tvarové plochy obrobena pouze k rovinné ploše, která byla obrobena v předešlé operaci. Hodnota  $a_e$  byla nastavena na 40 % průměru frézy a hodnota hloubky řezu na  $a_p=1$  mm. Tyto podmínky byly zvoleny s ohledem na vybraný nástroj.



Obr. 33: Hrubování tvarových ploch č.1. Foto autor



Obr. 34: CAM-dráhy. Foto autor.

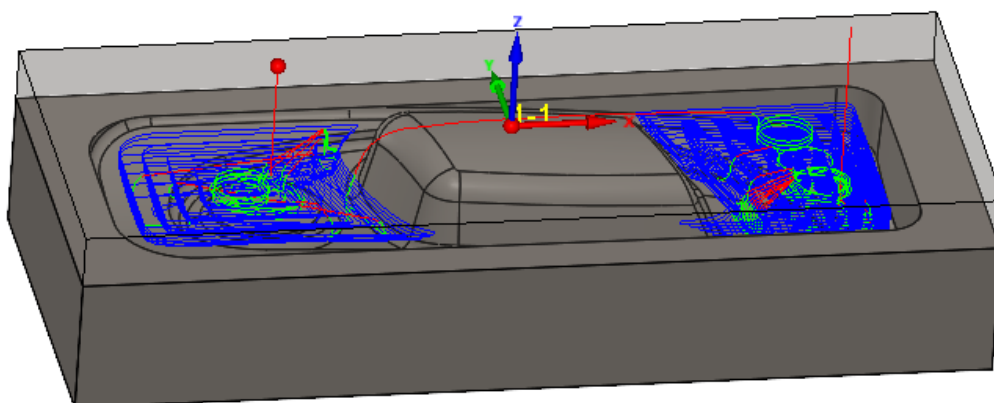
Dále je třeba nastavit přejezdy (rychloposuv), nájezdy a odjezdy tak, aby řezný nástroj nebyl zbytečně dlouho mimo záběr, čímž bude dosaženo snížení obráběcích časů.

Tab. 9 Souhrn pro operaci tvarové plochy č.1

<b>nástroj</b>	FR-D16 Z4
<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	400
<b><math>f_z</math> [mm/z]</b>	0,075
<b><math>a_p</math> [mm]</b>	1
<b><math>a_e</math> [%]</b>	40
<b>hloubka obrábění [mm]</b>	14.9
<b>přídavek [mm]</b>	0,2
<b>sestup</b>	po šroubovici

### 3.2.2.3 Strategie - Hrubování tvarových ploch č.2

U této operace je obrábění prováděno pod hladinou rovinné plochy. Řezné podmínky této operace jsou téměř totožné jako u předešlé. Rozdíl je pouze v nastavení horní a dolní roviny Z. Postup tvorby programu je tedy obdobný jako v předešlé kapitole.



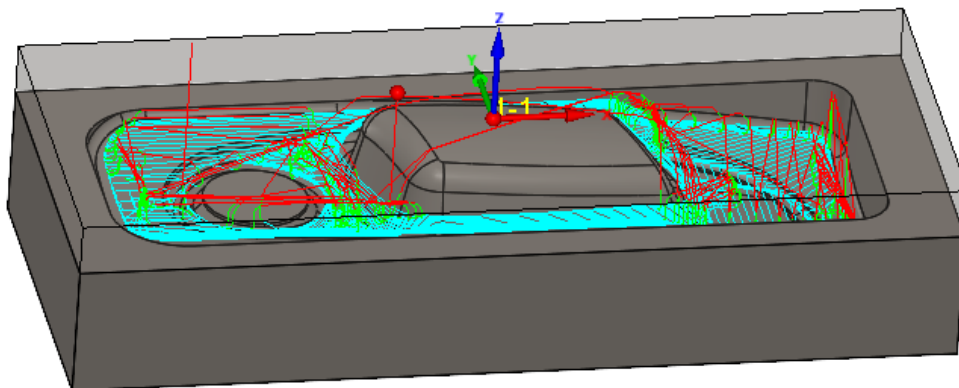
Obr. 35: CAM- Hrubování tvarových ploch č.2. Foto autor

Tab. 10 Souhrn pro operaci tvarové plochy č.2

<b>Nástroj</b>	FR-D16 Z4
<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	400
<b><math>f</math> [mm/z]</b>	0,075
<b><math>a_p</math> [mm]</b>	1
<b><math>a_e</math> [%]</b>	45
<b>hloubka obrábění [mm]</b>	24
<b>přídavek [mm]</b>	0,2
<b>sestup</b>	po šroubovici

### 3.2.2.4 Strategie - Hrubování tvarových ploch č.3

Pro tuto operaci byl použit nástroj o menším průměru než u předešlých dvou operací, a to fréza o průměru 10 mm. Přičemž hloubka obrábění zůstala stejná. V této operaci tedy bude hrubován zbytkový materiál.



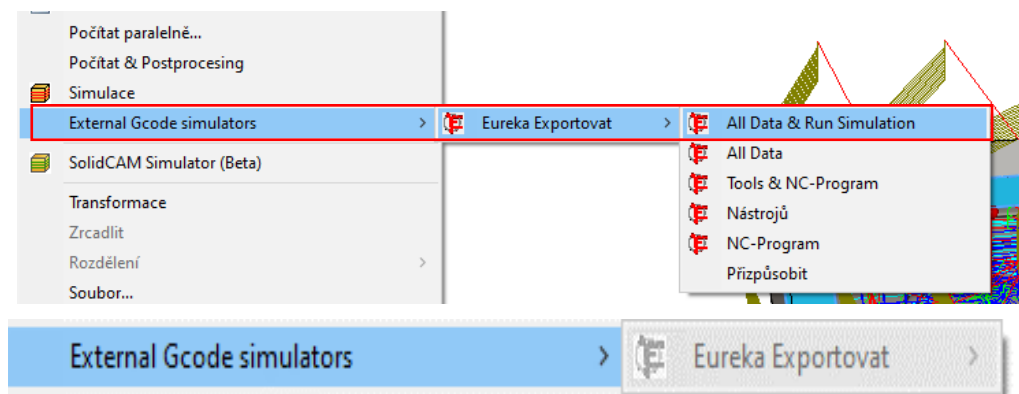
Obr. 36: CAM- Hrubování tvarových ploch č.3. Foto autor.

Tab. 13 Souhrn pro operaci tvarové plochy č.3

<b>nástroj</b>	FR-D10 Z4
<b>v<sub>c</sub> [m/min]</b>	400
<b>f [mm/z]</b>	0,04
<b>a<sub>p</sub> [mm]</b>	0.5
<b>a<sub>e</sub> min[%]</b>	45
<b>hloubka obrábění [mm]</b>	24
<b>přídavek [mm]</b>	0,2
<b>sestup</b>	po šroubovici

## 3.3 Optimalizace NC kódu

Po tvorbě NC programu v SolidCAM je zapotřebí převést data do optimalizačního softwaru Eureka Chronos. Toho lze jednoduše docílit několika kliky myši viz obr. 37. V případě potřeby lze však tyto informace/data v Eureka Chronos změnit či dodat.



Obr. 37: Převod dat do Eureka. Foto autor.

Nyní budou upravovány podmínky pro optimalizaci posuvu přímo v Eureka Chronos. Nejprve bude potřeba navolit tepelné a mechanické vlastnosti obráběného materiálu viz obr.38, neboť do Eureka Chronos nebyly přeneseny žádné informace o tepelných a mechanických vlastnostech, ačkoliv byl materiál nastaven jak v samotném CAD modelu, tak i v CAM projektu. Hodnoty jsou do kolonek doplněny dle použitého materiálu EN AW 5754 [34].

Vlastnosti tvaru: design ×

Tvar ze souboru   Poloha   Appearance   **Materiál**   Coordinate systems

Mechanical properties

Řezná síla (Kc1)	<input type="text" value="600"/>
Hodnota nárůstu (mc)	<input type="text" value="0.25"/>

Thermal properties

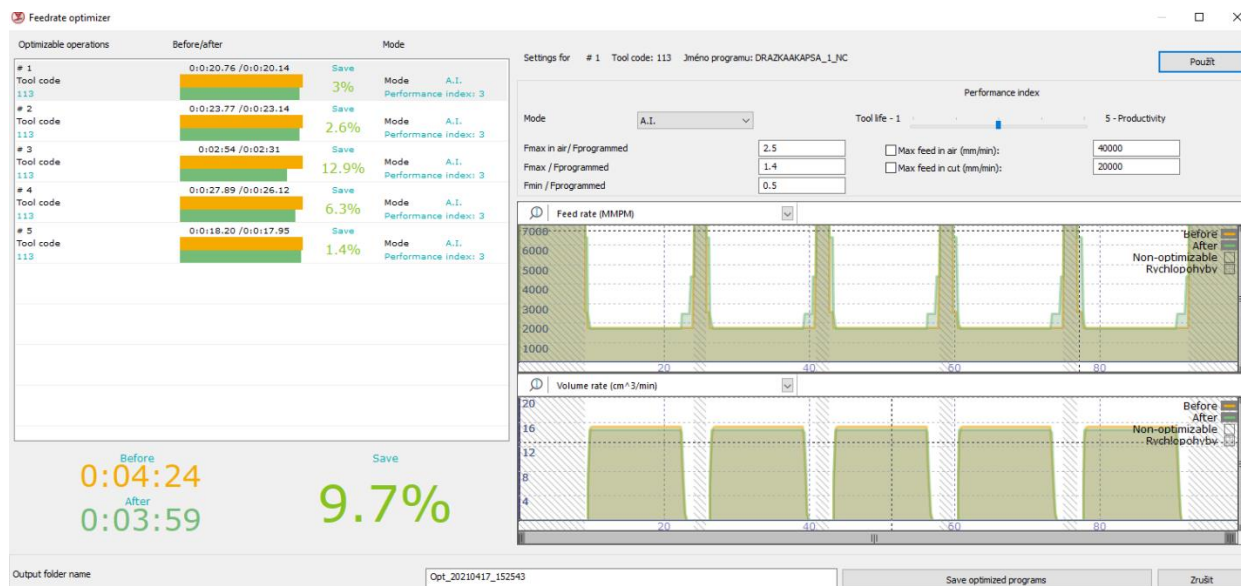
Melting temperature (°K)	<input type="text" value="600"/>
Thermal conductivity (W/(m°K))	<input type="text" value="160"/>
Specific heat capacity (J/(kg°K))	<input type="text" value="860"/>
Density (g/cc)	<input type="text" value="2.8"/>

Obr. 38 Vlastnosti polotovaru. Foto autor.

Poté co se doplní potřebné údaje se optimalizace a s ní potřebné výpočty spustí pomocí tlačítka start. Následně vyskočí okno s optimalizačními metodami, omezeními a celkovými výsledky, které jsou zobrazeny na obr. níže.



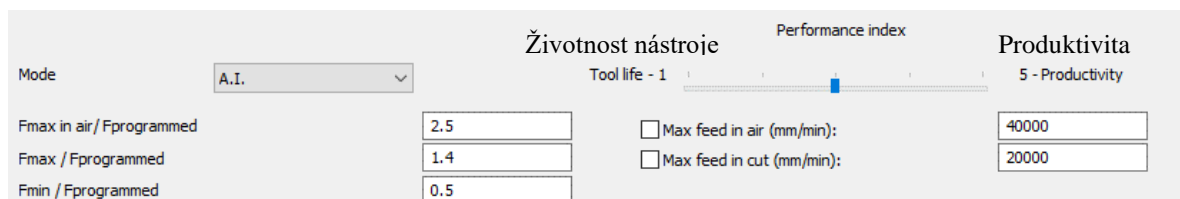


Obr. 39: Prostředí Eureka Chronos. Foto autor.

Zde se navolí a vyberou možnosti optimalizace, jež byly popsány v kapitole 2.3.2 Princip fungování. Je nutné brát v potaz, že Eureka Chronos neoptimalizuje jednotlivé programy, ale nástroje. Pokud je použit stejný nástroj pro více operací, je možné v CAMu každé operaci přiřadit stejný duplicitní nástroj. Tím mohou být všechny operace optimalizovány zvlášť. Nyní DP přejde k popisu tvorby optimalizovaných programů na vybraných dílech. Přičemž pro každý díl budou vytvořeny dva optimalizované NC kódy, a to dle A.I. a uživatelem zadaných omezení.

### 3.3.1 Optimalizace NC kódu dílu 1 dle A.I.

Po postupu, jenž byl uveden v předešlé kapitole 3.3 Optimalizace NC kódu, byl v prostředí Eureka Chronos po volbě optimalizace a zadání omezujících podmínek vygenerován optimalizovaný NC kód s informacemi o úspoře času. Pro všechny operace/nástroje u Dílu 1 byly nastaveny stejné podmínky pro optimalizaci viz obr. 40. Výjimka pak nastala pouze u dokončovací operace č.4, kde byla nastavena hodnota  $F_{min}/F_{programmed} = 0,1$ .

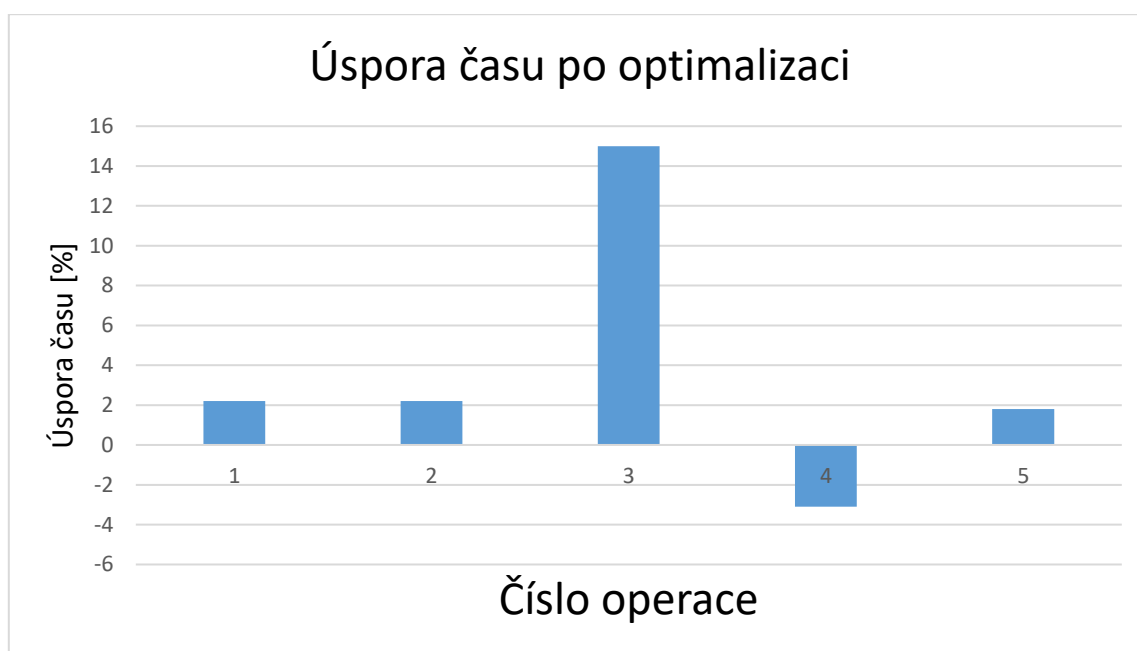


Obr. 40: Podmínky pro optimalizaci NC kódu. Foto autor.

Omezením  $F_{max}$  a  $F_{min}$  je udáno, o kolik může být zvýšena či snížena posuvová rychlost, výše zmíněné hodnoty z obr. 40 byly zvoleny na základě doporučených hodnot posuvové rychlosti pro použitý nástroj a to tak, aby při maximálně možném zvýšení posuvové rychlosti při záběru frézy nebyl výrazně překročen rozsah doporučené posuvové rychlosti. Stejně je tomu pak i v případě snížení posuvu. Co se týče 2,5 násobku posuvové rychlosti pro přejezdy mimo materiál, tak tato hodnota omezení byla vybrána na základě toho, aby měla obsluha v případě kolize čas zasáhnout. Performance index byl pak nastaven na střední hodnotu 3, jenž je jistým kompromisem mezi maximálně možnou produktivitou a životností řezného nástroje jenž udává Eureka Chronos.

Tab. 14 Optimalizace Dílu 1 dle A.I.

Operace	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]
1. Drážka 1	0:0:09.92	0:0:09.71	0:0:0.21	2,2
2. Drážka s rádiy	0:0:11.29	0:0:11.04	0:0:0.25	2,2
3. Kapsa	0:1:26.00	0:1:13.00	0:0:13.0	15,1
4. Finiš kapsy	0:0:14.63	0:0:15.09	-0:0:0.46	-3,1
5. Díra Ø 12 mm	0:0:08.41	0:0:08.25	0:0:0.16	1,8
<b>Čas celkem</b>	<b>0:2:10.0</b>	<b>0:1:57.0</b>	<b>0:0:13.16</b>	<b>10,1</b>



Graf 1: Úspora času po optimalizaci

Celková úspora času pro Díl 1 činí 10,1 % tedy 13,6 s. Z výsledků, je ale zřejmý velký rozdíl v časové úspoře na jednotlivé operace. U operace č.4 došlo dokonce k prodloužení času obrábění. V následujících podkapitolách budou podrobněji popsány jednotlivé optimalizované operace pro díl 1.

### 3.3.1.1 Optimalizace NC kódu – Drážka 1

První obráběcí operací u Dílu 1 je Drážka 1 jejíž úspora času dosáhla po optimalizaci hodnoty 2,2 % tedy 0,19 s. Ačkoliv se tato hodnota může jevit jako zanedbatelná, tak v případě, že by se jednalo o hromadnou výrobu tak již i takto malé snížení času obrábění na jednu operaci může přinést ve finále velké časové a finanční úspory. Jednalo by se například o výrobu 10 000 kusů tak úspora času může dosáhnout hodnoty:

$$10\,000 \times 0,19 = 1900\text{ s}$$

$$\frac{1900}{60} \cong 32\text{ min}$$

Za těchto podmínek by tedy úspora času dosáhla hodnoty 32 min. Přenastavením hodnoty performance indexu však lze celkovou úsporu času ještě zvýšit či snížit viz tabulka níže. Nutno ovšem počítat, že při zvýšení této hodnoty může dojít ke snížení životnosti nástroje. Zde se pak musí propočíst a experimentálně vyzkoušet jaká varianta je pro dané podmínky finančně výhodnější.

Tab. 14: Nastavení performance index pro Drážka 1

Performance index	Čas obr. [h]:[min]:[s]	Úspora času [%] proti původnímu času 0:0:09.92 [h]:[min]:[s]	Hodnota posuvu v plném záběru frézy [mm/min]
1	0:0:09.90	0,2	1775,812
2	0:0:09.80	1,2	1809,324
3	0:0:09.71	2,2	1842,836
4	0:0:09.62	3,1	1876,347
5	0:0:09.53	4	1909,859

Z hodnot, jež jsou zapsány v tabulce lze vidět, že i při nastavení performance indexu 1, tedy nastavení pro maximální životnost nástroje došlo ke snížení obráběcího času operace o 0,2 %, ačkoliv byla posuvová rychlost v oblasti řezu snížena, a to na  $v_f = 1775,812$  mm/min. Časového snížení pak bylo dosažení zejména zrychlením posuvové rychlosti při nájezdech a výjezdech nástroje. Z hodnot optimalizovaných posuvů je také zřejmé, že oproti původní hodnotě posuvové rychlosti v momentě, kdy je fréza plně v záběru došlo vždy po optimalizaci ke snížení posuvu. Výjimkou je pak hodnota posuvové rychlosti u performance indexu 5, kde posuv zůstal v místě plného záběru frézy stejný.

N9.5 G0 D0 SUPA Z500.	N12 G0 Z2.
N10 G0 D1 X31. Y-44.8 M8	G1 Z0.875 F7958
N11 G0 Z25.	G1 Z-2.5
N12 G0 Z2.	G1 Y-43.556 F2674
N13 G1 Z-2.5 F3183.099	G1 Y-42.311 F2406
N14 G1 Y44.8 F1909.859	G1 Y-41.067 F1961
N15 G0 Z2.	G1 Y-39.822 F1843
N16 G0 Y-44.8	G1 Y34.844 F1843
N17 G1 Z-5. F3183.099	G1 Y36.089 F2230
N18 G1 Y44.8 F1909.859	G1 Y37.333 F2674
N19 G0 Z25.	G1 Y42.311 F2674
N20 M5	G1 Y43.556 F4775
N21 N21 G0 D0 SUPA Z500.	G1 Y44.8
	F1910
	N15 G0 Z2.

Obr. 41 NC kód před a po optimalizaci. Foto autor.

Na vygenerovaném optimalizovaném NC kódu je v červeném rámečku vyznačeno, jak jsou řádky N13 a N14 rozděleny do jednotlivých segmentů s různou posuvovou rychlostí. V oblastech, kde je fréza mimo materiál, byla navýšená posuvová rychlost na maximální možnou hodnotu (2,5 násobek neoptimalizovaného posuvu), jenž v ose Z činí  $v_f = 7958$  mm/min a v osách XY  $v_f = 4775$  mm/min. Při nájezdu do materiálu pak byla posuvová rychlost postupně snižována, přičemž při vyjždění frézy z materiálu pak došlo k opětovnému zvyšování posuvové rychlosti viz tabulka 14. Z výsledků je zřejmé, že při nájezdu do materiálu Eureka Chronos rozdělila posuvovou rychlost do více řádků. To stejné provedla i pro výjezd z řezu.

Z naměřených hodnot mezi jednotlivými souřadnicemi, kde docházelo k akceleraci nebo deceleraci posuvu jsou rozestupy tvořeny matematickou řadou:

$$43,556 - 42,311 = 1,245 \text{ mm}$$

$$42,311 - 41,067 = 1,244 \text{ mm}$$

$$36,089 - 34,844 = 1,245 \text{ mm}$$

$$37,333 - 36,089 = 1,244 \text{ mm}$$

Tab. 15 Souřadnice pro výjezdy a nájezd frézy

Souřadnice os			Záběr frézy		Optimalizovaný posuv [mm/min]
X	Y	Z	[mm]	[%]	
31	-43,556	-2,5	0,444	5,55	2674
31	-42,311	-2,5	1,689	21,113	2406
31	-41,067	-2,5	2,933	36,66	1961
31	-39,882	-2,5	4,118	52,23	1843
31	34,844	-2,5	8	100	1843
31	36,089	-2,5	7,911	98,89	2230
31	37,333	-2,5	6,667	83,337	2674
31	42,311	-2,5	1,689	21,113	2674
31	43,556	-2,5	0,444	5,55	4775



Obr. 42: Graf posuvové rychlosti a objemu odebraného materiálu za jednotku času. Foto autor.

Rozdíl mezi původním a optimalizovaným NC kódem pak lze také pozorovat pomocí grafů, které byly vygenerovány v Eureka Chronos. V horním grafu pro posuvovou rychlost je v červeném rámečku vyznačen prostor, kde dochází k výjezdu z materiálu, následnému přejezdu pomocí rychloposuvu a poté opětovnému najetí nástroje do materiálu. Na dolním grafu

je pak zobrazeno množství odebraného materiálu za jednotku času. Přičemž pro oba grafy vyznačuje zelená čára hodnoty po optimalizaci a oranžová před optimalizací.

### 3.3.1.2 Optimalizace NC kódu – Drážka 2

Tato operace se od předešlé liší v tom, že Drážka 2 obsahuje rádia R4 tedy poloměr, jenž je i roven poloměru frézy. Celková úspora času pro operaci Drážka 2 činí 2,2 % tedy 0,25 s. Stejně jako u předešlé operace tak i zde platí, že ač jde pouze o malou časovou úsporu tak v hromadné výrobě i takováto úspora hraje značnou roli. V následující tabulce jsou opět uvedeny úspory času pro různá nastavení performance indexu.

Tab. 16: Nastavení performance index pro Drážka 2

Performance index	Čas obr. [h]:[min]:[s]	Úspora času [%] proti původnímu času 0:0:11.29 [h]:[min]:[s]	Hodnota posuvu v oblasti rádia [mm/min]
1	0:0:11.33	-0,4	1744,037
2	0:0:11.18	0,9	1785,493
3	0:0:11.04	2,2	1826,948
4	0:0:10.91	3,4	1868,404
5	0:0:10.78	4,5	1909,859

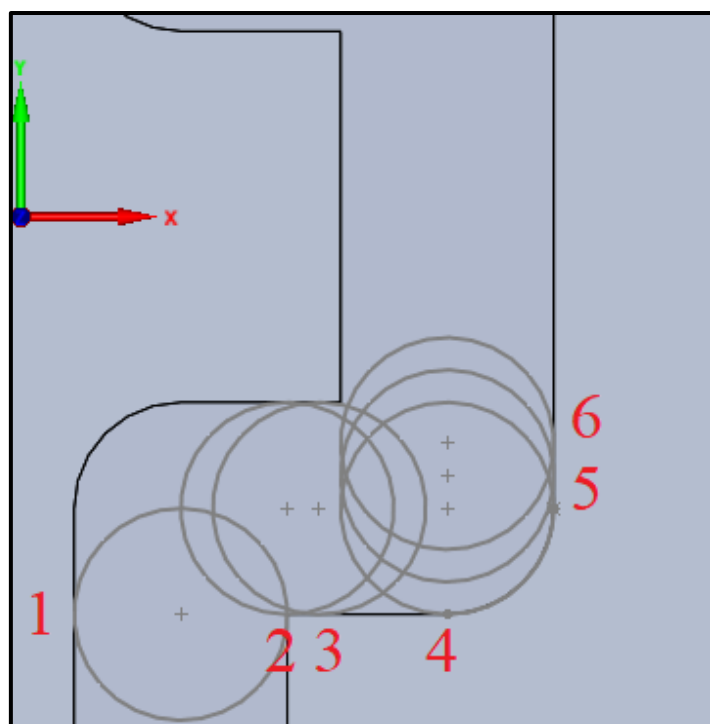
<pre> N12 G0 Z2. N13 G1 Z-2.5 F1909.859 N14 G1 Y-15. N15 G2 X10. Y-11. CR=4 N16 G1 X16. N17 G1 Y11. N18 G1 X10. N19 G2 X6. Y15. CR=4 N20 G1 Y44.8 N21 G0 Z2. N22 G0 Y-44.8 N23 G1 Z-5. N24 G1 Y-15. N25 G2 X10. Y-11. CR=4 N26 G1 X16. N27 G1 Y11. N28 G1 X10. N29 G2 X6. Y15. CR=4 N30 G1 Y44.8 N31 G0 Z25. N32 M5 N33 G0 D0 SUPA Z500. N34 M30 ;*** END OF PROGRAM ***                     </pre>	<pre> N12 G0 Z2. G1 Z0.875 F4775 G1 Z-2.5 G1 Y-43.558 F2674 G1 Y-42.317 F2385 G1 Y-41.075 F1944 G1 Y-39.833 F1827 G1 Y-15. F1910 N15 G2 X10. Y-11. CR=4 G1 X11.2 F1827 G1 X16. G1 Y-9.778 F2111 G1 Y-8.556 F1902 G1 Y-7.333 F1827 G1 Y11. G1 X14.8 F2111 G1 X13.6 F1902 G1 X12.4 F1827 G1 X10. G2 X6. Y15. CR=4. G1 Y34.867 F1827 G1 Y36.108 F2211 G1 Y37.35 F2674 G1 Y42.317 F2674 G1 Y43.558 F4775 G1 Y44.8 F1910 N21 G0 Z2.                     </pre>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Obr. 43: NC kód před a po optimalizaci. Foto autor.

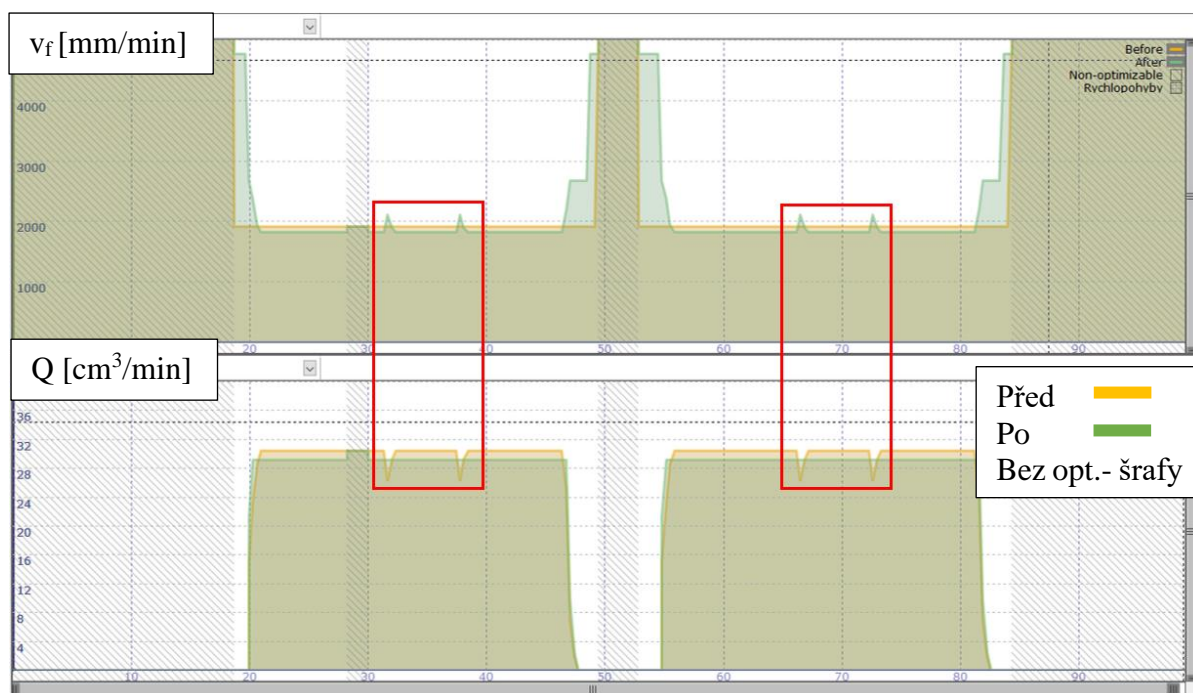
Rozdíl mezi původním a optimalizovaným NC kódem je zobrazen na obr. 43. Co se týče výjezdu a nájezdu z materiálu, tak zde proběhla optimalizace stejně jako při minulé operaci Drážka 1, tudíž již nebude v této části více rozebrána. Pozornost si ovšem zaslouží oblasti rádií. Souřadnice míst, v němž se rádius nástroje rovná rádiu poloměru jsou  $Y=-11$   $X=16$  a  $Y=11$   $X=16$ . V této oblasti byla posuvová rychlost z původní hodnoty posuvu  $v_f=1910$  mm/min optimalizována na  $v_f=1827$  mm/min. Tento rádius je v programu obroben pomocí pohybů G1, dráha nástroje zde není popsána pomocí kruhové interpolace, protože se rádia rovnají poloměru nástroje, což znamená že nástroj zajíždí do této oblasti pomocí lineárního pohybu G1. Po vyjetí z rádia se hodnota posuvové rychlosti v optimalizovaném NC kódu zvýší na  $v_f=2111$  mm/min, aby došlo k vyrovnání množství odebraného materiálu za jednotku času. Toto vyrovnání je zobrazeno v grafu na obr.45 červeným ohraničením, výše zmíněné změny posuvů jsou zapsány v tabulce níže i s danými souřadnicemi frézy, jež jsou zobrazeny na obr. 44.

Tab. 16: Souřadnice v okolí rádií

Pozice nástroje	Souřadnice os			Optimalizovaný posuv [mm/min]	Vzdálenost před rádiem v ose x
	X	Y	Z		
1	6	-15	-2,5	1910	-
2	10	-11	-2,5	1910	6
3	11,2	-11	-2,5	1827	5,8
4	16	-11	-2,5	1827	0
5	16	-9,778	-2,5	2111	20,778
6	16	-8,556	-2,5	1902	19,556



Obr. 44: Pozice frézy. Foto autor.



Obr. 45: Graf posuvové rychlosti a objemu odebraného materiálu za jednotku času. Foto autor.

Oproti očekávání nebyla v oblasti rádií významně snížena posuvová rychlost ve srovnání s jinými úseky operace Drážka 2. Co se týče optimalizace posuvu z celkového pohledu této operace, tak k znatelnějším změnám u této operace stejně jako u té předešlé došlo ve výjezdech a nájezdech nástroje do materiálu. Převážná část posuvové rychlosti, kdy je nástroj plně v záběru, byla stejně jako u minulé operace nepatrně snížena, výjimka pak opět nastala při nastavení performance indexu při hodnotě 5, kdy nedošlo ke snížení posuvu, ale k jeho zachování oproti původní hodnotě. Z grafu lze také zpozorovat, že část úseku NC programu nebyla z nějakého důvodu optimalizována, tomuto problému bude věnována kapitola 3.6.

### 3.3.1.3 Optimalizace NC kódu – Kapsa-hrubování

Optimalizace pro operaci Kapsa přinesla největší snížení času ze všech operací. Úspora pro tuto operaci činí 13 s tedy 15 %. To je dáno zejména tím, že je zde znatelněji větší prostor pro optimalizaci posuvu oproti předešlým dvou operacím, kde byla hodnota opásání nástroje mimo nájezdy a výjezdy z materiálu konstantní. U této operace však dochází k zajištění frýzy do materiálu pomocí šroubovice a následuje postupné rozjíždění kapsy na konečný rozměr. Nastavení performance indexu u operace Kapsa má relativně velký vliv na časové úspory. Výrazný skok je pak zejména mezi nastavením indexu 1 a 2. V případě, že by byl díl zařazen do výroby bylo by opět potřeba řádně zvážit jaká možnost by byla pro výrobce nejvýhodnější.

Tab. 17: Nastavení performance index pro hrubování kapsy

Performance index	Čas obr. [h]:[min]:[s]	Úspora času [%] proti původnímu času 0:1:26 [h]:[min]:[s]
1	1:22	3,6
2	1:17	10,5
3	1:13	15
4	1:11	17,1
5	1:09	18,7

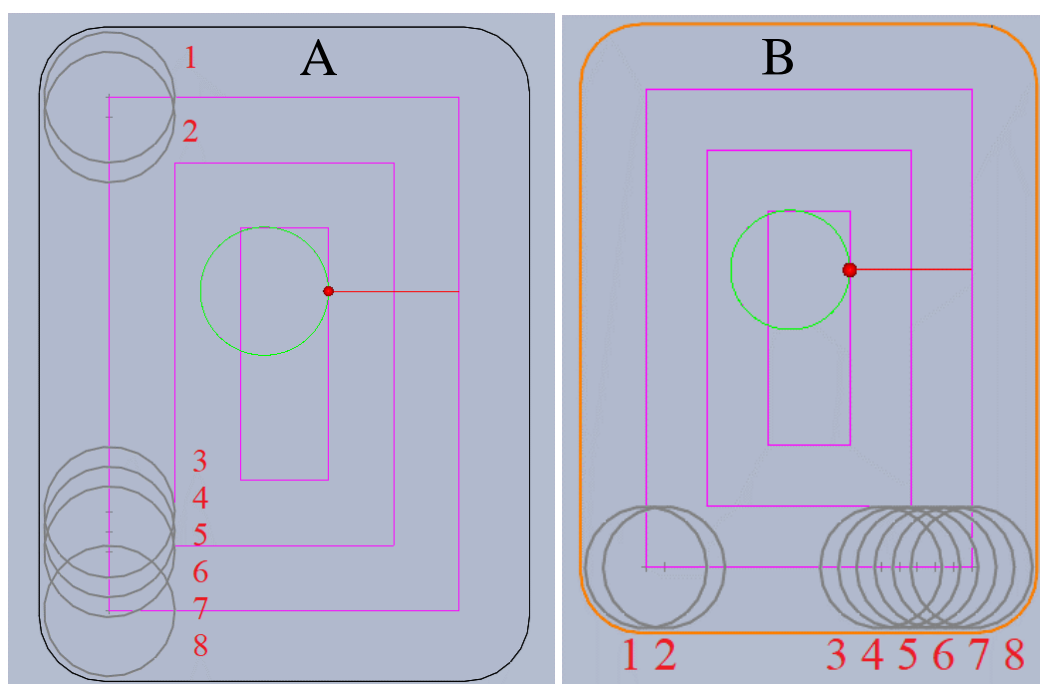
Optimalizovaný a neoptimalizovaný NC kód k této operaci viz. příloha č.3, neboť jednotlivé optimalizované řádky jsou rozděleny na příliš mnoho segmentů. U této optimalizace bylo podrobněji zkoumáno, jak Eureka Chronos optimalizuje program v okolí rádií. Pozice rozparcelovaných souřadnic, ve kterých fréza vyjíždí a najíždí z oblastí rádií jsou zapsány v tabulkách níže. Pozice fréz z tabulek jsou vyobrazeny na obr. 46.

Tab. 18: Pozice fréz A v oblasti rádií

Pozice nástroje A	Souřadnice os			Optimalizovaný posuv [mm/min]	Vzdálenost před rádiem [mm]
	X	Y	Z		
1	-28,7	15,7	-2	1545	31,4
2	-28,7	14,492	-2	2674	30,192
3	-28,7	-9,662	-2	2674	6,038
4	-28,7	-10,869	-2	2128	4,831
5	-28,7	-12,077	-2	1938	3,623
6	-28,7	-13,285	-2	1786	2,415
7	-28,7	-14,492	-2	1609	1,208
8	-28,7	-15,7	-2	1545	0

Tab. 19: Pozice fréz B v oblasti rádií

Pozice nástrojů B	Souřadnice os			Optimalizovaný posuv [mm/min]	Vzdálenost před rádiem [mm]
	X	Y	Z		
1	-28,7	-15,7	-2	1545	21,4
2	-27,511	-15,7	-2	2674	20,211
3	-13,244	-15,7	-2	2674	5,944
4	-12,056	-15,7	-2	2128	4,756
5	-10,867	-15,7	-2	1938	3,567
6	-9,678	-15,7	-2	1786	2,378
7	-8,489	-15,7	-2	1609	1,189
8	-7,3	-15,7	-2	1545	0



Obr. 46: Pozice fréz A a B v optimalizovaném NC kódu. Foto autor.



Snižování a zvyšování posuvové rychlosti je v Eureka Chronos prováděno dle určitého algoritmu, jež byl již zpozorován i u předešlých operací. Z pozorovaných NC kódů však zpomalování z hlediska souřadnic probíhá vždy podobně. Z tabulky 19 byly vzaty hodnoty vzdálenosti před rádiem, na nichž se tato matematická řada potvrdila:

$$5,944-4,756 = 1,188 \text{ mm}$$

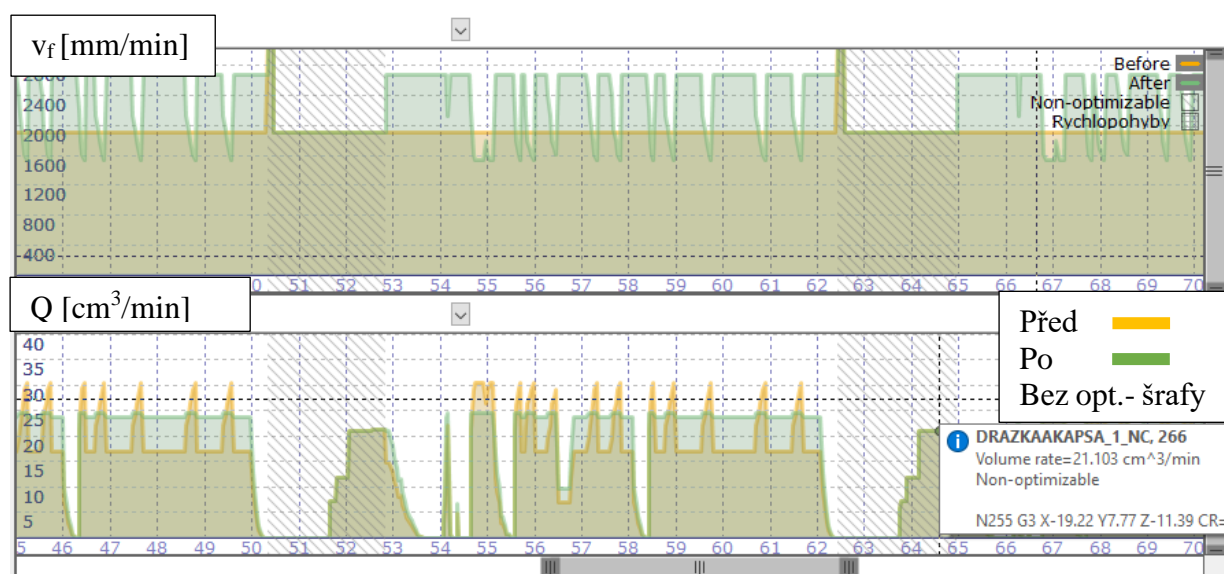
$$4,756-3,567 = 1,189 \text{ mm}$$

$$3,567-2,378 = 1,189 \text{ mm}$$

$$2,378-1,189 = 1,189 \text{ mm}$$

$$1,189-0 = 1,189 \text{ mm}$$

Avšak vztah pro algoritmus, jež určuje, od jaké vzdálenosti má začít nástroj zpomalovat není znám.



Obr. 47: Graf pro operaci Kapsa-hrubování. Foto autor.

Z optimalizovaného NC kódu a grafu, jež Eureka Chronos zobrazuje, je také zřejmé, že nebyla optimalizována část programu, kdy nástroj zajíždí pomocí šroubovice do materiálu. To může být tím, že CAM/Eureka tyto dráhy berou pouze jako sestup a ne jako řeznou dráhu jež je určená k optimalizaci.

### 3.3.1.4 Optimalizace NC kódu – Kapsa na čisto

Stejně jako u minulé operace, bude popis optimalizace opět zaměřen na oblasti rádií. Rozdílem je ovšem to, že zde se jedná o dokončovací operaci. Nástroj tedy nebude odebírat větší množství materiálu, jak tomu bylo u předešlých operacích. Dalším rozdílem je pak to, že obrobení kapsy nebude probíhat pomocí konstantní souřadnice osy Z, ale nástroj bude sestupovat od horní hladiny Z až po dno kapsy pomocí šroubovice. Tato operace se pak ještě liší v nastavení  $F_{min}/F_{programmed} = 0,1$ . Při tomto nastavení se pak celková doba obrábění zvýšila a to o 3,1 % tedy 0,46 s. Jedná se o jedinou operaci, kde došlo k snížení času obrábění, což však vůbec nemusí být na škodu, neboť jak již bylo zmíněno, tak se jedná o dokončovací operaci a je potřeba, aby posuvová rychlost v oblasti rádií byla snížena a tím by bylo dosaženo lepší kvality obrobeného povrchu. Překvapením pak bylo, že při tomto nastavení volba performance indexu nehraje roli a vždy se dostane stejného výsledku optimalizace. Ovšem při nastavení  $F_{min}/F_{programmed} = 0,5$  již performance index do optimalizace opět zasahuje viz tab. 20.

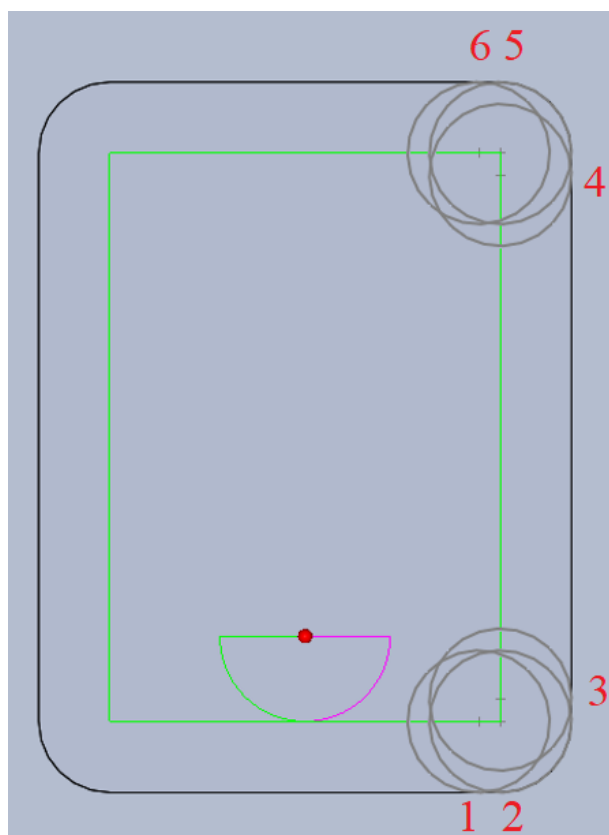
Tab. 20: Nastavení performance index pro finiš kapsy

Performance index	Čas obr. [h]:[min]:[s]	Úspora času [%] proti původnímu času 0:0:14.65 [h]:[min]:[s]
1	0:0:14.98	-2,3
2	0:0:13.77	5,9
3	0:0:13.03	10,9
4	0:0:12.58	14
5	0:0:12.35	15,6

Dále se již bude opět pracovat pouze s  $F_{\min}/F_{\text{programmed}} = 0,1$ .

Tab. 21: Pozice fréz v oblasti rádií

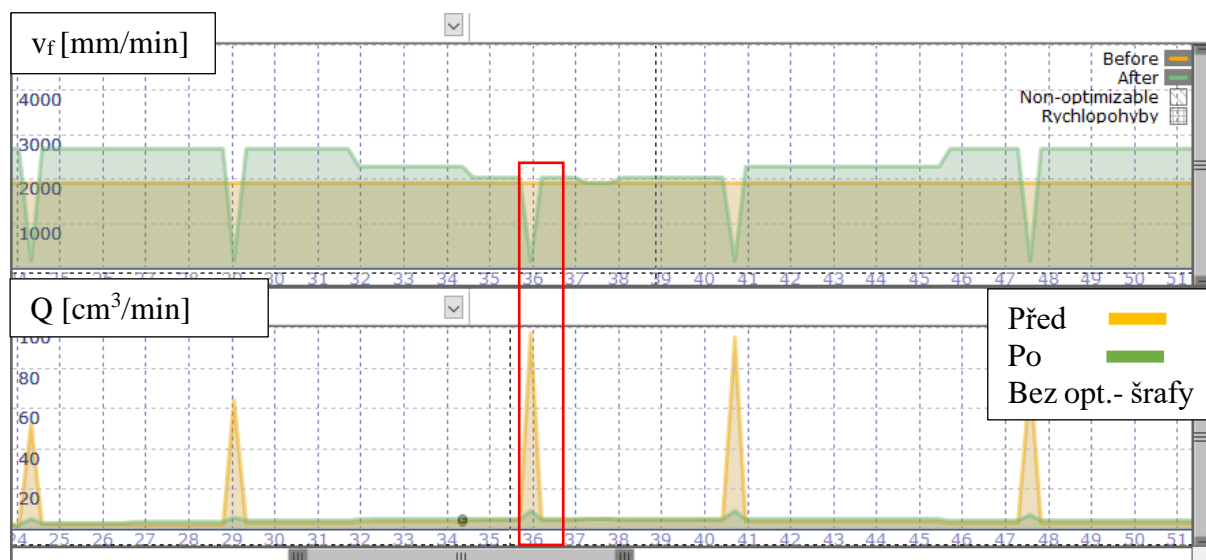
Pozice nástroje	Souřadnice os			Optimalizovaný posuv [mm/min]	Vzdálenost před rádiem [mm]
	X	Y	Z		
1	-8,22	-16	-1,837	2674	1,22
2	-7	-16	-1,939	456	0
3	-7	-14,769	-2,041	2674	30,77
4	-7	14,769	-4,497	2674	2,462
5	-7	16	-4,599	191	1,231
6	-8,22	16	-4,701	2674	0



Obr. 48: Pozice fréz. Foto autor.

Po optimalizaci této operace, došlo k výrazným změnám posuvové rychlosti v oblasti rádií, a to na minimálně možnou hodnotu posuvu  $v_f = 191$  mm/min tedy 0,1x původní hodnoty

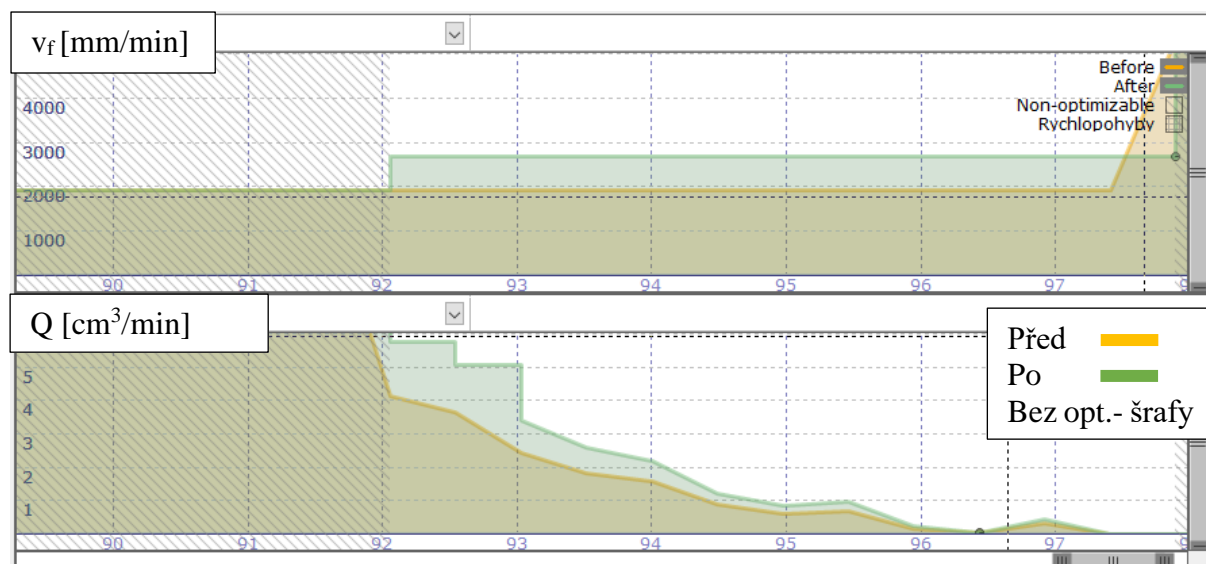
$v_f=1910$  mm/min. Eureka Chronos tedy využila pro snížení rychlosti maximálně možný rozsah. Zajímavé je, že takto učinila u všech hodnota performance indexu, a to i u hodnoty 5. Výsledky této optimalizace jsou dobře viditelné z grafů, které Eureka Chronos vygenerovala. Na obr. 49 níže je jasně viditelné, jak s v místech rádií snížil posuv na minimální hodnotu a tím se pak zajistilo a značné snížení množství odebraného materiálu za čas v oblasti rádií, kde tato hodnota zaznamenala v původním NC programu značný skokový rozdíl.



Obr. 49: Graf pro operaci Finiš kapsy. Foto autor.

### 3.3.1.5 Díra Ø 12 mm

Optimalizací pro tuto operaci bylo dosaženo úspory času 1,8 % tedy 0.16 s. Tato operace nezaznamenala žádnou změnu pro různé nastavení performance indexu. Přičemž optimalizace této operace proběhla až po sestupu nástroje na dno. Lze tedy předpokládat, že Eureka Chronos neoptimalizuje úseky programu, ve kterých nástroj koná pohyb pomocí šroubovice.



Obr. 50: Graf pro díru Ø 12 mm. Foto autor.

Celkově lze tedy říci, že prostor pro optimalizace u této operace byl minimální a využití Eureka Chronos zde oproti ostatním operacím nedává příliš velký smysl.

### 3.3.1.6 Souhrn poznatků optimalizace dle A.I.

Během tvorby optimalizace pomocí A.I. pro Díl 1, byly zjištěny následující fakta:

- Akcelerace a decelerace probíhá v rozdělených blocích jejichž souřadnice jsou od sebe vzdáleny v určité matematické řadě.
- Nastavení performance indexu značně ovlivňuje časovou úsporu optimalizovaného NC kódu.
- Ověřilo se, že optimalizace pomocí A.I. opravdu snižuje špičky řezných sil tím, jak linearizuje množství obrobeného materiálu za čas.
- U operace Drážka 2, neproběhla optimalizace v plném rozsahu.
- V případě, že byla řezná dráha vygenerována jako sestup, tak Eureka Chronos ne vždy tento pohyb nástroje optimalizuje, to se týká především při pohybu pomocí šroubovice.

### 3.3.2 Optimalizace NC kódu dle uživatelských omezení

Optimalizace pomocí uživatelem zadaných omezení bude u Dílu 1 provedena pouze pro operaci Drážka 1, neboť se jedná o nejméně složitou operaci, tudíž je vhodná na popsání různých uživatelských omezení a na ověření hodnot skrze výpočty. Omezení z hlediska posuvu pak byla zvolena stejně, jako u optimalizace dle A.I. tedy:

- $F_{\max \text{ in air}}/F_{\text{programmed}} = 2,5$ ,
- $F_{\max}/F_{\text{programmed}} = 1,4$ ,
- $F_{\min}/F_{\text{programmed}} = 0,5$ .

#### 3.3.2.1 Optimalizace NC kódu dle množství odebraného materiálu za jednotku času

Nejprve bude popsána optimalizace dle uživatelských omezení z hlediska množství odebraného materiálu za jednotku času  $Q$ . Tento parametr odpovídá zvýšení produktivity výroby, jedná se tedy o relativně často využívaný údaj. Pro optimalizaci pak byly zvoleny podmínky, jež jsou uvedeny na obr. níže

Obr. 51: Podmínky optimalizace. Foto autor.

Při volbě hodnoty  $Q_{\text{omez}}=39 \text{ cm}^3/\text{min}$  množství odebraného materiálu za jednotku času byl nejdříve proveden výpočet pro původní hodnotu  $Q$ :

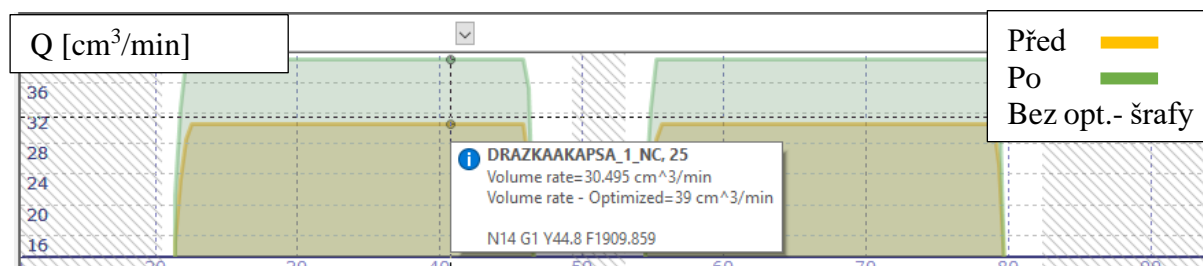
$$Q = \frac{a_p \times a_e \times v_f}{1000} = \frac{2,5 \times 8 \times 1909,859}{1000} = 38,197 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Kde:

- $Q$ : množství odebraného materiálu za jednotku času [ $\text{cm}^3/\text{mm}$ ],
- $a_p$ : axiální hloubka řezu [mm],
- $a_e$ : radiální hloubka řezu [mm],
- $v_f$ : posuvová rychlost [mm/min].

Příčemž hodnota  $Q_{\text{omez}}=39 \text{ cm}^3/\text{min}$  byla zvolena nepatrně vyšší, aby se zvýšila produktivita výroby u dané operace. Po proběhnutí optimalizace dané operace však byla

objevena neshoda mezi výpočtem  $Q$  provedeným pro tuto DP a hodnotou jež je zobrazena v Eureka Chronos:



Obr. 52 Graf pro opt. dle objemu odebraného materiálu za jednotku času. Foto autor

Zde tedy vyšel rozpor mezi hodnotami  $Q = 38,197 \text{ cm}^3/\text{min}$  a  $Q_{\text{Eureka}} = 30,495 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Pro ověření byl proveden i výpočet s optimalizovaným posuvem  $F = 2442,483 \text{ mm}/\text{min}$ .

$$Q_{\text{opt}} = \frac{2,5 \times 8 \times 2442,483}{1000} = 48,85 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

I zde však nastal velký rozdíl mezi hodnotami  $Q_{\text{opt}} = 48,85 \text{ cm}^3/\text{min}$  a  $Q_{\text{Eureka-opt}} = 39 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Výpočet k  $Q$  byl pro ověření správnosti výpočtu proveden několikrát, a to i na různých obráběcích kalkulátorech a vždy bylo dosaženo stejných výsledků. Je tedy nejasné, proč Eureka Chronos udává rozdílné hodnoty oproti kontrolním výpočtům. Tento rozpor bude ještě podrobněji prozkoumán a popsán v kapitole 3.6. Výsledný optimalizovaný program čas výroby snížil o poznání více než bylo zamýšleno, neboť zvolená hodnota pro optimalizaci  $Q_{\text{omez}} = 39 \text{ cm}^3/\text{min}$  je od původní hodnoty  $Q_{\text{Eureka}} = 30,495 \text{ cm}^3/\text{min}$  jež zobrazuje Eureka Chronos výrazně vzdálenější, než tomu bylo dle prvotního výpočtu zamýšleno. Optimalizovaný NC kód však i přesto nepřekročil rezné podmínky, jež by mohly zapříčinit znehodnocení nástroje či obrobku.

Tab. 22: Shrnutí optimalizace

Uživatelské omezení	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]	Optimalizovaný posuv [mm/min]
Objem odebraného materiálu za čas	0:0:9.92	0:0:8.46	14,7	2442,483

### 3.3.2.2 Optimalizace NC kódu dle tloušťky třísky

Jedná se o určující faktor pro opotřebení nástroje, rezní síly, teplotu při frézování a utváření třísky. Hodnota tloušťky třísky je tedy velice důležitá, neboť má značný vliv na rezný proces a životnost nástroje. Pro optimalizaci byly zvoleny následující omezení.

Obr. 53: Podmínky optimalizace. Foto autor.

Při určování hodnoty tloušťky třísky  $h_{m\text{-omez}}$ , dle které bude provedena optimalizace byl nejprve proveden výpočet tloušťky třísky s neoptimalizovanými údaji:

$$h_{\text{max}} = f_z = 0,03 \text{ mm}$$

$$h_m = \frac{\sin \kappa \times 180 \times f_z \times a_e}{\pi \times D \times \sin^{-1} \frac{a_e}{D}} = \frac{\sin 90 \times 180 \times 0,03 \times 8}{\pi \times 8 \times \sin^{-1} \frac{8}{8}} 0,019 \text{ mm}$$

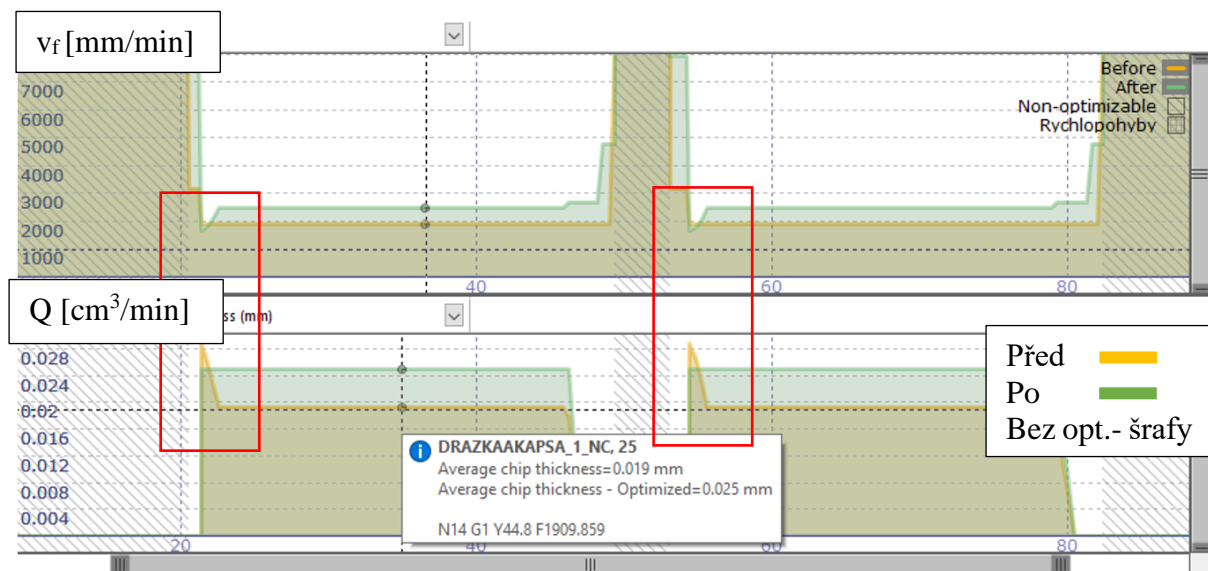
Kde:

- $h_{\max}$ : maximální tloušťka třísky [mm],
- $h_m$ : průměrná hodnota tloušťky třísky [mm],
- $\kappa$ : úhel nastavení hlavního ostří,
- $a_e$ : radiální hloubka řezu [mm],
- $f_z$ : posuv na zub [mm/z],
- $D$ : průměr frézy.

Optimalizační hodnota  $h_{m\text{-omez}} = 0,025 \text{ mm}$  byla zvolena o něco vyšší oproti  $h_m = 0,019 \text{ mm}$ , aby bylo opět dosaženo zvýšení produktivity výroby. Uživatel si při zadávání optimalizační hodnoty tloušťky třísky musí být vědom, že Eureka Chronos pracuje s hodnotou  $h_m$  ne  $h_{\max}$ . Po provedení optimalizace byla ještě provedena kontrola výpočtu s optimalizovanou hodnotou posuvu:

$$h_{m\text{-opt}} = \frac{\sin \kappa \times 180 \times f_z \times a_e}{\pi \times D \times \sin^{-1} \frac{a_e}{D}} = \frac{\sin 90 \times 180 \times 0,039 \times 8}{\pi \times 8 \times \sin^{-1} \frac{8}{8}} 0,025 \text{ mm}$$

Výsledná hodnota  $h_{m\text{-opt}}$  tedy souhlasí s hodnotou, dle které byla optimalizace provedena a také s hodnotou jež uvádí Eureka Chronos. V tomto případě na rozdíl od předešlé operace jsou všechny výsledky shodné s hodnotami, které uvádí Eureka Chronos. Na grafu níže je zobrazeno, jak Eureka optimalizovala posuvovou rychlost, aby docílila konstantní hodnoty tloušťky třísky  $h_{m\text{-opt}} = 0,025 \text{ mm}$ .



Obr. 54: Graf pro opt. dle tloušťky třísky. Foto autor.

Tab. 23: Shrnutí optimalizace

Uživatelské omezení	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]	Optimalizovaný posuv [mm/min]
Tloušťka třísky	0:0:09.92	0:0:08.46	14,7	2489,331

### 3.3.2.3 Optimalizace NC kódu dle výkonu

Omezení z hlediska výkonu je vhodné využít například při hrubovacích operacích, kdy je cílem využít výkon pro co nejvyšší efektivitu obrábění. Pro optimalizaci byly zvoleny následující podmínky.

Mode	User	P [kW]	0.7
Fmax in air / Fprogrammed	2.5	<input type="checkbox"/> Max feed in air (mm/min):	40000
Fmax / Fprogrammed	1.4	<input type="checkbox"/> Max feed in cut (mm/min):	20000
Fmin / Fprogrammed	0.5		

Obr. 55: Podmínky optimalizace. Foto autor.

Neoptimalizovaný výkon je dle Eureka Chronos roven  $P=0,61$  kW. Pro kontrolu této hodnoty byl proveden následující výpočet:

$$F_t = AZ_c \times k_c = a_p \times \frac{180^\circ \times (1 - \cos TEA) \times f_z}{\tau \times \arccos(1 - (1 - \cos TEA))} \times Z \times \frac{TEA}{360^\circ} \times k_{c1.1} \times h_m^{-m_c}$$

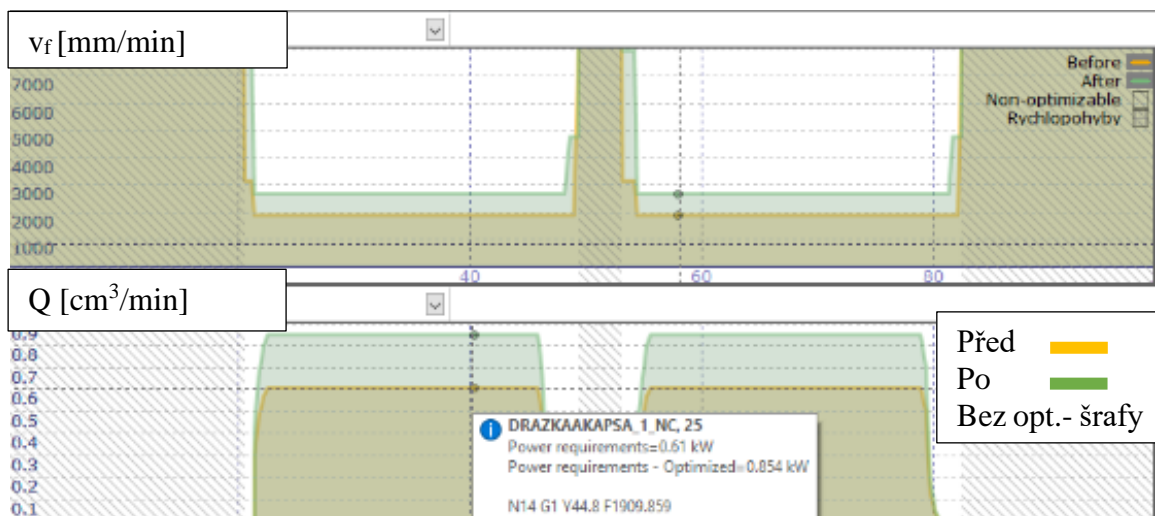
$$F_t = 2,5 \times \frac{180^\circ \times (1 - \cos 180^\circ) \times 0,03}{\tau \times \arccos(1 - (1 - \cos 180^\circ))} \times 4 \times \frac{180^\circ}{360^\circ} \times 600 \times 0,019_m^{-0,25} = 153,33 \text{ N}$$

$$P = \frac{F_t \times v_c}{60} = \frac{153,33 \times 400}{60} = 1022,2 \text{ W} = 1,02 \text{ kW}$$

Kde:

- $h_m$ : průměrná hodnota tloušťky třísky [mm],
- $a_p$ : axiální hloubka řezu [mm],
- $f_z$ : posuv na zub [mm/z],
- $Z$ : počet zubů,
- $k_c$ : jednotkový měrný řezný odpor [MPa].

Z výsledků je zřejmé, že nastal velký rozpor mezi hodnotami  $P=1,02$  kW a  $P_{\text{Eureka}}=0,61$  kW. I zde je nejasné, dle jakých výpočtů je optimalizace pro výkon  $P$  v prostředí Eureka Chronos prováděna, protože všechny veškeré výpočty jsou prováděny interně.



Obr. 56: Graf pro opt. dle výkonu. Foto autor.

Tab. 24: Shrnutí optimalizace

Uživatelské omezení	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]	Optimalizovaný posuv [mm/min]
Výkon	0:0:9.92	0:0:8.13	18	2673,803

### 3.3.2.4 Optimalizace NC kódu dle kroutícího momentu

Omezení z hlediska Kroutícího momentu je vhodné pro optimalizování hrubovacích operací, kde je snaha o maximální využití možnosti stroje z hlediska výkonu. Pro optimalizaci byly zvoleny následující podmínky.

Obr. 57: Podmínky optimalizace. Foto autor.

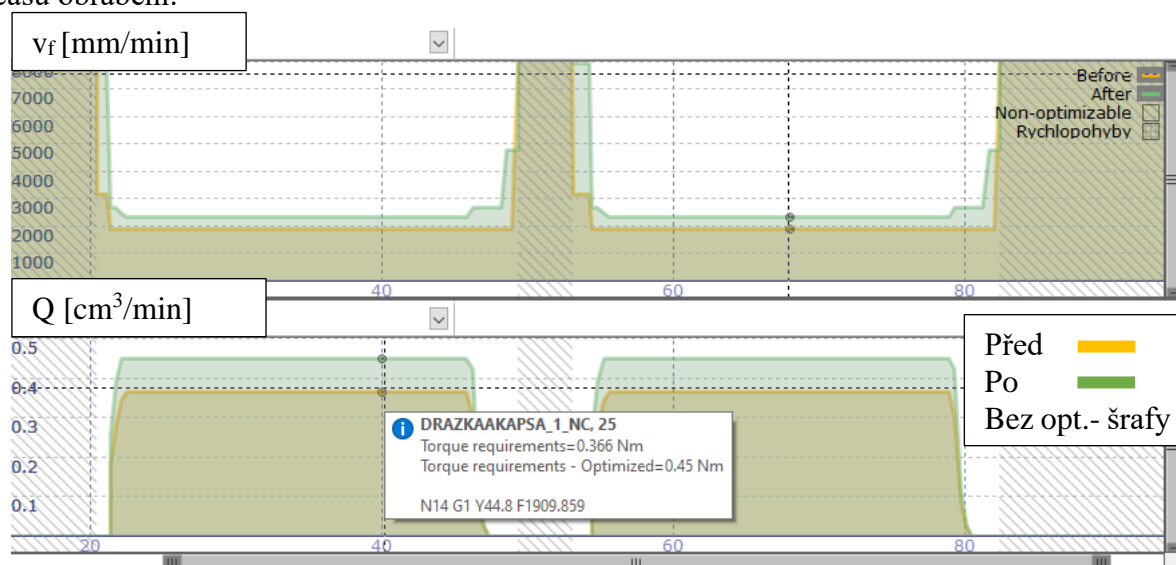
Pro určení omezení z hlediska kroutícího momentu  $M_{komez}$  byl opět nejdříve proveden výpočet pro kroutící moment  $M_k$ , s neoptimalizovanými údaji.

$$M_k = \frac{P \times 30 \times 10^3}{\pi \times n} = \frac{0,366 \times 30 \times 10^3}{\pi \times 15915,5} = 0,366 \text{ Nm}$$

Kde:

- $M_k$ : Kroutící moment [Nm]
- $P$ : Potřebný výkon stroje [kw]
- $n$ : Otáčky vřetene [ot./min]

Vypočtená hodnota  $M_k$  souhlasí s hodnotou  $M_{kEureka}$  jenž po výpočtu optimalizace ukazuje Eureka Chronos. Hodnota  $M_{komez}=0,45 \text{ Nm}$  byla zvolena opět o něco vyšší za cílem snížení času obrábění.



Obr. 58: Graf pro opt. dle kroutícího momentu. Foto autor.



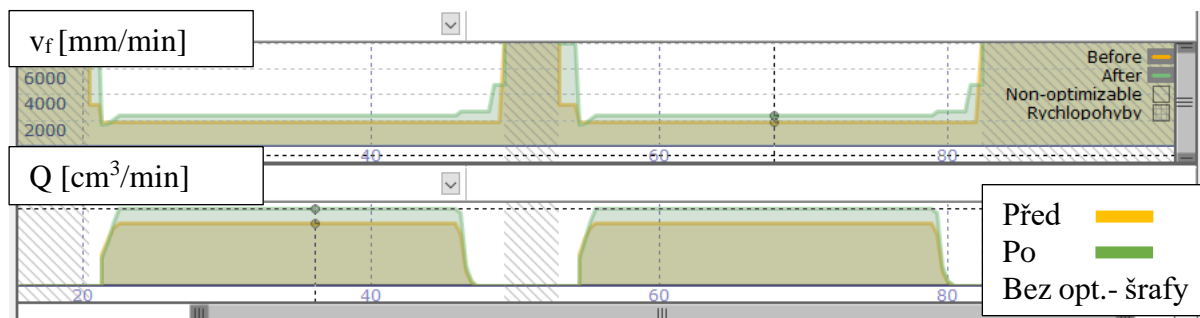
Tab. 25: Shrnutí optimalizace

Uživatelské omezení	Čas před opt.	Optimalizovaný čas	Úspora času [%]	Optimalizovaný posuv [mm/min]
Kroučící moment	0:0:09.92	0:0:08.61	13,2	2348,542

### 3.3.2.5 Optimalizace NC kódu kombinací omezení

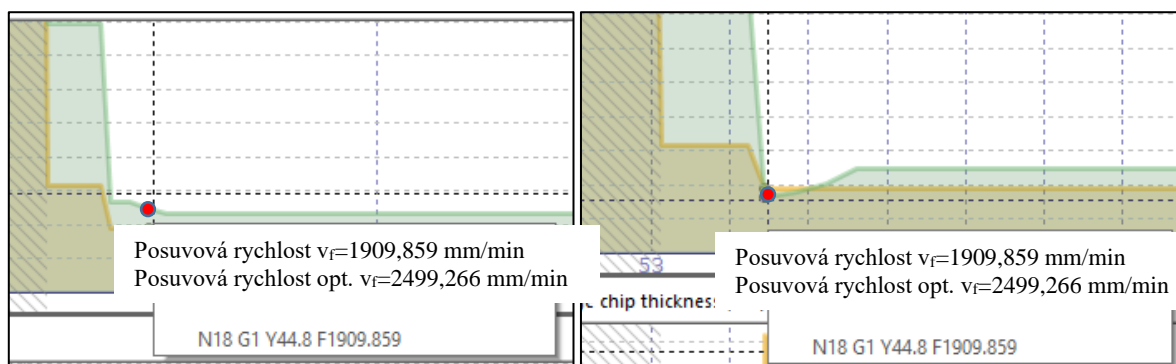
Optimalizace může být též provedena dle kombinace několika nebo i všech výše zmíněných omezení. K následující optimalizaci byla využita kombinace omezení kroučícího momentu a tloušťky třísky. Přičemž omezení byla zvolena následující.

Obr. 59: Podmínky optimalizace. Foto autor.



Obr. 60 Graf pro opt. dle kombinace omezení. Foto autor.

Z výsledků vyplývá, že se posuv v oblastech, kdy je fréza plně v záběru, je roven  $v_f=2348,542$  mm/min. V této oblasti byl tedy posuv optimalizován dle kroučícího momentu  $M$ , neboť při optimalizace dle tohoto parametru dosáhl posuv stejné hodnoty tedy  $v_f=2348,542$ , zatímco u optimalizace dle třísky dosáhl v této oblasti vyšších hodnot posuvu. Ovšem u nájezdu frézy do materiálu byla naopak hodnota posuvu u optimalizace dle kroučícího momentu vyšší než u tloušťky třísky viz obr. níže.



Obr. 61: Hodnoty posuvu při nájezdu do materiálu pro omezení  $M$  a  $h$ . Foto autor.

Výsledný program je tedy optimalizovaný dle různých parametrů, přičemž každé omezení zasáhlo do optimalizace v jináčí části programu. Tato metoda je tedy vhodná pro uživatele, kteří chtějí mít pod kontrolou více parametrů najednou.

Tab. 26: Shrnutí optimalizace

Uživatelské omezení	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]	Optimalizovaný posuv [mm/min]
Kombinované	0:0:9.92	0:0:8.68	12,5	2348,542

### 3.3.2.6 Souhrn optimalizace dle uživatelem zadaných omezení

Pro optimalizaci operace Drážka 1 byla popsána všechna možná omezení, jež Eureka Chronos nabízí. Byla zjištěna následující fakta:

- Vypočtené hodnoty pro objem odebraného materiálu Q nesouhlasí s hodnotou, která je zobrazena v Eureka Chronos.
- Výsledné hodnoty pro optimalizaci dle výkonu, se též s hodnoty vypočtenými pro tuto práci neshodovaly, zde však vystupuje relativně dost proměnných hodnot, což může zapříčinit neshodu ve výsledku.
- Vypočtené hodnoty tloušťky třísky a krouticího momentu naopak souhlasily s hodnoty jež uvedla Eureka Chronos.
- Z výsledků lze říci, že bylo dosaženo relativně konstantní hodnoty parametru, dle kterého byla optimalizace provedena.
- Byla též popsána a vyzkoušena kombinovaná uživatelská optimalizace, kde bylo zjištěno, že výsledné grafy vždy zobrazují pouze hodnotu posuvové rychlosti  $v_f$  a množství odebraného materiálu za čas Q.
- I zde stejně jako u optimalizace dle A.I. platí, že uživatel musí vždy zadat správné řezné podmínky a optimalizační omezení vzhledem k použitému nástroji či obráběnému materiálu.

### 3.3.3 Optimalizace NC kódu dílu 2 -A.I.

Pro veškeré operace byly z hlediska optimalizace nastaveny stejné podmínky viz obr. níže.

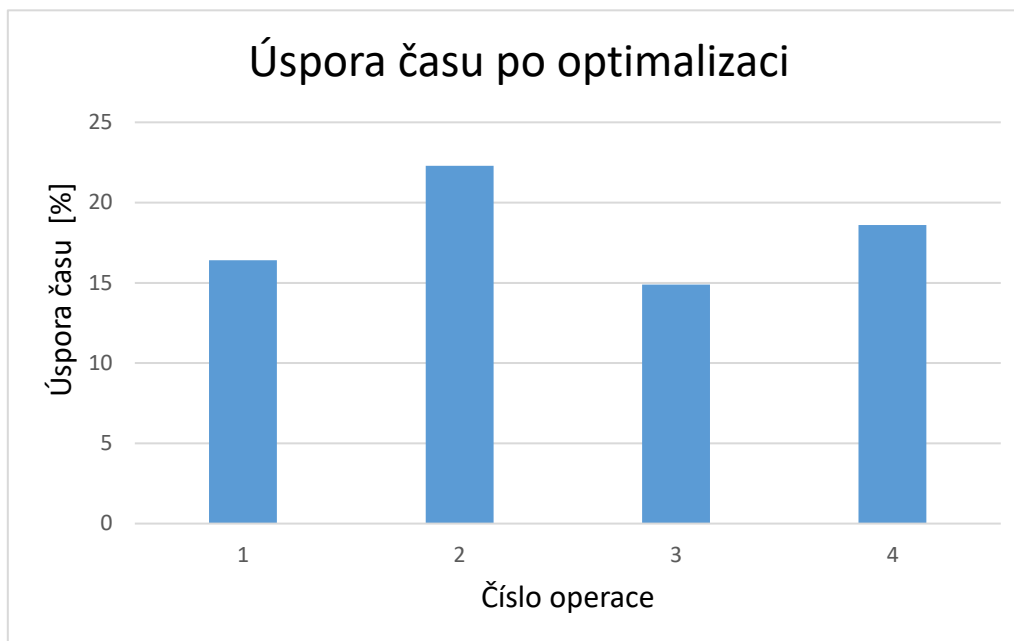
The screenshot shows the optimization interface for 'Životnost nástroje' (Tool life) and 'Performance index'. The 'Mode' is set to 'A.I.'. The 'Tool life - 1' slider is set to 1. The 'Performance index' is set to 5 - Productivity. The 'Fmax in air / Fprogrammed' is 2.5, 'Fmax / Fprogrammed' is 1.3, and 'Fmin / Fprogrammed' is 0.5. The 'Max feed in air (mm/min)' is 40000 and 'Max feed in cut (mm/min)' is 20000.

Obr. 62: Podmínky optimalizace. Foto autor.

Hodnoty omezení  $F_{max}$  a  $F_{min}$  byly opět vybrány s ohledem na údaje, jež jsou udány výrobcem nástrojů. Performance index byl stejně jako u minulé operace nastaven na střední hodnotu 3.

Tab. 27: Optimalizace Dílu 2 dle A.I.

Operace	Čas před optimalizací [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [h]:[min]:[s]	Úspora [%]
1. Rovinná plocha	0:06:17	0:05:15	0:01:02	16,4
2. Tvarové plochy č.1	0:09:16	0:07:11	0:02:05	22,3
3. Tvarové plochy č.2	0:06:45	0:05:44	0:01:01	14,9
4. Tvarové plochy č.3	0:07:48	0:06:21	0:01:27	18,6
<b>Čas celkem</b>	<b>0:30:07</b>	<b>0:24:34</b>	<b>0:05:33</b>	<b>18,5</b>

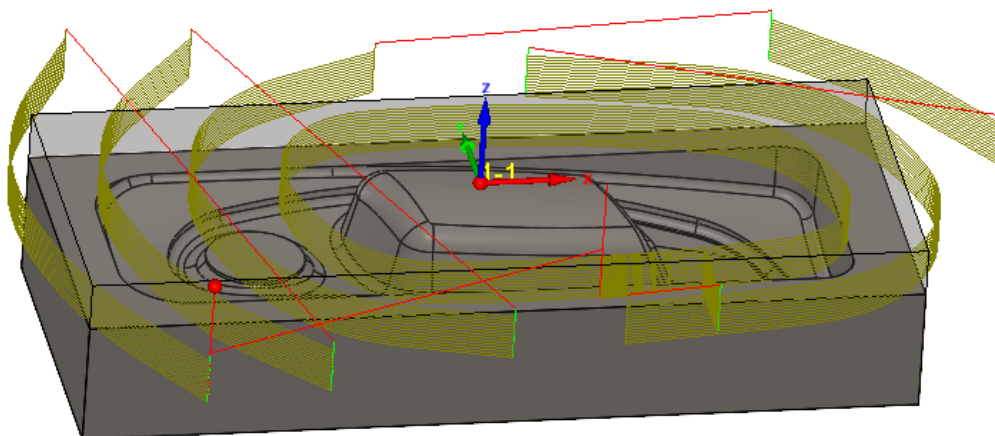


Graf 2: Úspora času po optimalizaci

Celková úspora času pro Díl 2 tedy činí 18,5 % což je 0:05:33 h:min:s. Oproti předešlému dílu se jedná o téměř dvojnásobnou procentuální úsporu času, potvrdilo se tedy to, že u dílu typu forma s větším počtem tvarových ploch bude úspora času po optimalizaci výraznější. Sama Eureka Chronos uvádí průměrnou hodnotu úspory času na 20 %. Což zhruba odpovídá optimalizaci u Dílu 2. Z výsledků je také zřejmé, že 3D operace 2 a 4, které obráběly předhrubované tvarové plochy zaznamenaly větší úsporu času než zbylé dvě operace.

### 3.3.3.1 Optimalizace NC kódu – Rovinná plocha

Jako první bude optimalizace provedena u operace rovinná plocha, jedná se o jedinou operaci u dílu dva, jež není 3D operací. Jak již bylo zmíněno v minule kapitole, tak u této operace dle očekávání došlo k menší úspoře času než u operací č.2 a č.4. Úspora času pro obrobení rovinné plochy činí 16,4 % tedy 0:01:02 h:min:s, což je již značné snížení, které se může výrazně projevit do zvýšení zisků a produktivity daného podniku.



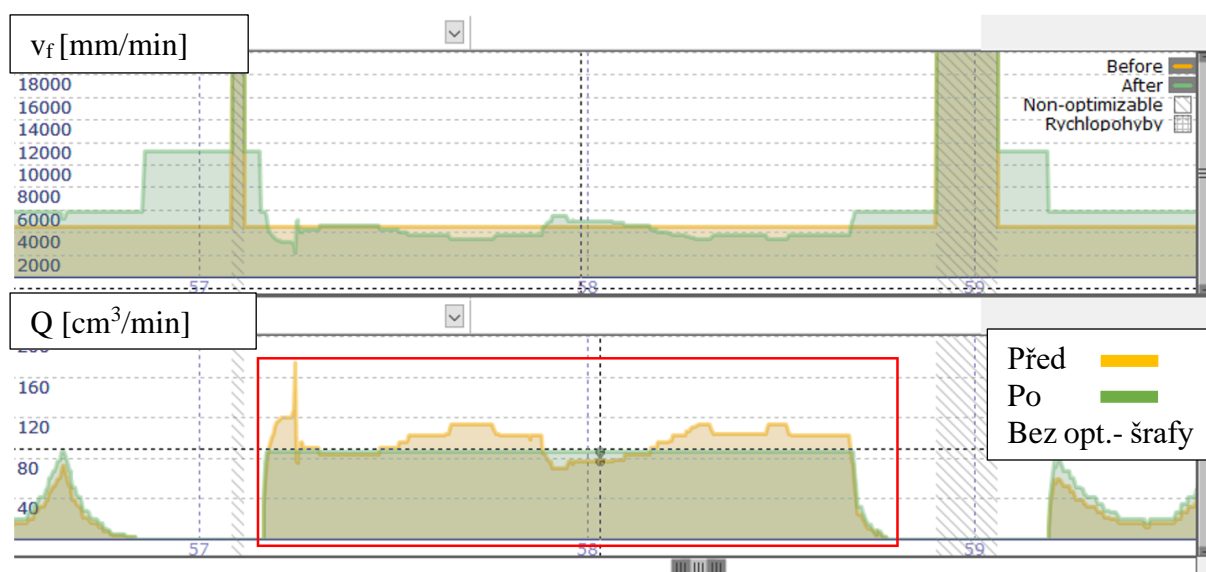
Obr. 63: Optimalizace – rovinná plocha. Foto autor.

Použitý nástroj: Fr D32 r2 L9 z5

Tab. 28: Nastavení performance indexu pro operaci Rovinná plocha

Performance index	Čas obr. [h]:[min]:[s]	Úspora času [%] proti původnímu času 0:06:17 [h]:[min]:[s]
1	0:06:28	-2,7
2	0:05:44	8,7
3	0:05:15	18,5
4	0:04:55	21,8
5	0:04:41	25,5

Z výsledků nastavení performance indexu vyplývá, že při hodnotě jedna, došlo ke zvýšení času obrábění. Ačkoliv byla operace prodloužena o 2,7 % tedy 11 s, tak to pro výrobce nemusí ihned znamenat finanční ztrátu, a to v případě kdy výrobce není tlačěn datem dodání výrobku či ho netlačí čas z hlediska plnění dalších dodávek. Zejména pak při kusové výrobě je ztráta času 2,7 %, která navíc způsobí prodlouženou životnost nástrojů zanedbatelná. U dalších hodnot performance indexu již došlo k úspoře času a to až 25,5 %. Zde je tedy značný rozdíl mezi jednotlivými nastaveními performance indexu.

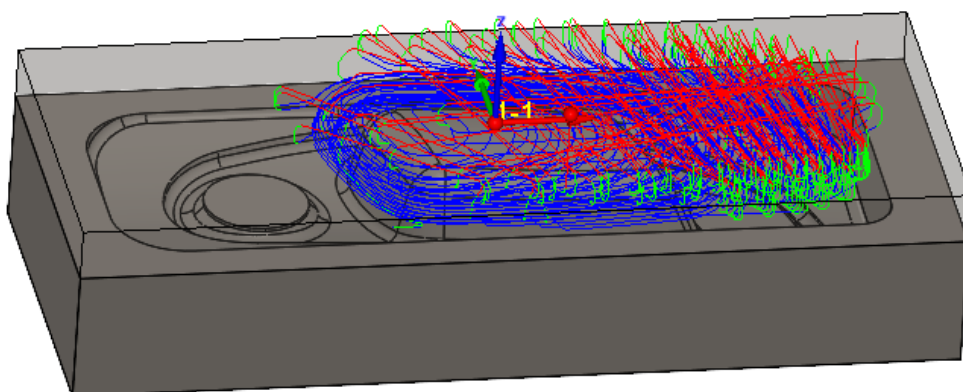


Obr. 64: Graf pro operaci Rovinná plocha. Foto autor.

Z grafu na obr. 64 je velmi dobře viditelné, jak jsou Eureka Chronos harmonizovány špičky řezných sil tím, jak je upravována posuvová rychlost, čímž je i následně docíleno změny množství odebraného materiálu za čas. Tato harmonizace je vyobrazena v červeném rámečku výše.

### 3.3.3.2 Optimalizace NC kódu – Tvarové plochy č.1

Procentuálně dosáhla tato operace nejvyšší úspory času ze všech operací u Dílu 2, a to 22,3% tedy 0:02:05 h:min:s, což je velice vysoká hodnota, která by už měla velký dopad nejen na sériovou či hromadnou výrobu. Takto vysoké snížení času obrábění je dáno zejména tím, že prostor pro optimalizaci posuvu je u této operace opravdu velký, a to zejména díky velkému počtu přejezdů.



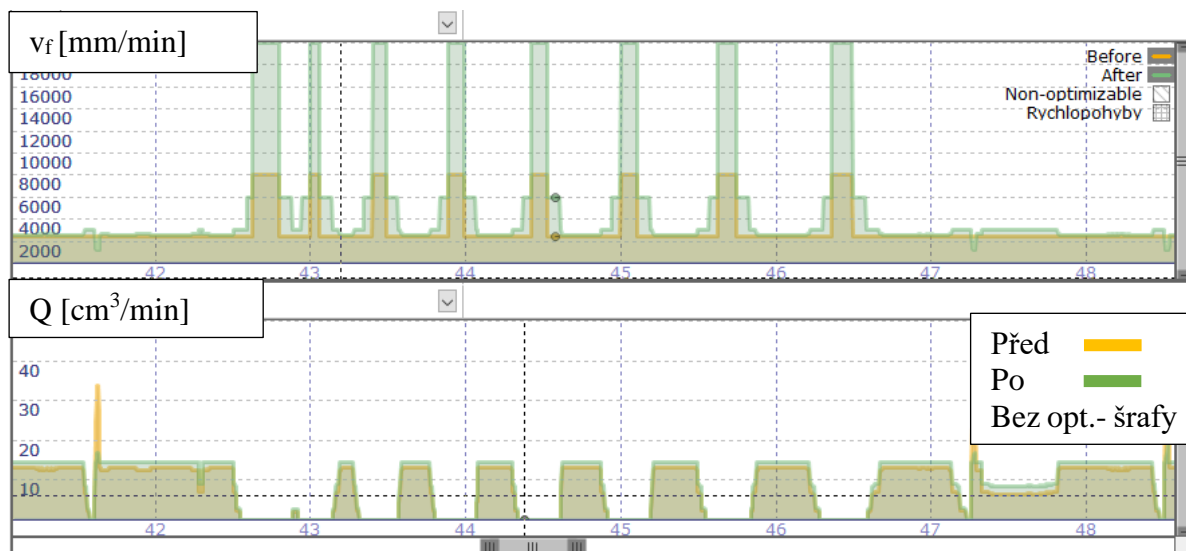
Obr. 65: Optimalizace – tvarové plochy č.1. Foto autor.

Použitý nástroj: FR-D16 Z4

Tab. 29: Nastavení performance indexu pro operaci Tvarové plochy č.1

Performance index	Čas obr. [h]:[min]:[s]	Úspora času [%] proti původnímu času 0:09:16 [h]:[min]:[s]
1	0:09:33	-3,2
2	0:08:09	12
3	0:07:11	22,3
4	0:06:33	29,3
5	0:06:25	30,6

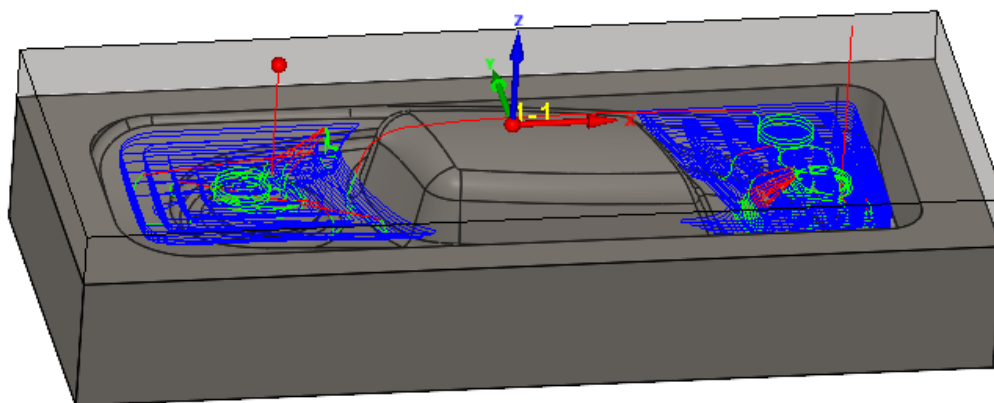
Stejně jako u minulé operace, i zde optimalizovaný program s performance indexem jedna zaznamenal zvýšení času obrábění. Pro tento případ pak platí to stejné, co bylo popsáno v předešlé podkapitole 3.3.3.1. Mezi výslednými hodnotami optimalizovaných NC programů jsou velké časové rozdíly, výjimkou je pak pouze rozdíl mezi nastavením performance indexem čtyři a pět.



Obr. 66: Graf pro operaci Tvarové plochy č.1. Foto autor.

### 3.3.3.3 Optimalizace NC kódu – Tvarové plochy č.2

U této operace byl využit stejný nástroj, a i řezné podmínky, liší se ale v tom, že je setup frézy do materiálu uskutečněn pomocí šroubovice, kde jsou hrubovány vnitřní tvarové plochy. U této operace došlo k nejnižší úspoře času ze všech operací u tohoto dílu. To je dáno zejména tím, že nástroj zajíždí do plného materiálu, není zde tedy tolika přejezdů mimo materiál jako u minulé operace a ani tolika nájezdů z vnějška obrobku jako u operace č. 1. I tak dosáhla optimalizace opět vysoké úspory času a to 14,9 % tedy 0:01:01 h:min:s.

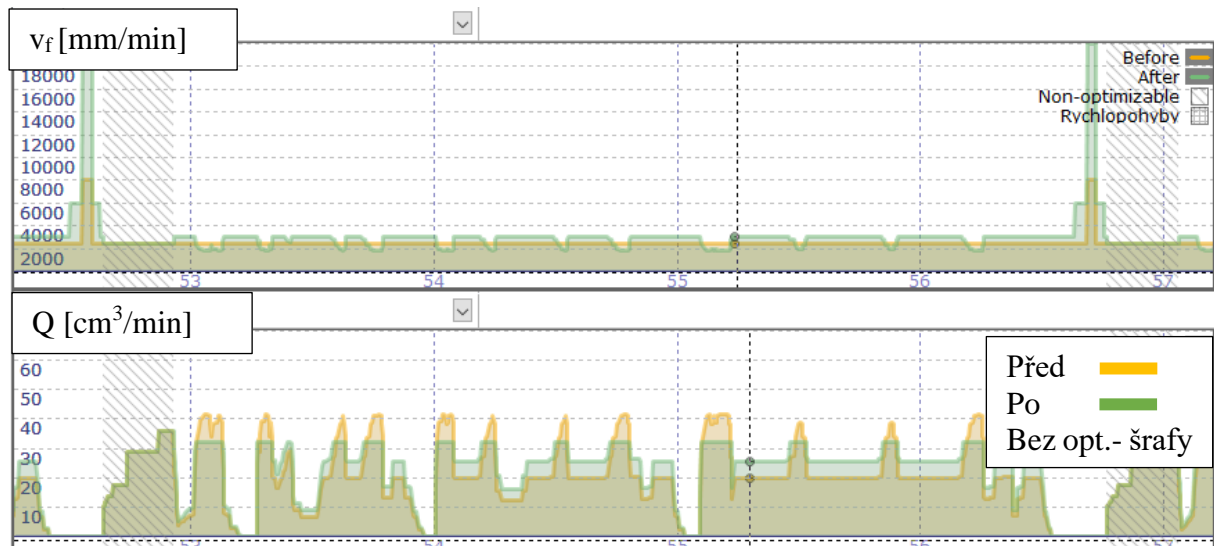


Obr. 67: Optimalizace - tvarové plochy č.2. Foto autor.

Použitý nástroj: FR-D16 Z4

Tab. 30: Nastavení performance indexu pro operaci Tvarové plochy č.2

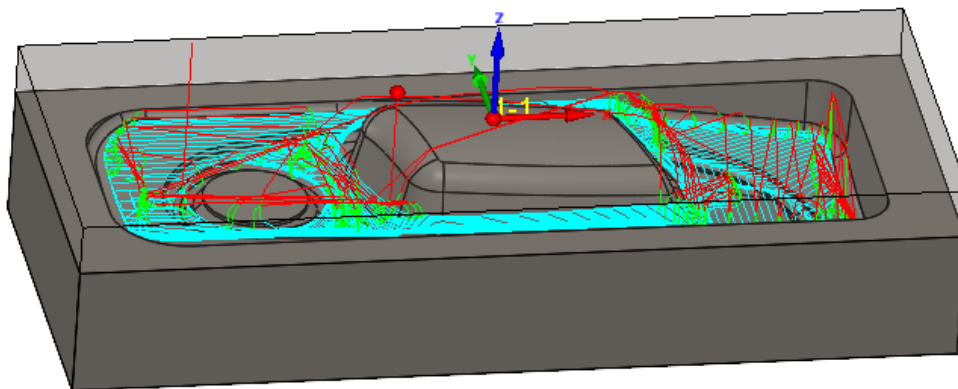
Performance index	čas obr. [h]:[min]:[s]	Úspora času [%] proti původnímu času 0:06:45 [h]:[min]:[s]
1	0:06:33	2,8
2	0:06:00	11
3	0:05:44	14,9
4	0:05:33	17,6
5	0:05:26	19,4



Obr. 68: Graf pro operaci Tvarové plochy č.2. Foto autor.

### 3.3.3.4 Optimalizace NC kódu – Tvarové plochy č.3

Tato operace se od předešlé liší v tom, že je již obráběn pouze zbytkový materiál v místech, kam se fréza většího průměru v minulé operaci nedostala. Je zde tedy velké množství řezných drah, které jsou většinou v záběru pouze krátkodobě. Je zde tedy relativně velký prostor pro optimalizaci míst kde nástroj jezdí mimo materiál. Úspora času u této 3D hrubovací operace dosáhla značné hodnoty a to 18,6 % tedy 0:01:27 h:min:s.

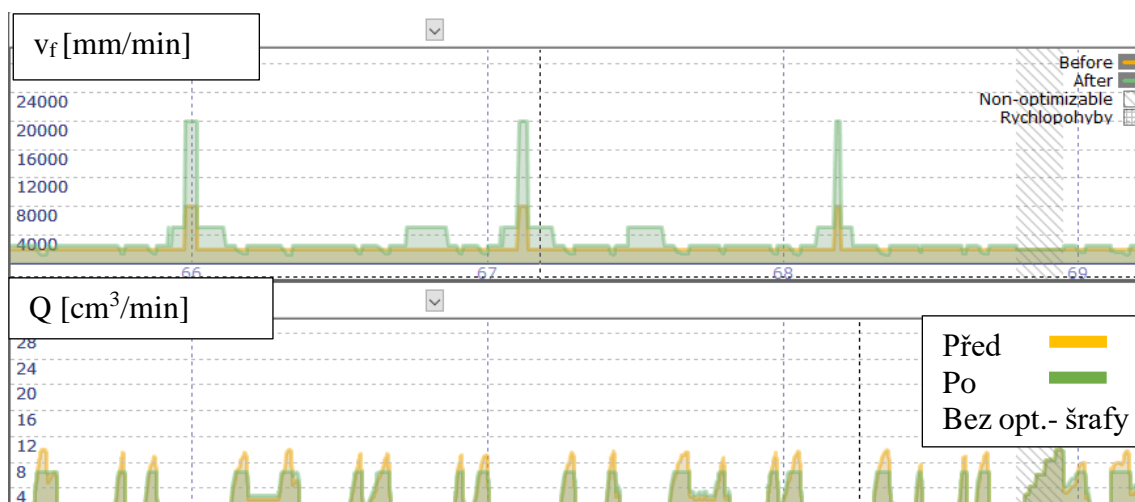


Obr. 69: Optimalizace - tvarové plochy č.3. Foto autor.

Použitý nástroj: FR-D10 Z4

Tab. 31: Nastavení performance indexu pro operaci Tvarové plochy č.3

Performance index	Čas obr. [h]:[min]:[s]	Úspora času [%] proti původnímu času 0:07:48 [h]:[min]:[s]
1	0:07:45	0,6
2	0:07:05	9,1
3	0:06:21	18,6
4	0:05:56	23,9
5	0:05:42	26,9



Obr. 70: Graf pro operaci Tvarové plochy č.3. Foto autor.

Z grafu je velmi dobře patrné, jak je fréza v záběru vždy jen po kratší dobu a ani neodebírá větší množství materiálu.

### 3.3.3.5 Optimalizace NC kódu –Shrnutí

Během optimalizace dle A.I. pro Díl 2 byla zjištěna následující fakta:

- Dle očekávání bylo u Dílu 2 dosaženo větší procentuální úspory času než u Dílu 1.
- Největší úspory času je dosaženo u 3D operací.
- I u tohoto dílu bylo potvrzeno, že optimalizace neprobíhá při sestupu nástroje po šroubovici, či v oblastech rychloposuvu.

### 3.3.4 Optimalizace NC kódu dílu 2 -User

Pro Díl 2 byl vytvořen ještě další program, který byl optimalizován dle uživatelských omezení. Tento způsob optimalizace již byl vysvětlen a popsán na Dílu 1 v kapitole 3.3.2. Na tomto dílu již tedy nebudou provedeny kontrolní výpočty z hlediska uživatelských omezení, neboť samotný výpočet by byl pro dané 3D obráběcí operace velice složitý. Výsledné úspory času jsou pro jednotlivé operace uvedeny v tabulce níže.

Tab. 31: Optimalizace Dílu 2 dle uživatelských omezení

Operace	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]
1.Rovinná plocha	0:6:17	0:5:00	0:1:17	20,5
2. Tvarová plocha č.1	0:9:16	0:6:57	0:2:19	25
2. Tvarová plocha č.2	0:6:45	0:5:37	0:1:08	16,7
2. Tvarová plocha č.3	0:7:48	0:5:53	0:1:55	24,6
Čas celkem	0:30:07	0:23:28	<b>0:6:39</b>	<b>22,1</b>

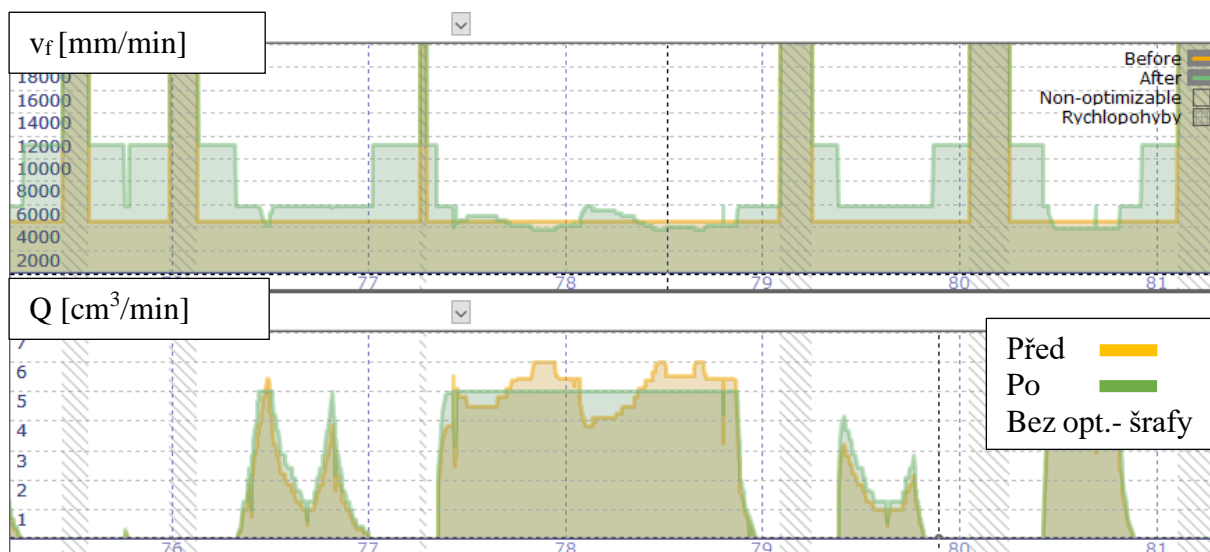


### 3.3.4.1 Optimalizace NC kódu dle krouticího momentu – Rovinná plocha

Pro první operaci byla zvolena optimalizace dle krouticího momentu, a to z důvodu toho, že je tento typ optimalizace vhodný pro hrubovací operace. Také u této operace vzniká největší krouticí moment ze všech operací, to je zejména dáno tím, že k obrábění je využita fréza o průměru 32 mm s VBD, a během obrábění hodnota  $a_e$  dosahuje hodnot kolem 75 % průměru nástroje. Pro optimalizaci dle krouticího momentu  $M$  pak byly zvoleny následující podmínky.

Použitý nástroj: Fr D32 r2 L9 z5 (Safety)

Obr. 71: Podmínky optimalizace. Foto autor.



Obr. 72: Graf pro opt. dle krouticího momentu. Foto autor.

V tabulce níže je pak uvedena celková úspora času oproti neoptimalizovanému programu, jenž činí 20,5 %

Tab. 32: Shrnutí optimalizace

Uživatelské omezení	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]	Úspora času [h]:[min]:[s]
<b>Krouticí moment</b>	0:06:17	0:05:00	20,5	0:01:17

### 3.3.4.2 Optimalizace NC kódu del tloušťky třísky $h_m$ – Tvarová plocha č.1

U druhé operace byla zvolena optimalizace dle tloušťky třísky. Jedním z důvodů, proč byla vybrána tato varianta optimalizace je, že nastavení tohoto parametru velice ovlivňuje životnost nástroje. Cílem je tedy zajistit, aby nástroj směřoval k hodnotě optimalizované tloušťce třísky  $h_{m\_omez} = 0,05$  mm a dosáhl maximálně dlouhé životnosti. Dalším důvodem pak bylo to, že pro optimalizaci, kde není odebráno větší množství materiálu je tato metoda vhodnější než například optimalizace dle výkonu či krouticího momentu, které jsou vhodné spíše pro hrubovací operace, u kterých je zapotřebí co nejvíce využít výkon obráběcího stroje. Pro optimalizaci pak byly zvoleny následující parametry.

Použitý nástroj: FR-D16 Z4

Mode	User	$h_m$ [mm]	0.05
Fmax in air / Fprogrammed	2.5	<input type="checkbox"/> Max feed in air (mm/min):	40000
Fmax / Fprogrammed	1.3	<input type="checkbox"/> Max feed in cut (mm/min):	20000
Fmin / Fprogrammed	0.5		

Obr. 73 Podmínky optimalizace. Foto autor.



Obr. 74: Graf pro opt. dle tloušťky třísky. Foto autor.

Neoptimalizovanými částmi programu jsou opět úseky kde nástroj sestupuje do materiálu pomocí šroubovice. Pomocí této optimalizace bylo dosaženo nejvyššího snížení času obrábění. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. níže.

Tab. 33: Shrnutí optimalizace

Uživatelské omezení	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]	Úspora času [h]:[min]:[s]
Tloušťka třísky	0:09:16	0:06:57	25	0:02:19

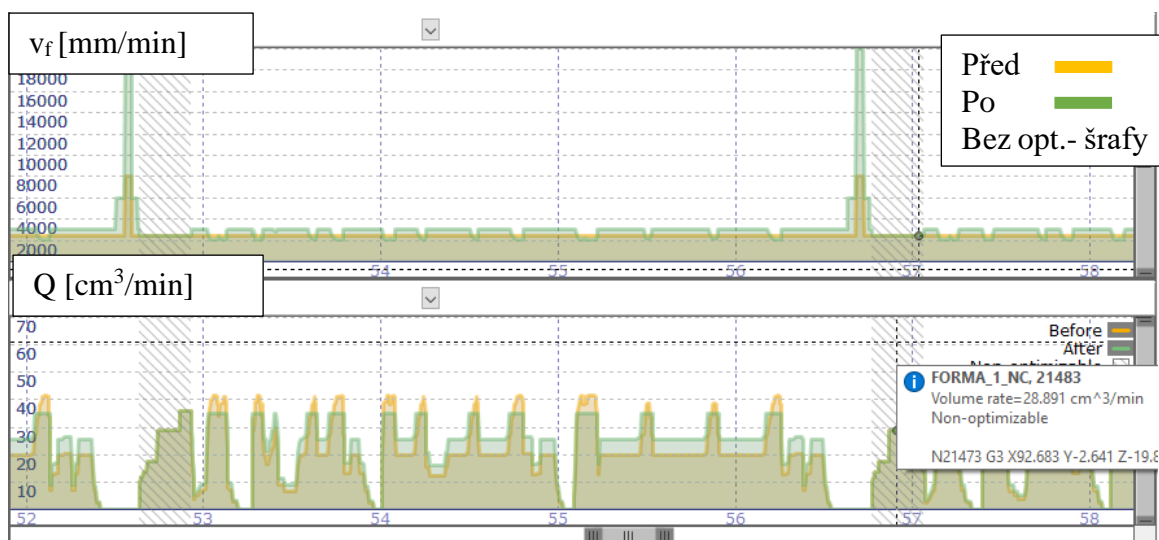
### 3.3.4.3 Optimalizace NC kódu dle objemu odebraného materiálu za čas Q – Tvarová plocha č.2

U této operace je sestup frézy do materiálu uskutečněn pomocí šroubovice. Optimalizace dle množství odebraného materiálu za čas byla zvolena z důvodu, že je u této operace odebírán větší objem materiálu. Optimalizace byla provedena dle následujících podmínek

Použitý nástroj: FR-D16 Z4

Mode	User	Q [cm <sup>3</sup> /min]	35
Fmax in air / Fprogrammed	2.5	<input type="checkbox"/> Max feed in air (mm/min):	40000
Fmax / Fprogrammed	1.3	<input type="checkbox"/> Max feed in cut (mm/min):	20000
Fmin / Fprogrammed	0.5		

Obr. 75 Podmínky optimalizace. Foto autor.



Obr. 76: Graf pro opt. dle objemu odebraného materiálu. Foto autor.

Co se týče neoptimalizovaných úseků NC programu, jenž jsou zobrazeny na obr. výše, tak se jedná opět a sestupy šroubovicí. U této operace bylo dosaženo nejvyšší úspory času, i přesto dosáhla vysoké hodnoty úspory a to 16,7 %.

Tab. 34: Shrnutí optimalizace

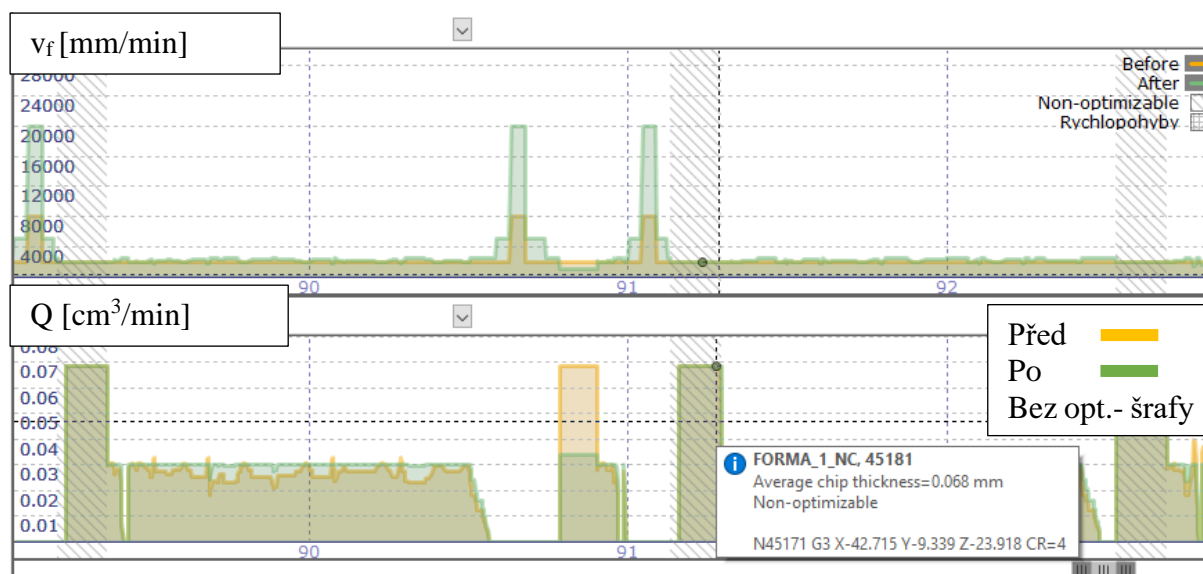
Uživatelské omezení	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]	Úspora času [h]:[min]:[s]
<b>Objem odebraného materiálu za čas</b>	0:06:45	0:05:37	16,7	0:01:08

### 3.3.4.4 Optimalizace NC dle tloušťky třísky $h_m$ – Tvarová plocha č.3

Pro tuto operaci byla opět zvolena optimalizace pomocí tloušťky třísky, a to ze stejných důvodů jako tomu bylo v kapitole 3.3.4.2.

Použitý nástroj: FR-D10 Z4

Obr. 77: Podmínky optimalizace. Foto autor.



Obr. 78: Graf pro opt. dle tloušťky třísky

Tab. 35: Shrnutí optimalizace

Uživatelské omezení	Čas před opt. [h]:[min]:[s]	Optimalizovaný čas [h]:[min]:[s]	Úspora (%)	Úspora [h]:[min]:[s]
Tloušťka třísky	0:07:48	0:05:53	24,6	0:01:55

Během optimalizace Dílu 2 dle uživatelem zadaných omezení nebyly již zjištěny žádné nové informace jen bylo potvrzeno že:

- Eureka neoptimalizuje sestupy po šroubovici,
- pořadí operací vzhledem k úspoře času souhlasí s pořadím operací u optimalizace A.I.

### 3.4 Výroba vybraných dílů

Díly 1 a 2 byly vyrobeny vícekrát, a to pomocí neoptimalizovaných a optimalizovaných programů dle A.I.. Jednotlivé programy byly popsány v kapitolách 3.2 a 3.3, a to včetně režných podmínek a použitých nástrojů. Výroba proběhne na multifunkční 5osé frézce MCU450 V[T]-5X Kovosvit Mas ve výrobní hale KTO na ZČU. Základní parametry stroje:

- X / Y / Z - 500/800/520 mm,
- Velikost upínací plochy stolu: 500 mm,
- Max. otáčky vřetene: 12 000/18 000/24 000 [ot/min]
- Modulární zásobník nástrojů
- Řídicí systém SIEMENS / HEIDENHAIN
- Litinový základ stroje
- Statická a dynamická tuhost na úrovni strojů s horním gantry [36]



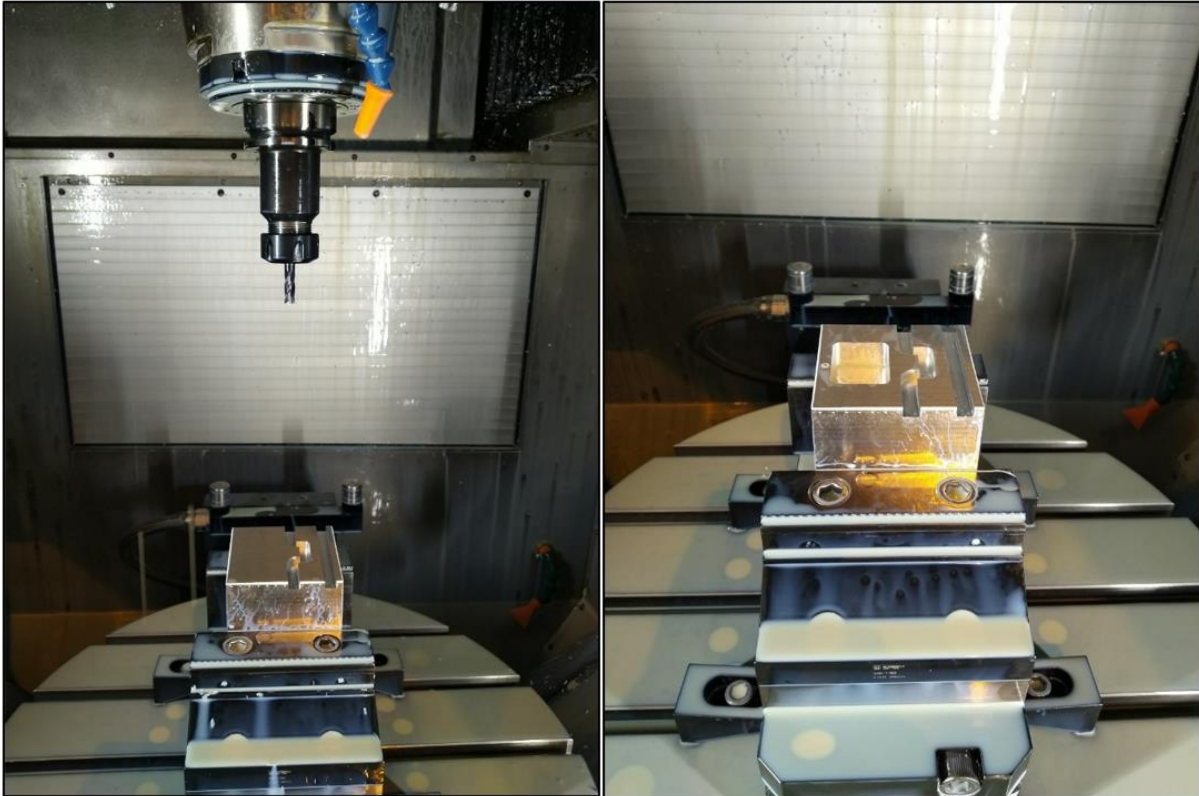
**Obr. 79: MCU450 V[T]-5X Kovosvit Mas**

Jednotlivé fáze experimentu jsou následující:

- 1) Fáze přípravy
  - Příprava nástrojů pro jednotlivé programy,
  - příprava polotovaru,
  - upnutí polotovaru do svěráku,
  - vygenerování NC programů do daného stroje,
  - naměření nulového bodu.
- 2) Fáze výroby
  - Příprava stopek na měření času,
  - spuštění obrábění,
  - sledování výrobního procesu, zda není doprovázen nežádoucími jevy,
  - konec programu,
  - zaznamenání výrobního času.
- 3) Vyhodnocení
  - Srovnání výrobních časů mezi optimalizovanými a neoptimalizovanými programy,
  - porovnání kvality obroběných povrchů,
  - popsání případných nežádoucích jevů během procesu výroby,
  - závěrečné vyhodnocení.

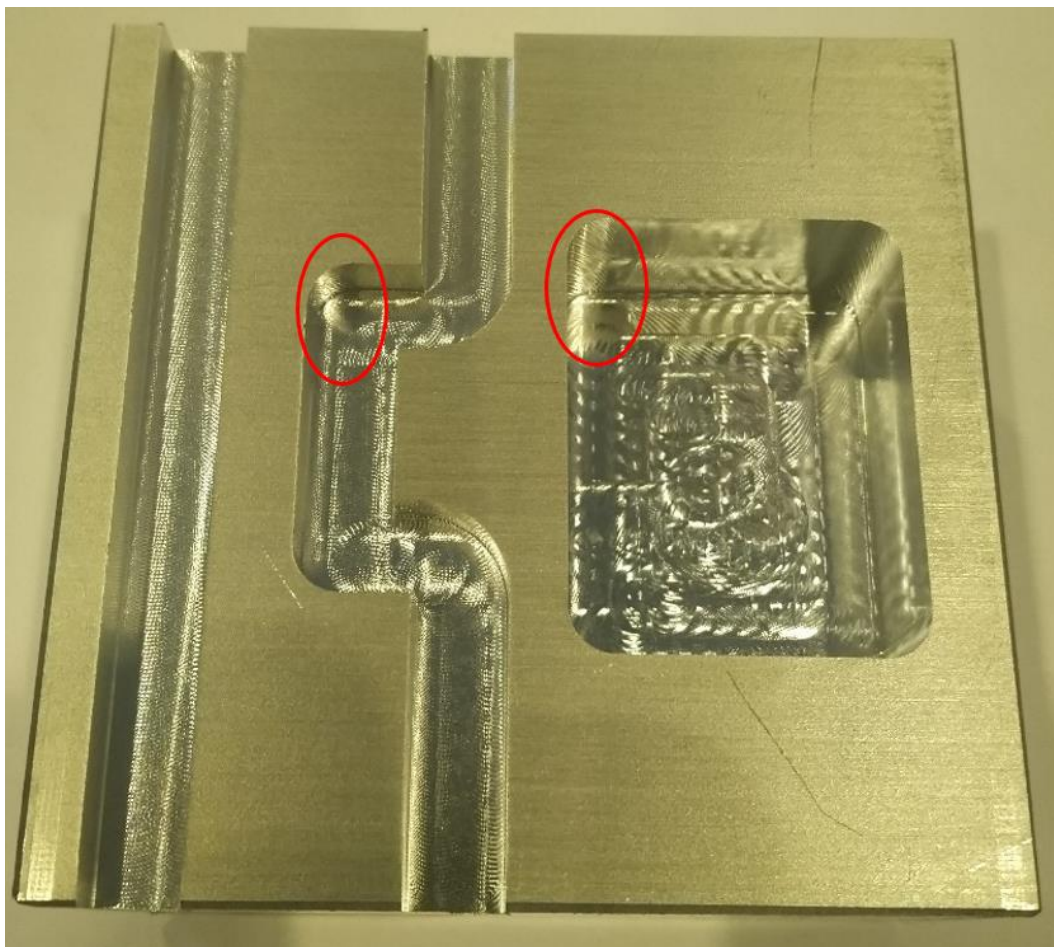
### 3.4.1 Výroba Dílu 1 – Neoptimalizovaný NC kód

Jako první byl vyroben Díl 1 dle neoptimalizovaného NC kódu. Oproti původní verzi programu, jež byla popsána v kapitole 3.2 byl Díl 1 obroben bez operace díra průměru 12 mm, a to z toho důvodu, že u této operace neproběhla téměř žádná optimalizace posuvu. Výroba by tedy nepřinesla žádné potřebné informace. Jako první byly obrobena obě drážky. Následně pak byla obrobena kapsa s přídávkem 0,3 mm, která byla posléze obrobena na čisto. Průběh výroby je pak zobrazen na obr. níže.



Obr. 80: Průběh obrábění. Foto autor.

Během výroby byly zaznamenávány výrobní časy jednotlivých operací. Ty byly měřeny bez přejezdů mezi jednotlivými operacemi, tím byl získán vždy čistý čas obrábění pro danou operaci. Po obrobění všech operací byl díl vyjmut a zkontrolován. Zejména pak v oblastech rádií, které oproti ostatním oblastem dosáhli výrazně horší kvality povrchu viz obr. 81. Ta byla ovšem očekávána, neboť k obrobění rádia R4 byla použita fréza průměru 8 mm. Došlo zde tedy ke skokovému nárůstu opásání nástroje, které bylo během výroby doprovázeno nepříjemnou zvukovou emisí.



Obr. 81 Kvalita obrobených rádií

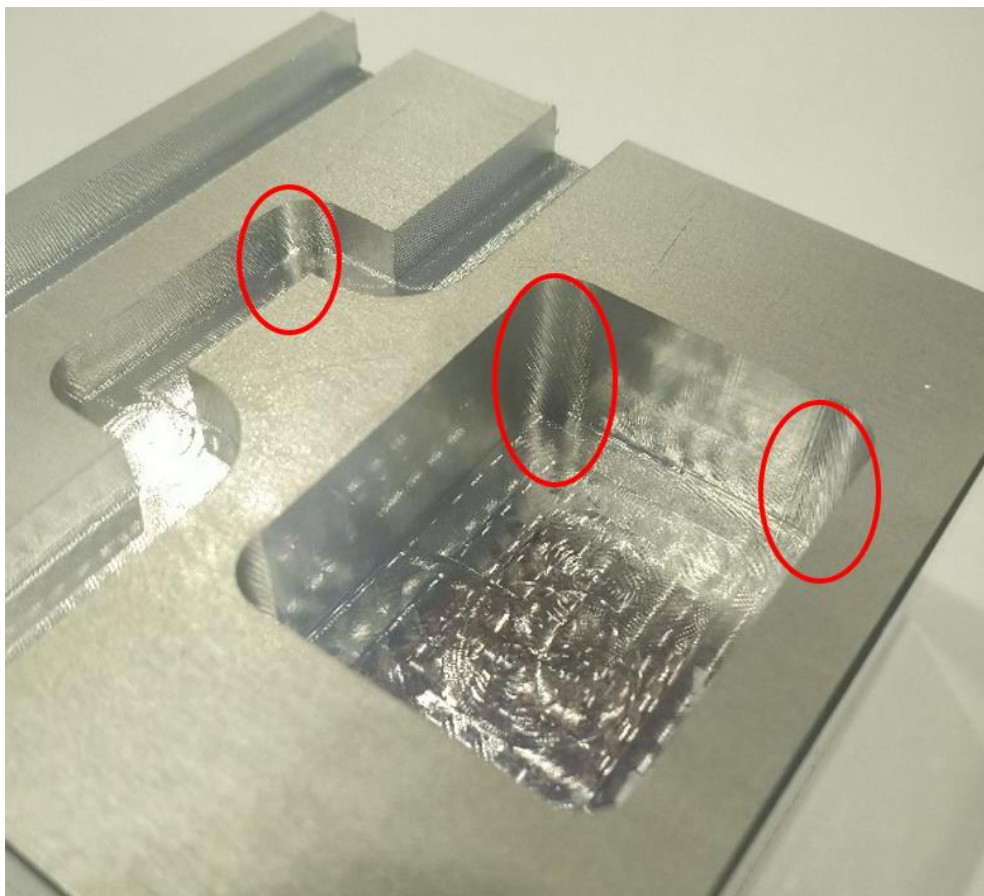
Výsledné časy obrábění pro jednotlivé operace jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 36: Časy výroby

Operace	Očekávaný čas obrábění [h]:[min]:[s]	Skutečný čas obrábění [h]:[min]:[s]
Drážka 1	0:0:09.2	0:0:8.2
Drážka 2	0:0:11.29	0:0:9.34
Kapsa	0:1:26	0:1:38.2
Finiš kapsy	0:0:14.63	0:0:12.78
<b>čas celkem</b>	<b>0:2:01.12</b>	<b>02:08.5</b>

### 3.4.2 Výroba Dílu 1 – Optimalizovaný NC kód dle A.I.

Pomocí optimalizovaného NC kódu byl následně Díl 1 obroběn znovu, přičemž výsledný čas a kvalita obrobených ploch bude porovnána s předešlým dílem, jenž byl obroběn bez optimalizovaného NC kódu. Během obrábění nebyly zaznamenány žádné výrazné rozdíly, co se týče zvukového doprovodu, a to i v místech rádií kde nástroj při dokončovací operaci Kapsa zpomalil až na 0,1 hodnoty původní posuvové rychlosti. Po obrobění byl díl vyjmut ze svěraku a opět pozorně prověřen, přičemž kvalita ploch zhruba odpovídala předešlé operaci s neoptimalizovaným NC kódem, oblasti rádií jsou pak vyznačeny na obr níže.



Obr. 82 Kvalita obrobených rádií. Foto autor.

Výsledné hodnoty obrábění jsou zaznamenány v tabulce níže.

Tab. 37: Časy výroby

Operace	Očekávaný čas výroby po optimalizaci [h]:[min]:[s]	Čas obrábění bez optimalizace [h]:[min]:[s]	Čas obrábění po optimalizaci [h]:[min]:[s]	Časový rozdíl ve výrobě [h]:[min]:[s]
1.Drážka 1	0:0:09.71	0:0:8.2	0:0:8.1	0:0:0.1
2.Drážka 2	0:0:11.04	0:0:9.34	0:0:10.39	-0:0:1.05
3.Kapsa hrubování	0:1:13.0	0:1:38.2	0:1:53.3	-0:0:15.1
4.Kapsa na čisto	0:0:15.09	0:0:12.78	0:0:13.91	-0:0:1.13
Celkový čas	0:1:58.84	0:2:08.5	0:2:25.7	-0:0:17.2

Jelikož měření probíhalo pomocí stopek, tak je třeba brát v potaz jistou nepřesnost z hlediska naměřeného času a to  $\pm 0,5$  s. Vyjma operace Drážka 1 byly všechny naměřené časy výroby vyšší u optimalizovaných NC programů než u neoptimalizovaných NC programů. Celkově pak doba výroby trvala u všech operací déle, než bylo uvedeno v Eureka Chronos. U operace č.2 byla očekávaná úspora času zhruba 0.25 s, výsledná hodnota měření však ukázala, že doba obrábění se nezkrátila, jak se očekávalo, ale zdelšíla a to o 1.05 s tedy 11,24 %. U operace č.3 již nastal ztelně větší časový rozdíl. Očekávaný čas výroby neoptimalizovaného NC kódu měl být dle Eureka Chronos 0:1:13 h:min:s, ale skutečná doba výroby pro neoptimalizovaný NC kód dosáhla hodnoty 0:1:38.2 h:min:s a pro optimalizovaný dokonce 0:1:53.3 h:min:s. Obdobný jev byl zaznamenán i u následující operace č.4.



Toto prodloužení času je způsoben tím, že stroj nezvládá plynulý chod v místech, kde je dráha nástroje interpolovaná na malé úseky s ostrými přechody. Tento fakt může mít za následek „trhavý“ pohyb během obrábění. Pro optimální chod optimalizačního softwaru by však byl potřeba speciálně upravený postprocesor přímo pro Eureka Chronos. To však nebylo z finančních ani časových důvodů možné.

Celkově lze tedy říci, že nebyla splněna očekávání jak z hlediska úspory času, tak z hlediska očekávaného zlepšení kvality povrchu v oblasti rádií. Z toho důvodu, bude operace kapsa obrobena ještě jednou s větším rádiem R5, aby bylo zjištěno, zda optimalizace posuvu proběhne jinak, když poloměr nástroje nebude roven poloměru rohu.

### 3.4.3 Výroba upravené operace Kapsa - R5

Jak již bylo zjištěno v minulé kapitole, tak rozdíl v kvalitě obrobeneho povrchu v oblasti rádií byl mezi optimalizovaným a neoptimalizovaným NC programem minimální, proto bylo během experimentu rozhodnuto, že operace kapsa a finiš kapsy budou obrobena ještě jednou s tím, že hodnota rádií bude změněna z R4 na R5, tato změna by měla mít za následek lepší kvalitu obrobeneho povrchu v oblasti rádií, a to z důvodu toho, že fréza bude mít menší hodnotu opásání v této oblasti než u R4. Bude také sledován rozdíl z hlediska optimalizovaných drah.

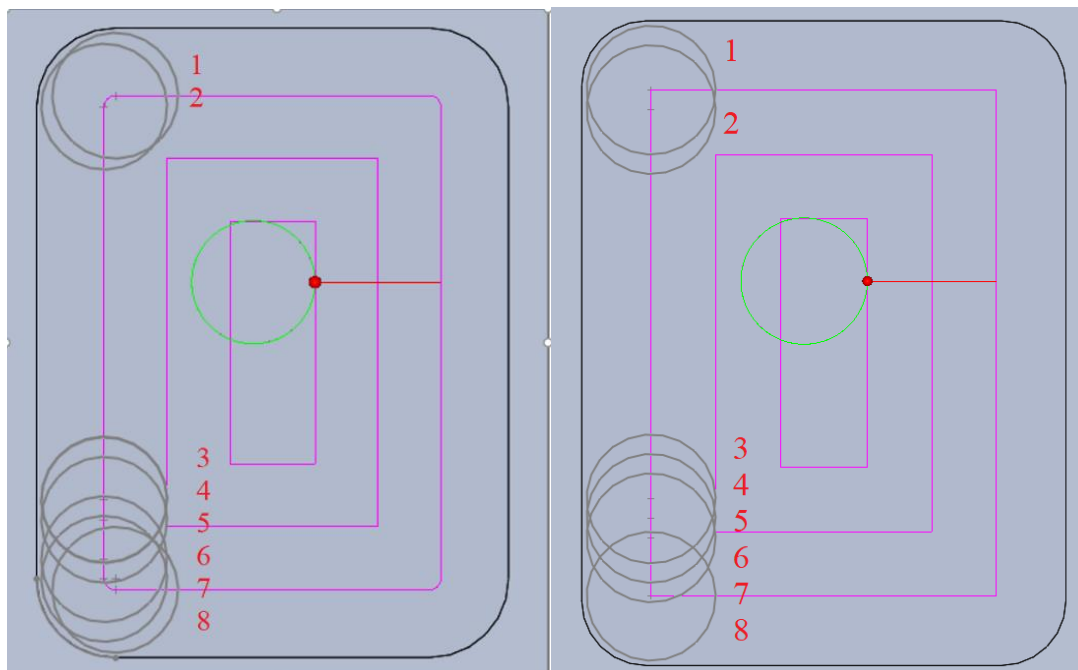
V tabulkách níže jsou vypsány souřadnice řezného nástroje i hodnoty posuvové rychlosti po optimalizaci pro operace kapsa R4 a kapsa R5. Ze souřadnice na obr.83 je zřejmé, že souřadnice, ve kterých proběhla optimalizace se příliš neliší.

Tab. 38: Pozice frézy v oblasti rádií R5

Pozice nástroje R5	Souřadnice os			Optimalizovaný posuv [mm/min]	Vzdálenost před rádiem v ose y [mm]
	X	Y	Z		
1	-28	15,7	-2	1542	31,4
2	-28,7	-15	-2	2674	30
3	-28,7	-10	-2	2674	5
4	-28,7	-11,25	-2	2123	3,75
5	-28,7	-12,5	-2	1782	2,5
6	-28,7	-13,75	-2	1605	1,25
7	-28,7	-15	-2	1542	0
8	-28	-15,7	-2	2674	-

Tab. 39: Pozice frézy v oblasti rádií R4

Pozice nástroje R4	Souřadnice os			Optimalizovaný posuv [mm/min]	Vzdálenost před rádiem v ose y [mm]
	X	Y	Z		
1	-28,7	15,7	-2	1545	31,4
2	-28,7	14,492	-2	2674	30,192
3	-28,7	-9,662	-2	2674	6,038
4	-28,7	-10,869	-2	2128	4,831
5	-28,7	-12,077	-2	1938	3,623
6	-28,7	-13,285	-2	1786	2,415
7	-28,7	-14,492	-2	1609	1,208
8	-28,7	-15,7	-2	1545	0



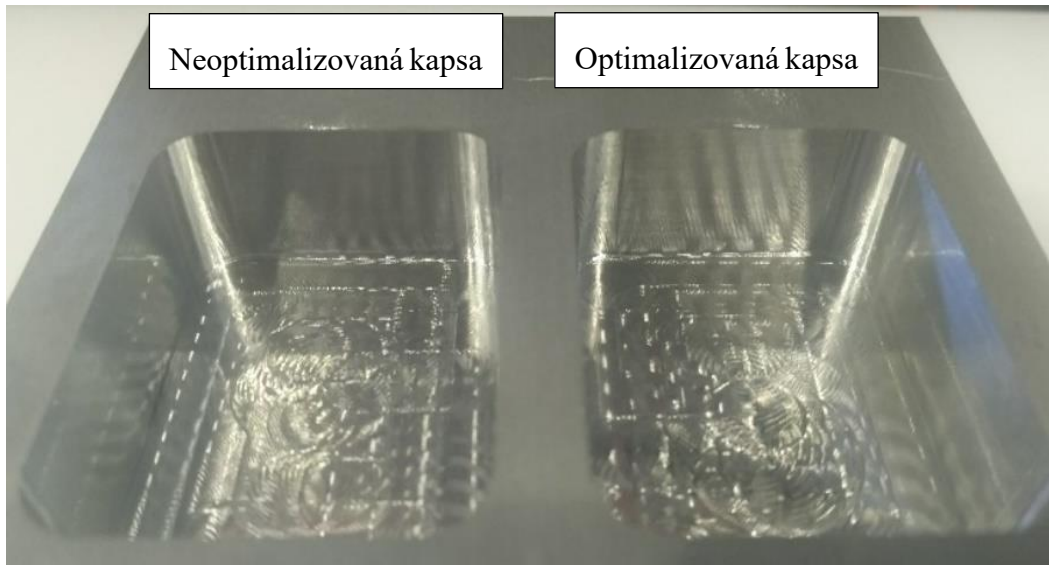
Obr. 83: Pozice fréz v rádiích R5 a R4. Foto autor.

Po úpravě modelu, byl neoptimalizovaný a optimalizovaný NC program znovu vygenerován a nahrán do obráběcího stroje. Během obrábění optimalizovaného i neoptimalizovaného programu bylo znát, že zvukový doprovod již nevydává tak „nepříjemné“ zvukové emise v oblasti rádií tak jako tomu bylo u kapsy s R4, a to jak při hrubování kapsy, tak při jejím dokončování. Opera hrubování kapsy byla opět významně déle obráběna, než bylo uvedeno v Eureka Chronos.

Tab. 40: Časy výroby

Operace	Čas výroby bez optimalizace [h]:[min]:[s]	Čas výroby s optimalizací [h]:[min]:[s]
Kapsa hrubování	0:1:40.2	0:1:52.0
Kapsa na čisto	0:0:12.89	0:0:12.41

Po podrobné přezkoumání obrobeneho povrchu bylo znát, že oproti kapse s R4, zde nastalo velké zlepšení. Avšak rozdíl z pohledu kvality obrobenech ploch mezi optimalizovaným a neoptimalizovaným NC kódem byl minimální, naopak po podrobném porovnání se jevil povrch neoptimalizované operace jako nepatrně lepší. Obě varianty kapsy R5 jsou zobrazeny na obr.84. Levá kapsa je vyrobena bez optimalizace a pravá s optimalizovaným programem. Delší doba výroby a nepatrně horší kvalita obrobenech ploch u vyrobeného dílu s optimalizovaným NC programem je způsobena již zmíněným neodladěným postprocesorem pro Eureka Chronos.

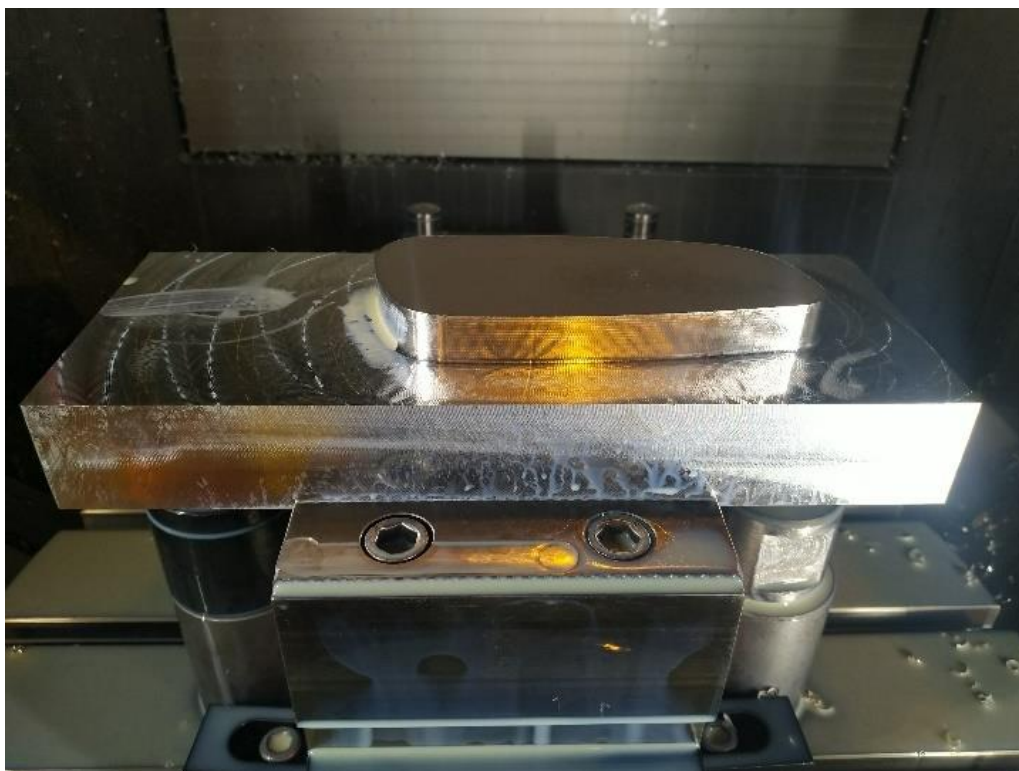


Obr. 84: Neoptimalizovaná vs optimalizovaná kapsa. Foto autor.

### 3.4.4 Výroba Dílu 2 – Neoptimalizovaný NC kód

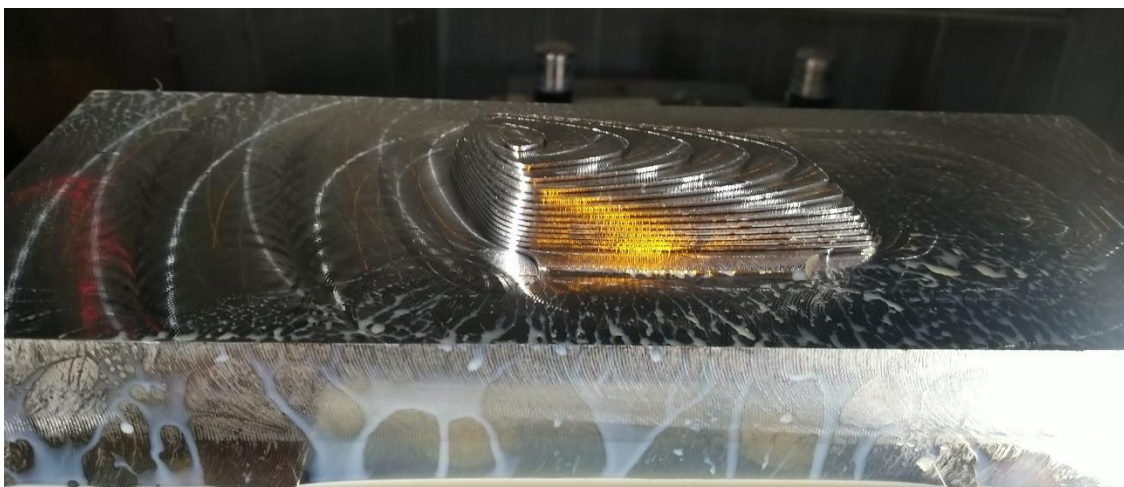
Vzhledem k průběhu experimentu, bylo rozhodnuto, že u Dílu dva budou obrobena pouze dvě první operace, a to z toho důvodu, že operace č.3 a č.4 by již nepřispěly žádnými novými poznatky, neboť k získání potřebných informací postačí výroba operací č.1 a č.2, ke kterým budou přidány poznatky zjištěné při výrobě Dílu 1.

Postup výroby je stejný jako u minulé operace. Během obrábění bylo opět zřejmé, že posuvy stroje nejsou vlivem interpolování dráhy na malé úseky plynulé. Tento problém byl doprovázen znatelnými vibracemi. Výsledný obrobený povrch pro operaci č.1 je zobrazen na obr. níže.



Obr. 85: Postup výroby. Foto autor.

Poté následovalo obrobení tvarových ploch, jenž je v NC kódu zastoupeno vysokým počtem řádků. Tento fakt opět vedl k tomu, že stroj působil „sekavým“ dojmem a vydával silné vibrace, které byly znatelně silnější než u předešlé operace. Což bylo spojené s neodladěným postprocesorem.



Obr. 86: Postup výroby. Foto autor.

Během obrábění pak byly pro daný díl zaznamenány časy jednotlivých operací, přičemž výsledný čas byl opět mnohonásobně delší, než bylo uvedeno v Eurece Chronos. U operace tvarové plochy byla doba obrábění více jak dvojnásobná oproti očekávání viz tab. s časy obrábění níže.

Operace	Předpokládaný čas výroby [h]:[min]:[s]	Skutečný čas výroby [h]:[min]:[s]
1. Rovinná plocha	0:6:17	0:9:48
2. Tvarové plochy č.1	0:9:16	0:21:14

Tab. 41: Časy výroby. Foto autor.

Během obrábění dílu dva se potvrdilo, že problém z hlediska času, je stupňován s tvarovou složitostí operace. Bylo tedy rozhodnuto že pro obrobení Dílu 2 pomocí optimalizovaného NC kódu bude do programu přidán cyklus CYCLE832(0.01,\_ORI\_FINISH, 0.01). Tento cyklus by měl zapříčinit plynulejší chod stroje, což by pak mělo za následek snížení času obrábění, zlepšení kvality obroběných ploch a také částečnou eliminaci vibrací.

### 3.4.5 Výroba Dílu 2 – Optimalizovaný NC kód

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole tak do vygenerovaného NC programu byl přidán cyklus CYCLE832(0.01,\_ORI\_FINISH, 0.01). Po spuštění výroby, bylo zřejmé znatelné snížení vibrací a též bylo lidským okem viditelné, že stroj již přecházel plynuleji z jednotlivých souřadnic na další bez časových prodlev, které způsobovaly dojem „sekavého“ pohybu.



Obr. 87: Obrobený Díl 2

Použitím daného cyklu byl tedy z velké části odstraněn problém s neplynulým chodem stroje, který byl způsobený neodladěným postprocesorem. Z výsledných časů, je však stále zřejmé, že oproti původním předpokladům trvaly časy obráběcích operací o něco déle.

Tab. 42: Časy výroby

Operace	Předpokládaný čas výroby [h]:[min]:[s]	Skutečný čas výroby [h]:[min]:[s]
1. Rovinná plocha	0:5:15	0:7:56
2. Tvarové plochy č.1	0:7:11	0:9:44

Z porovnání výroby mezi neoptimalizovaným NC kódem a optimalizovaným NC kódem s cyklem bylo zjištěno, že u operace číslo jedna došlo k snížení výrobního času o 19,05 % a u druhé operace dokonce o 54,16 % času, což je velice znatelný rozdíl. U obou operací pak během obrábění pomocí optimalizovaného NC kódu zmizely silné vibrace.

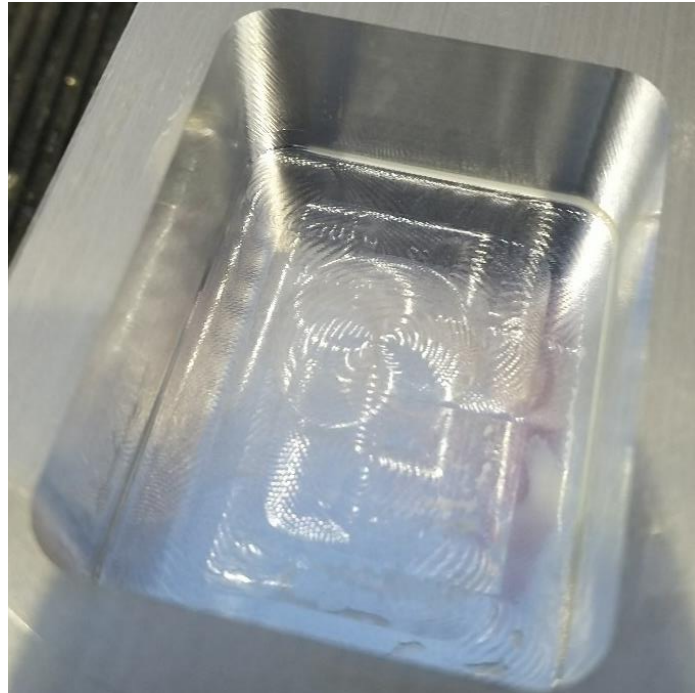
Tab. 43: Časy výroby

Operace	Předpokládaný čas výroby		Čas výroby		Rozdíl ve výrobě	
	Neopt. NC kód [h]:[min]:[s]	Opt. NC kód [h]:[min]:[s]	Bez opt. [h]:[min]:[s]	Opt. s cyklem [h]:[min]:[s]	[h]:[min]:[s]	[%]
1. Rovinná plocha	0:06:17	0:05:15	0:09:48	0:07:56	0:01:52	19,05
2. Tvarové plochy č.1	0:09:16	0:07:11	0:21:14	0:09:44	0:11:30	54,16

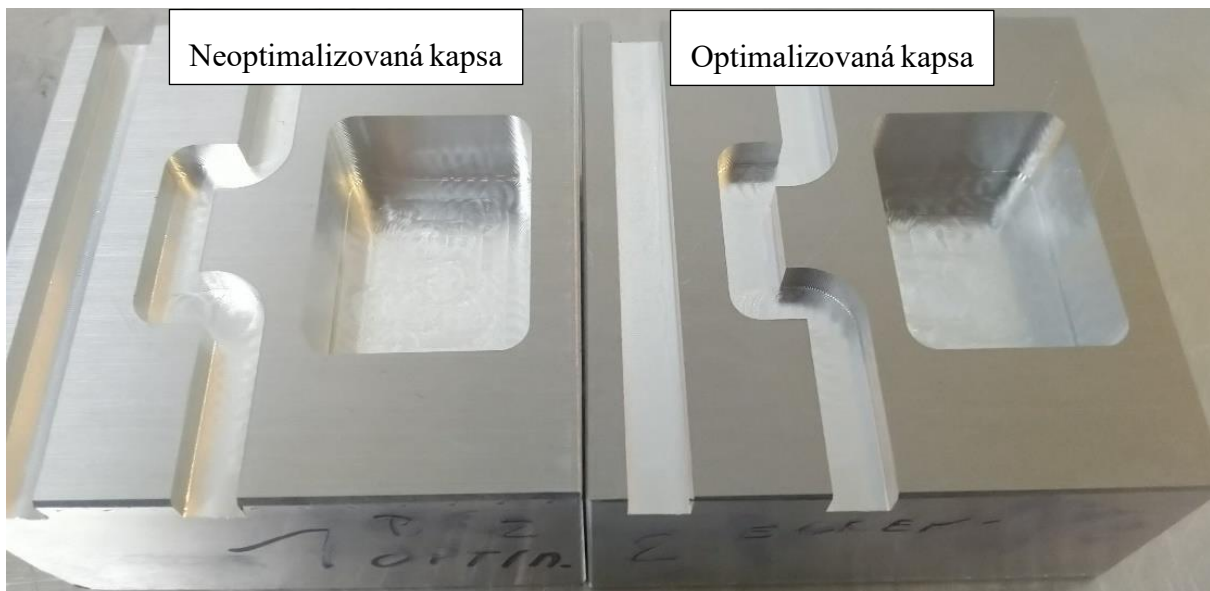
Poté co byl do NC programu přidán cyklus CYCLE832(0.01,\_ORI\_FINISH, 0.01), došlo k znatelnému zlepšení z hlediska plynulosti chodu stroje. Lze tedy říci, že tento cyklus částečně eliminoval problémy s neodladěným postprocesorem. Pro získání relevantnějších výsledků, by bylo ovšem třeba celý experiment zopakovat s tímto cyklem. Z časových možností, však bylo možné vyrobít už pouze jednu operaci. Pro opětovnou výrobu pak byla zvolena operace Kapsa u Dílu 1.

### 3.4.6 Výroba upraveného Dílu 1 R4 kapsa s cyklem

Výroba s použitím cyklu byla opět znatelněji plynulejší oproti předešlým obráběním operace Kapsa. Výsledná kvalita ploch pak byla nepatrně lepší než u předešlých vyrobených kapes za využití různých programů. Rozdíl pak lze sledovat na obr. níže. Ovšem fotografie nedokázala viditelný rozdíl příliš dobře zaznamenat.



Obr. 88: Kapsa vyrobená pomocí optimalizovaného programu s cyklem



Obr. 89 Obrobené Díly 1

Co se týče výrobních časů, tak i zde došlo k urychlení výroby oproti optimalizovanému NC kódu bez cyklu. Ovšem nejrychleji proběhla výroba pomocí NC kódu, jenž nebyl optimalizován v Eureka Chronos. To je způsobeno již několikrát zmíněným neodladěným postprocesorem. Je nutné brát v potaz i to, že stejně odladěný a optimalizovaný NC kód bude

obráběn na různých strojích odlišně. To je dáno odlišnou kinematikou stroje. Výsledné časy obrábění pro operaci Kapsa R4 jsou zapsány v tabulce níže.

Tab. 43: Časy výroby

Operace	Čas obrábění bez opt. [h]:[min]:[s]	Čas obrábění po opt. [h]:[min]:[s]	Čas obr. po opt. s cyklem [h]:[min]:[s]
1. Kapsa hrubování	0:1:38.2	0:1:53,3	0:1:40.58
2. Kapsa na čisto	0:0:12.78	0:0:13.91	0:0:13.86

Celkově byl tedy problém že při výrobě daných dílů, nebyl postprocessor odladěn přímo pro Eureka Chronos. To mělo za následek prodloužené časy výroby a silné vibrace během obrábění. Přidaný cyklus CYCLE832(0.01,\_ORI\_FINISH, 0.01) pak tento problém částečně eliminoval.

### 3.5 Shrnutí procesu softwarové optimalizace

Pomocí softwaru Eureka Chronos byla provedena optimalizace posuvu pro dva vybrané díly, a to jak pomocí umělé inteligence A.I. tak skrze uživatelem zadaných omezení. Tyto procesy jednotlivých optimalizací byly podrobně popsány a zaznamenány v kapitolách 3.3, přičemž během procesu optimalizace bylo zjištěno několik problémů a nejasností:

- Neshoda času simulací,
- neoptimalizované úseky NC kódu,
- nemožnost optimalizace NC kódu s korekcí,
- nepřesné výpočty.

#### 3.5.1 Neshoda času simulací

Během porovnávání pravděpodobného času výroby, jenž udává Eureka Chronos, bylo zjištěno, že se tyto hodnoty liší s hodnotami, jenž udává simulace v systému SolidCAM. Rozdíly budou popsány na Dílu 1:

Tab. 44: Časy výroby z různých zdrojů

Operace	CAM-simulace [h]:[min]:[s]	CAM-operace [h]:[min]:[s]	Eureka Chronos [h]:[min]:[s]
1. Drážka 1	0:0:21	0:0:06	0:0:09.92
2. Drážka s rádiy	0:0:22	0:0:7	0:0:11.29
3. Kapsa	0:1:37	0:1:22	0:1:26.00
4. Finiš kapsy	0:0:26	0:0:11	0:0:14.63
5. Díra Ø 12 mm	0:0:19	0:0:04	0:0:08.41
Čas celkem	0:3:05	0:1:50	0:2:10.

Z výsledků je zřejmé, že výrobní časy, jež ukazuje Eureka Chronos jsou sice výrazně nižší, než je ukázáno v SolidCAM při simulaci, ale naproti tomu jsou o něco vyšší, než je ukázaný čas obrábění ve stromě operací v SolidCAM. Hodnota, jenž ukazuje simulace pro každou operaci je vždy o 15 s delší, než je uvedený čas obrábění k samotné operaci. Přičemž čas 15 s je pravděpodobně doba trvání pro výměnu nástroje, s níž SolidCAM v simulaci konstantně počítá. Pro ověření byl proveden následující výpočet:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{90}{1910} = 0,042 \text{ min} = 2,82\text{s}$$

$$t_{AS} = 2,82 \times \text{počet řezů} = 2,82 \times 2 = 5,64 \text{ s}$$

Kde:

- $t_{AS}$ : strojní čas obrábění [s],
- L: celková dráha nástroje [mm],
- $v_f$ : posuvová rychlost [mm/min].

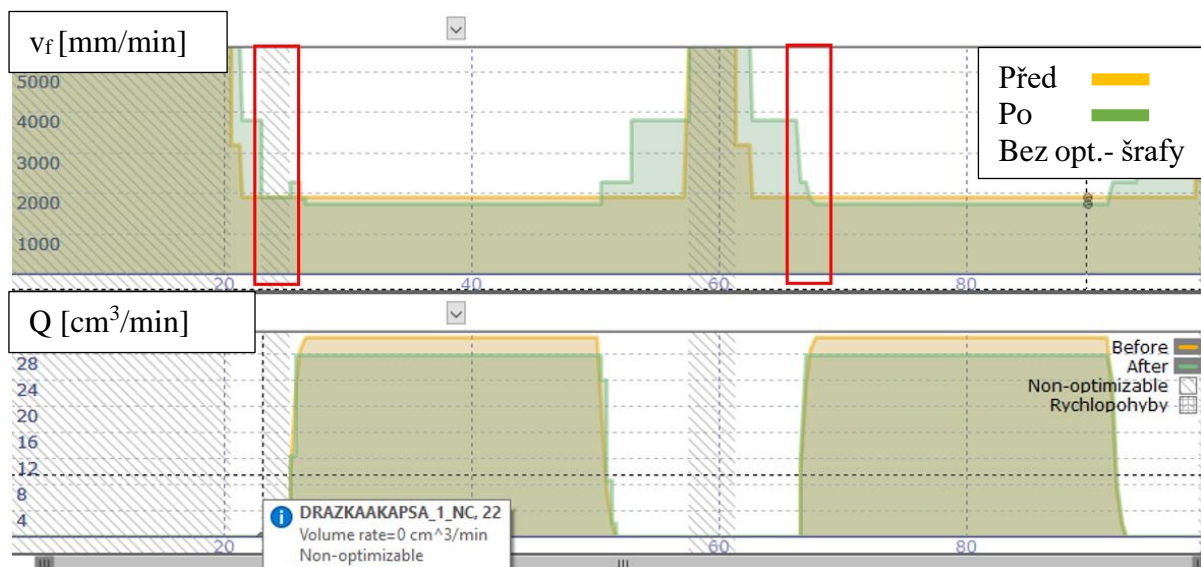
S ohledem na rychloposuv při přejetí mezi řezy lze říci, že doba obrábění trvá zhruba 6 s. Ovšem bez výměny nástroje, či najetí frézy k začátku operace. Eureka Chronos pravděpodobně počítá i s tímto údajem. Tomu by pak mohl odpovídat čas obrábění, jenž dle Eureka Chronos činí 9,92 s. Je ovšem nutné počítat s tím, že tyto uvedené hodnoty času obrábění nemusí vždy odpovídat realitě, tu pak vždy nejlépe ověří samotná praxe.

### 3.5.2 Neoptimalizované úseky NC kódu

Dalším z problémů, které se vyskytly u optimalizovaných NC kódů, byly jejich neoptimalizované části. Obecně lze říci, že Eureka Chronos neprovádí optimalizaci pro následující případy:

- Rychloposuvy.
- nájezd/sestup do materiálu pomocí šroubovice/oblouku.

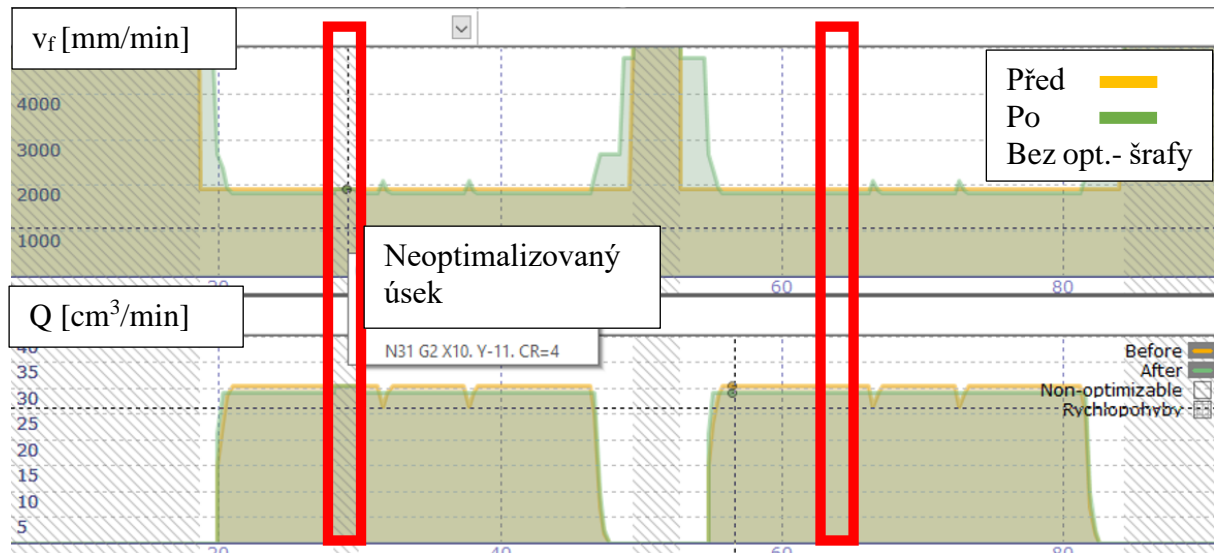
Zajímavé tedy je, že nájezdy pomocí tečny Eureka optimalizuje, ale u nájezdu typu oblouk tomu tak vždy není. Pro názorný příklad byla upravena operace Drážka 1 u Dílu 1 tak, aby byl nájezd proveden pomocí oblouku, z obr. níže lze vidět že při prvním nájezdu optimalizace neproběhla, ale následně v té stejné pozici jen ve větší hloubce řezu optimalizace proběhla.



Obr. 90: Neoptimalizované úseky pro nájezd. Foto autor.

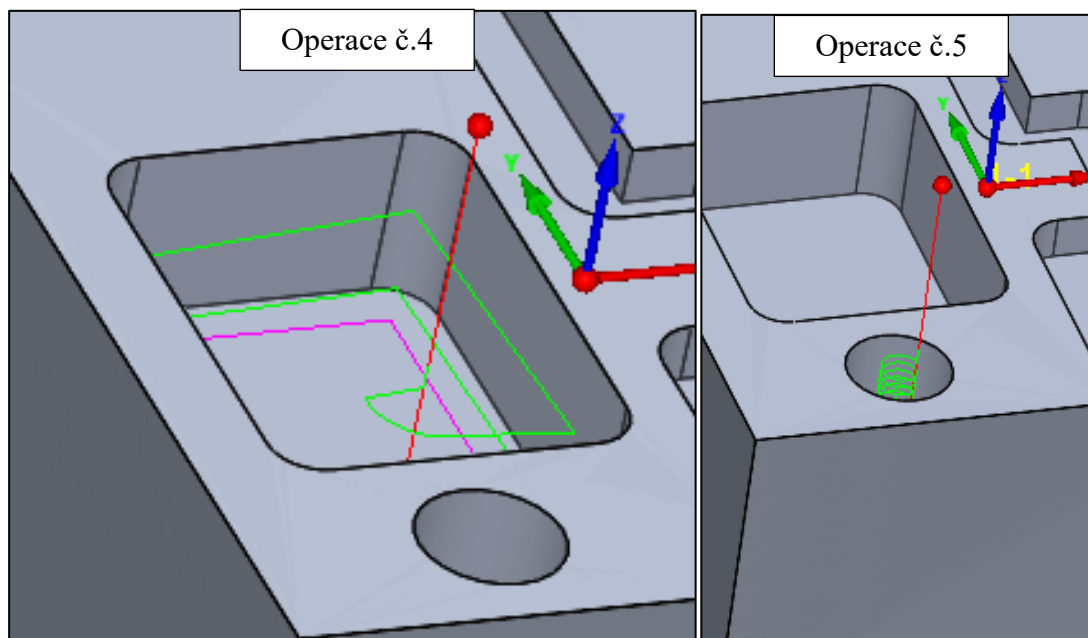
Dalším případem pak byla operace Drážka 2 u Dílu 1, kde v úseku kdy již byla fréza plně v záběru neproběhla optimalizace. Zajímavé na tom je zejména to, že v těch samých souřadnicích vyjma osy Z optimalizace proběhla. Tento jev je zobrazen na obr.91 níže. Důvod, proč nebyl tento úsek optimalizován však nebyl zjištěn.





Obr. 91: Neoptimalizovaný úsek. Foto autor.

Dalším zajímavým případem je pak porovnání operací č.3 Kapsa na čisto a č.4 Díra průměru 12 mm u Dílu 1. Obě operace byly obrobena pomocí kontury s definovanou hloubkou dle šroubovice. Zelenou barvou jsou v systému SolidCAM zobrazeny dráhy nástroje při nájezdu/odjezdu frézy. Takto byly vygenerovány i řezné dráhy pro výše dvě popsané operace viz. obr. níže. U operace č.4 ovšem došlo k optimalizaci v celé délce řezné dráhy, zatímco u operace č.5 došlo k optimalizace pouze v oblasti dna. Tento problém by se dal vysvětlit tak, že ačkoliv byl sestup nástroj u operace č.4 uskutečněn pomocí šroubovice, nejednalo se svým tvarem o šroubovici v pravém slova smyslu, neboť nástroj sestupoval kolem kapsy s profilem obdélníku. Zatímco u operace č.5 se jednalo o šroubovici v pravém slova smyslu. Jak již bylo několikrát ukázáno, tak Eureka Chronos v těchto případech optimalizaci neprovádí.



Obr. 92: Porovnání operací č.3 a č.4. Foto autor.

Dalším případem, kdy optimalizace neprobíhá je situace, kdy je při tvorbě programu zaškrtnuta možnost korekce, a to pro všechny možné operace, které jsou v SolidCAM nabízeny. K vyřešení či k vysvětlení výše zmíněných problému by bylo zapotřebí kontaktovat podporu Eureka Chronos, neboť DP.

### 3.5.3 Nepřesné výpočty

Tento problém byl zjištěn během optimalizace dle uživatelských omezení v kapitole 3.3.2. Neshoda výsledků nastala u výpočtu objemu odebraného materiálu za čas  $Q$  a výkonu  $P$ . Postup kontroly byl takový, že se nejdříve provedl kontrolní výpočet s neoptimalizovanou hodnotou posuvu a ten byl porovnán s neoptimalizovanou hodnotou jež byla zobrazena v Eureka Chronos. Výpočty byly provedeny následovně. Pro výkon  $P$ :

$$F_t = AZ_c \times k_c = a_p \times \frac{180^\circ \times (1 - \cos TEA) \times f_z}{\tau \times \arccos(1 - (1 - \cos TEA))} \times Z \times \frac{TEA}{360^\circ} \times k_{c1.1} \times h_m^{-m_c}$$

$$F_t = 2,5 \times \frac{180^\circ \times (1 - \cos 180) \times 0,03}{\tau \times \arccos(1 - (1 - \cos 180))} \times 4 \times \frac{180^\circ}{360^\circ} \times 600 \times 0,019_m^{-0,25} = 153,33 \text{ N}$$

$$P = \frac{F_t \times v_c}{60} = \frac{153,33 \times 400}{60} = 1022,2 \text{ W} = 1,02 \text{ kW}$$

$$P_{Eureka} = 0,61 \text{ kW}$$

$$0,61 \neq 1,02$$

Pro objem odebraného materiálu za čas  $Q$ :

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times v_f}{1000} = \frac{2,5 \times 8 \times 1909,859}{1000} = 38,197 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$Q_{Eureka} = 30,495 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$30,495 \neq 38,197$$

Z výsledků je zřejmé, že výsledné hodnoty se značně liší. Při zjišťování možné příčiny neshody u objemu odebraného materiálu za čas, byla zvažována varianta, že Eureka Chronos při výpočtu  $v_f$  nepočítá s plným počtem zubů, ale s aktuálně efektním počtem zubů. Vzhledem k tomu, že výsledky udávané Eureka Chronos byly v některých případech vyšší než u vypočtených hodnot, byla tato teorie zavrhnuta. Výpočty v softwaru Eureka Chronos jsou prováděny interně, nebyla tedy možnost do výpočtů nahlédnout a zjistit jednotlivé proměnné se kterými byly výpočty provedeny. S tímto problémem by bylo třeba opět kontaktovat podporu Eureka Chronos.

## 4 Technicko-ekonomické zhodnocení

Cílem softwarové optimalizace pomocí Eureka Chronos bylo optimalizovat posuvovou rychlost za účelem snížení strojního času obrábění nebo případného prodloužení životnosti nástrojů. Technické zhodnocení bude provedeno pro oba díly s optimalizovaným NC programem dle A.I.. Strojní časy pro výpočet byly vzaty ze softwaru Eureka Chronos, neboť časy výroby, jež byly naměřeny během experimentu, jsou zavádějící kvůli neodladěnému postprocesoru. Hodnoty odhadované trvanlivosti nástroje pro jednotlivé díly, byly určeny na základě konzultace s firmou, jež se zabývá výrobou obdobných dílů ze slitin hliníku. Stejným způsobem byla určena hodinová sazba stroje.

### 4.1.1 Technicko-ekonomické zhodnocení Dílu 1

V tabulce č.45 jsou uvedeny strojní časy v minutách pro jednotlivé operace Dílu 1. Hodinová sazba stroje byla orientačně určena na  $N_{\text{sazba-stroje}}=1200$  Kč. Náklady na rezný nástroj byly vypočteny následovně:

- FR-D8 Z4:
  - Cena nástroje  $C_N = 800$  Kč,
  - doba výměny nástroje  $t_{AX} = 0,05$  min,
  - optimalizovaný strojní čas  $t_{as} = 1,969$  min,
  - neoptimalizovaný strojní čas  $t_{as} = 2,17$  min,
  - odhadovaný počet obrobených kusů během jedné trvanlivosti nástroje pro optimalizovaný NC kód  $Q_{ks} = 200$  ks,
  - odhadovaný počet obrobených kusů během jedné trvanlivosti nástroje pro neoptimalizovaný NC kód  $Q_{ks} = 190$  ks.

$$N_{TV} = t_{AX} \times \frac{N_{\text{sazba-stroje}}}{60} = 0,05 \times \frac{1200}{60} = 1 \text{ Kč}$$

$$T = Q_{ks} \times t_{as} = 200 \times 1,969 = 393,8 \text{ min}$$

$$T_{\text{neopt.}} = Q_{ks} \times t_{as} = 190 \times 2,17 = 412,3 \text{ min}$$

$$N_N = \frac{C_N + N_{TV}}{Q} = \frac{800 + 1}{200} = 4 \text{ Kč/kus}$$

$$N_{N-\text{neopt.}} = \frac{C_N + N_{TV}}{Q} = \frac{800 + 1}{190} = 4,21 \text{ Kč/kus}$$

$$N_{N_{\text{min}}} = \frac{C_N + N_{TV}}{T} = \frac{800 + 1}{393,8} = 2,03 \text{ Kč/min}$$

$$N_{N_{\text{min}}-\text{neopt.}} = \frac{C_N + N_{TV}}{T_{\text{neopt.}}} = \frac{800 + 1}{412,3} = 1,94 \text{ Kč/min}$$

Kde:

- $N_{TV}$ : Náklady na výměnu nástroje vztahované na jednu trvanlivost [min],
- T: Trvanlivost nástroje [min],
- $Q_{ks}$ : Odhadovaná trvanlivost [ks],
- $t_{as}$ : Strojní čas [min],
- $N_N$ : Náklady na nástroj za kus [Kč/ks],
- $N_{N_{\text{min}}}$ : Náklady na nástroj za minutu [Kč/min],
- $C_N$ : Cena nástroje [Kč].

Tab. 45: Náklady na Díl 1 - optimalizovaný NC kód

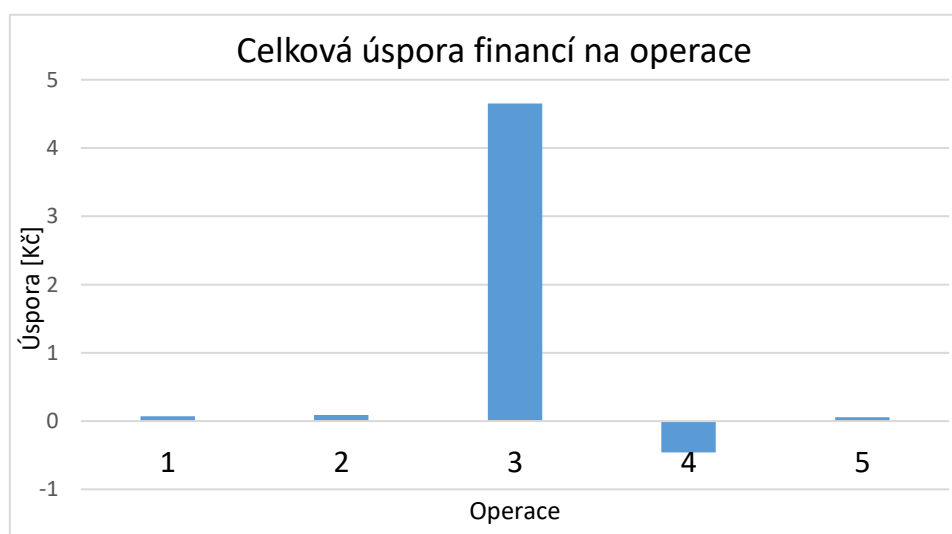
Operace	Strojní čas [min]	Cena operace [Kč]	Nákl na nástroj za operaci [Kč]
1. Drážka 1	0,162	3,24	0,33
2. Drážka 2	0,184	3,68	0,37
3. Kapsa	1,220	24,40	2,48
4. Kapa na čisto	0,265	5,30	0,54
5. Díra Ø 12 mm	0,138	2,75	0,28
Suma	1,969	39,37	4,00

Tab. 46: Náklady na Díl 1 - neoptimalizovaný NC kód

Operace	Strojní čas [min]	Cena operace [Kč]	Nákl na nástroj za operaci [Kč]
1. Drážka 1	0,165	3,31	0,32
2. Drážka 2	0,188	3,76	0,36
3. Kapsa	1,433	28,66	2,78
4. Kapa na čisto	0,244	4,88	0,47
5. Díra Ø 12 mm	0,140	2,80	0,27
Suma	2,17	43,41	4,21

Tab. 47: Úspory pro Díl 1

Operace	Úspora strojního času [s]	Úspora na operaci [Kč]	Nákl. na nástroj za operaci [Kč]	Celková úspora [Kč]
1. Drážka 1	0,003	0,07	-0,01	0,06
2. Drážka 2	0,004	0,08	-0,01	0,07
3. Kapsa	0,213	4,26	0,30	4,56
4. Kapa na čisto	-0,021	-0,42	-0,06	-0,48
5. Díra Ø 12 mm	0,003	0,05	-0,01	0,04
Suma	0,202	4,04	0,21	4,25



Graf 3: Celková úspora financí na operace

Z výše uvedené tabulky tedy vyplývá, že při využití Eureka Chronos by úspory pro jeden díl dosáhly 4,4 Kč. Tato úspora je pak způsobena především finanční úsporou na operaci č.3. Tento markantní rozdíl je vidět z grafu výše. V případě, že by tento díl šel do hromadné výroby a za rok by bylo těchto dílu vyrobeno například 200 000 ks. Tak by celková teoretická finanční úspora při nepřetržité výrobě byla následující:

$$X = Q_{ks} \times N_{dí} = 200\,000 \times 4,25 = 850\,000 \text{ Kč}$$

$$\text{Čistá finanční úspora} = Q_{ks} - N_{\text{Eureka}} = 850\,000 - 270\,000 = 580\,000 \text{ Kč}$$

$$\text{Splatnost}_{\text{Eureka}} = \frac{365 \times N_{\text{eureka}}}{X} = \frac{365 \times 270\,000}{850\,000} = 116 \text{ Dní}$$

Kde:

- X: Finanční úspora [Kč],
- $Q_{ks}$ : Objem výroby [Ks/rok],
- $N_{dí}$ : Úspora nákladů na výrobu dílu [Kč/ks],
- $N_{\text{Eureka}}$ : Investiční náklady na Eureka Chronos [Kč].

Za těchto podmínek by byly počáteční náklady spojené s Eureka Chronos splaceny za 116 dní a čistá finanční úspora by za rok při výrobě 200 000 ks činila 580 000 Kč, což je již znatelně velká finanční částka, přičemž Eureka Chronos může zajistit v případě, že má podnik další výrobní kapacity ještě znatelně vyšší finanční úspory. Celkově je však nutné brát tyto finanční úspory jako teoretické, neboť:

- Udávaná doba výroby je pouze teoretická.
- Je nutné počítat s časovými ztráty způsobené např. prostoji či opravami.
- Rozdíl v trvanlivosti nástroje pro optimalizovaný a neoptimalizovaný NC kód je pouze teoretický. Trvanlivost nástroje nebyla testována.

#### 4.1.2 Technicko-ekonomické zhodnocení Dílu 2

Hodinová sazba stroje byla opět určena na 1200 Kč. Na obrobění Dílu 2 jsou pak zapotřebí tři nástroje:

- Fr D32 r2 L9 z5 (Safety):
  - Cena destičky (2 břity) - 260 Kč ,
  - Náklady na výměnu nástroje vztažené na jednu trvanlivost  $t_{AX} = 0,05$  min,
  - Optimalizovaný strojní čas  $t_{as} = 5,25$  min,
  - Neoptimalizovaný strojní čas  $t_{as} = 6,283$  min,
  - Odhadovaný počet obrobených kusů během jedné trvanlivosti nástroje pro optimalizovaný NC kód  $Q_{ks} = 150$  ks,
  - Odhadovaný počet obrobených kusů během jedné trvanlivosti nástroje pro neoptimalizovaný NC kód  $Q_{ks} = 140$  ks.

$$N_{Tv} = t_{AX} \times \frac{N_{\text{sazba-stroje}}}{60} = 0,05 \times \frac{1200}{60} = 1 \text{ Kč}$$

$$T = Q_{ks} \times t_{as} = 150 \times 5,25 = 787,5 \text{ min}$$

$$T_{\text{neopt.}} = 140 \times 6,283 = 879,62 \text{ min}$$

$$N_N = \frac{C_N + N_{Tv}}{Q} = \frac{5 \times 260 + 1}{150} = 8,67 \text{ Kč/kus}$$

$$N_{N\text{-neopt}} = \frac{C_N + N_{TV}}{Q} = \frac{5 \times 260 + 1}{140} = 9,3 \text{ Kč/kus}$$

$$N_{N\text{-min}} = \frac{C_N + N_{TV}}{T} = \frac{5 \times 260 + 1}{787,5} = 1,65 \text{ Kč/min}$$

$$N_{N\text{-min-neopt.}} = \frac{C_N + N_{TV}}{T_{\text{neopt.}}} = \frac{5 \times 260 + 1}{879,62} = 1,48 \text{ Kč/min}$$

• Fr D16 Z4:

- Cena frézy – 1820 Kč,
- Náklady na výměnu nástroje vztažené na jednu trvanlivost  $t_{AX} = 0,05$  min,
- Optimalizovaný strojní čas  $t_{as} = 12,916$  min,
- Neoptimalizovaný strojní čas  $t_{as} = 16,017$  min,
- Odhadovaný počet obrobených kusů během jedné trvanlivosti nástroje pro optimalizovaný NC kód  $Q_{ks} = 40$  ks,
- Odhadovaný počet obrobených kusů během jedné trvanlivosti nástroje pro neoptimalizovaný NC kód  $Q_{ks} = 37$  ks.

$$N_{TV} = t_{AX} \times \frac{N_{\text{sazba-stroje}}}{60} = 0,05 \times \frac{1200}{60} = 1 \text{ Kč}$$

$$T = Q_{ks} \times t_{as} = 40 \times (7,183 + 5,733) = 516,64 \text{ min}$$

$$T_{\text{neopt.}} = 37 \times (9,267 + 6,75) = 592,629 \text{ min}$$

$$N_N = \frac{C_N + N_{TV}}{Q} = \frac{1820 + 1}{40} = 45,5 \text{ Kč/kus}$$

$$N_{N\text{-neopt}} = \frac{C_N + N_{TV}}{Q} = \frac{1820 + 1}{37} = 49,19 \text{ Kč/kus}$$

$$N_{N\text{-min.}} = \frac{C_N + N_{TV}}{T} = \frac{1820 + 1}{516,64} = 3,52 \text{ Kč/min}$$

$$N_{N\text{-min-neopt.}} = \frac{C_N + N_{TV}}{T_{\text{neopt.}}} = \frac{1820 + 1}{592,629} = 3,07 \text{ Kč/min}$$

• Fr D10 Z4:

- Cena frézy – 937 Kč,
- Náklady na výměnu nástroje vztažené na jednu trvanlivost  $t_{AX} = 0,05$  min,
- Optimalizovaný strojní čas  $t_{as} = 6,35$  min,
- Neoptimalizovaný strojní čas  $t_{as} = 7,8$  min,
- Odhadovaný počet obrobených kusů během jedné trvanlivosti nástroje pro optimalizovaný NC kód  $Q_{ks} = 80$  ks,
- Odhadovaný počet obrobených kusů během jedné trvanlivosti nástroje pro neoptimalizovaný NC kód  $Q_{ks} = 72$  ks.

$$N_{TV} = t_{AX} \times \frac{N_{\text{sazba-stroje}}}{60} = 0,05 \times \frac{1200}{60} = 1 \text{ Kč}$$

$$T = Q_{ks} \times t_{as} = 80 \times 6,35 = 508 \text{ min}$$

$$T_{\text{neopt.}} = 72 \times 7,8 = 561,6 \text{ min}$$

$$N_N = \frac{C_N + N_{Tv}}{Q} = \frac{937 + 1}{80} = 11,72 \text{ Kč/kus}$$

$$N_{N\text{-neopt}} = \frac{C_N + N_{Tv}}{Q} = \frac{937 + 1}{72} = 13,03 \text{ Kč/kus}$$

$$N_{N\_min} = \frac{C_N + N_{Tv}}{T} = \frac{937 + 1}{508} = 1,85 \text{ Kč/min}$$

$$N_{N\_min\text{-neopt.}} = \frac{C_N + N_{Tv}}{T} = \frac{937 + 1}{561,6} = 1,67 \text{ Kč/min}$$

Tab. 48: Náklady na Díl 2-optimalizovaný NC kód

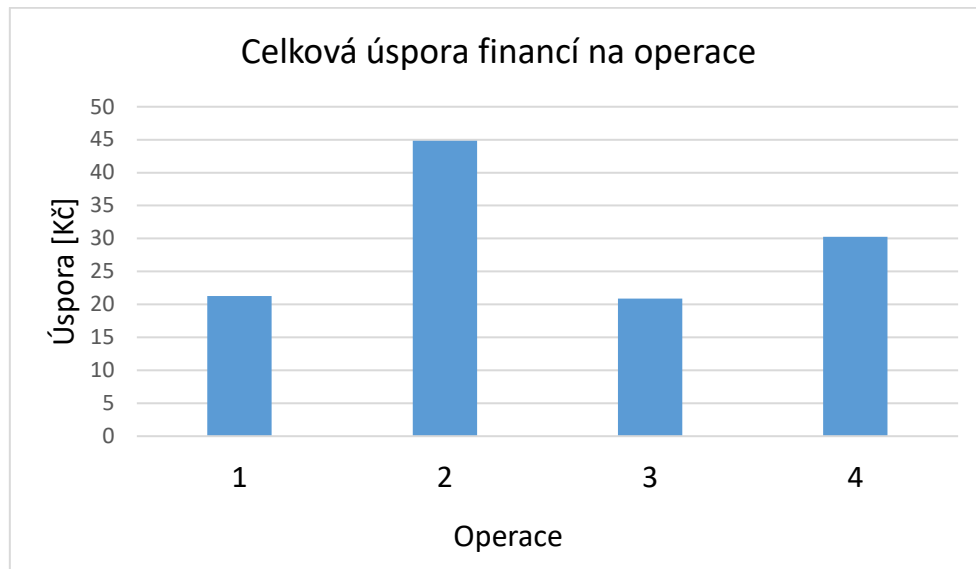
Operace	Strojní čas [min]	Cena operace [Kč]	Náklady nástroje na operaci [Kč]
1. Rovinná plocha	5,25	105	8,67
2. Tvarové plochy č.1	7,183	143,66	25,31
3. Tvarové plochy č.2	5,733	114,66	20,20
4. Tvarové plochy č.3	6,35	127	11,72
<b>Suma</b>	<b>24,516</b>	<b>490,32</b>	<b>65,89</b>

Tab. 49: Náklady na Díl 2-neoptimalizovaný NC kód

Operace	Strojní čas [min]	Cena operace [Kč]	Náklady nástroje na operaci [Kč]
1. Rovinná plocha	6,283	125,66	9,30
2. Tvarové plochy č.1	9,267	185,34	28,45
3. Tvarové plochy č.2	6,750	135	20,72
4. Tvarové plochy č.3	7,800	156	13,03
<b>Suma</b>	<b>30,100</b>	<b>602</b>	<b>71,50</b>

Tab. 50: Úspory pro Díl 2

Operace	Úspora strojního času [min]	Úspora na operaci [Kč]	Nákl na nástroj za operaci [Kč]	Celková úspora [Kč]
1. Rovinná plocha	1,033	20,66	0,63	21,29
2. Tvarové plochy č.1	2,084	41,68	3,14	44,82
3. Tvarové plochy č.2	1,017	20,34	0,53	20,87
4. Tvarové plochy č.3	1,450	29,00	1,30	30,30
<b>Suma</b>	<b>5,584</b>	<b>111,68</b>	<b>5,60</b>	<b>117,28</b>



Graf 4: Celková úspora financí na operace

Z výše uvedené tabulky tedy vyplývá, že při využití Eureka Chronos by finanční úspory pro jeden díl dosáhly 117,22 Kč. Pokud by bylo vyrobeno 10 000 ks za rok při nepřetržité výrobě. Tak celková finanční úspora by byla následující:

$$X = Q_{ks} \times N_{díl} = 10\,000 \times 117,28 = 1\,172\,800 \text{ Kč}$$

$$\text{Čistá úspora} = Q_{ks} - N_{Eureka} = 1\,172\,800 - 270\,000 = 902\,800 \text{ Kč}$$

$$\text{Splatnost}_{Eureka} = \frac{365 \times N_{eureka}}{X} = \frac{365 \times 270\,000}{1\,172\,220} = 84 \text{ Dní}$$

Za těchto podmínek by byly počáteční náklady spojené s Eureka Chronos splaceny za 84 dní a čistá finanční úspora by za rok při výrobě 10 000 ks činila 902 800 Kč. To je již velice značná finanční úspora. Tyto podmínky je nutné brát opět jen jako teoretické, neboť platí to stejné jako u Dílu 1:

- Udávaná doba výroby je pouze teoretická,
- je nutné počítat s časovými ztrátami způsobené např. prostoji či opravami,
- rozdíl v trvanlivosti/životnosti nástroje pro optimalizovaný a neoptimalizovaný NC kód je pouze teoretický. Trvanlivost nástroje nebyla testována.



## 5 Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat a popsat softwarovou optimalizaci NC kódu pomocí Eureka Chronos, jenž má za cíl snížit časy obrábění, a harmonizovat silové špičky tím, že optimalizuje posuvovou rychlost.

V teoretické části DP byla nejdříve popsána tvorba NC programu pomocí CAM systému jmenovitě šlo o SolidCAM. Následně byla podrobněji popsána samotná optimalizace NC kódu, a to nejdříve obecně a poté přímo pomocí Eureka Chronos.

V praktické části DP pak byly vytvořeny NC programy pro díl 1 a 2 pomocí systému SolidCAM. Vytvořené programy byly následně optimalizovány, a to jak pomocí A.I. tak pomocí uživatelem zadaných omezení.

Tab. 51: Souhrn k dílům 1 a 2

Model	Předpokládaný čas výroby		Úspora času [h]:[min]:[s]	Úspora času [%]
	Před optimalizací [h]:[min]:[s]	Po optimalizaci dle A.I. [h]:[min]:[s]		
Díl 1	0:02:10	0:01:57	0:00:13	10,1
Díl 2	0:30:07	0:24:34	0:05:33	18,5

Během zkoumání a tvorby optimalizovaných NC programů byly zjištěny následující poznatky:

- Optimalizací u vybraných dílů bylo dosaženo předpokládané úspory času mezi 10-30 %, a to jak u A.I. tak u uživatelských omezení.
- Vyšší hodnoty úspory času bylo dle očekávání dosaženo u Dílu 2. Potvrdilo se tedy, že největší uplatnění nachází Eureka Chronos u dílů s větším počtem tvarových ploch, jako jsou například formy.
- U optimalizace dle A.I. byl prokázán značný vliv nastavení performance indexu na celkovou úsporu času.
- Při optimalizaci jsou původní bloky NC kódu rozděleny do většího počtu řádků s různou hodnotou posuvové rychlosti, čímž je zajištěna harmonizace silových špiček. Hodnoty rozestupů mezi rozdělenými bloky jsou dány matematickou řadou.
- Byly zjištěny neoptimalizované úseky NC programů u: nájezdů a sestupů nástroje dle šroubovice, u operací s korekcí a také byly objeveny neoptimalizované úseky, kde nebyla nalezena žádná spojitost ani vysvětlení.
- Při uživatelské optimalizaci dochází k linearizaci hodnoty, dle níž byla optimalizace prováděna.
- Neshoda vypočtených hodnot u množství odebraného materiálu za čas Q a výkonu P s hodnoty, jež jsou uvedeny v Eureka Chronos.

V další části DP byla provedena výroba daných dílů na 5-osé frézce v laboratoři KTO na ZČU, a to jak pomocí neoptimalizovaných, tak pomocí optimalizovaných NC kódů dle A.I.. Naměřené časy výroby byly zřetelně vyšší, než bylo očekáváno. Optimalizované NC kódy dosáhly vyšších časů výroby než neoptimalizované. Průvodním jevem výroby byly zřetelné vibrace, které byly způsobovány „trhavým“ pohybem stroje. Tento problém byl způsoben neodladěným postprocesorem pro stroj MCU 450 V[T]-5X. Odladění postprocesoru pro DP nebylo provedeno, neboť se jedná o finančně a časově náročnou operaci. Během výroby pak byl do NC programu vložen speciální cyklus, jenž výrazně snížil časy obrábění a též odstranil vibrace. Čas výroby i přesto trval déle u optimalizovaného než u neoptimalizovaného NC kódu.

Dalším faktorem také mohly být kinematické vlastnosti stroje. Dále pak byla zkoumána výsledná kvalita obrobených ploch v oblasti rádií. Zde však nebylo ve většině případů dosaženo vyšší kvality povrchu, jak bylo očekáváno. To bylo pravděpodobně způsobeno již zmíněnými silnými vibracemi během obrábění.

Výstupem DP je tedy podrobný popis tvorby optimalizovaných NC programů a jejich vlastností a funkcí na vybraných modelech. Na nichž byly zkoumány a následně i popsány rozdíly mezi optimalizovanými a neoptimalizovanými NC programy. Dle těchto programů byly následně dané díly vyrobeny. Během procesu optimalizace byla zjištěna řada nejasností, které byly popsány výše. Zde je tedy prostor pro pokračování výzkumu softwarové optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos.

Závěrem práce lze konstatovat, že pokud by měl uživatel k dispozici odladěný postprocesor a stroj, jenž svými kinematickými vlastnostmi zvládne plynule měnit posuvovou rychlost v malých intervalech a časy výroby by zhruba odpovídaly hodnotám, jež byly zobrazeny v Eureka Chronos, tak byla by návratnost počáteční investice vysoká.

V případě dalšího zkoumání Eureka Chronos by bylo zapotřebí podrobněji prozkoumat hodnoty dle kterých jsou prováděny optimalizační výpočty. Problém je v tom, že výpočty jsou prováděny interně, a tedy uživatel k nim nemá přístup. Zde se tedy nabízí možnost kontaktovat podporu Eureka Chronos. Dále je třeba prozkoumat určité oblasti NC kódu, jež nebyly optimalizovány.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] STANĚK, J., NĚMEJC, J. *Metodika zpracování a úprava diplomových prací*. Plzeň: ZČU,2005, ISBN 80-7043-363-9
- [2] MAREK, J. a kol.: *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha, MM publishing. 2014, ISBN: 978-80-260-6780-1
- [3] HAMOUZ L. *Softwarová optimalizace obrábění složitých tvarových ploch při práci na čisto s ohledem na ochranu nástroje* [písemná práce ke státní doktorské zkoušce]. Plzeň, 2010.
- [4] ŠTULPA, M.: *CNC programování obráběcích strojů*. Praha, 2015. ISBN 978-80-247-5269-
- [5] YUSUF Altintas. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge, 2012, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-17247-
- [6] Doc. Ing. Josef FORMÁNEK, Ph.D. *Podklady k adaptivnímu řízení výrobních strojů*. Home.zcu.cz [ONLINE]. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmyvuka-arvt/Data/ivk-arvt-soubory/15-F.pdf>
- [7] CAHA, Tomáš. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [8] SolidVision. *Nový modul Eureka Chronos*. [online]. 9.7.2020 [cit. 10.11. 2020]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/novinky/novy-modul-eureka-chronos-a12277993>
- [9] BRYCHTA Josef, SADÍLEK Marek, ČEP Robert a PETRŮ Jana. *Progresivní metody v obrábění*. fs.vsb.cz [online]. Ostrava, 2011 [cit. 1.12.2020]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni\\_metody\\_v\\_obrazeni\\_FINAL.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrazeni_FINAL.pdf)
- [10] SOLIDMANIA – *Optimalizacja programu NC*. solidmania.com [online]. 3.11.2020 [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://solidmania.com/eureka-chronos-optimalizacja-programu-nc/>
- [11] JIRÁSKOVÁ Monika. *Analýza verifikace programů pro pětiosé obrábění*. Liberec, 2003. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.
- [12] SolidCAM. Software: 2.5D Frézování. *SolidCAM CAM Software: The Leaders in Integrated CAM* [online]. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/produkty/0/25d-frezovani/>
- [13] SolidCAM. Software: 3D HSM vysokorychlostní frézování. *SolidCAM CAM Software: The Leaders in Integrated CAM* [online]. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/produkty/0/3d-hsm-vysokorychlostni-frezovani/>
- [14] SolidCAM. Software: *Výhody iMachiningu*. *SolidCAM CAM Software: The Leaders in Integrated CAM* [online] [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/imachining/vyhody-imachiningu/>
- [15] SolidVision. *Řešení pro CAM a simulace* [online]. Copyright ©2020 [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/cam/>
- [16] Techopedia. *Computer-Aided Manufacturing* [online]. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/4698/computer-aided-manufacturing-cam>

- [17] SolidCAM. *HSR/HSM moduly pro 3D vysokorychlostní frézování*. Solidcam.com [online]. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/produkty/0/3d-hsm-vysokorychlostni-frezovani/>
- [18] GÓRECKI, Jan. *Postprocesor s korekcí posuvové rychlosti o úhlovou rychlost pohybu pro CNC stroje*. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
- [19] NECHVÁTAL, Luboš. *Optimalizace G-kódu*. Zlín, 2017. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.
- [20] Solver Engineering. *Vericut-Software for NC programs checking and optimization* [online]. [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: <https://www.solver.ru/engl/products/cadprod/vericut.asp>
- [21] VYHŇÁK, Vladimír. *Automatcké řízení strojů*. sssebrno.cz [online]. 2018 [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: [https://www.sssebrno.cz/cardfiles/card-16511/card-18776/files/aar-m3b-elektricke-rizeni-3010196.pdf\\_43f80cf90f354b292bc0890738afcc031567530430.pdf](https://www.sssebrno.cz/cardfiles/card-16511/card-18776/files/aar-m3b-elektricke-rizeni-3010196.pdf_43f80cf90f354b292bc0890738afcc031567530430.pdf)
- [22] EUREKA. *Simulační software pro CNC obráběcí stroje a roboty*. [cit. 06.02.2021].
- [23] JACOBS, Bryan. *Optimization software saves time* [online]. Copyright ©2017 [cit. 06.02.2021]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/articles/optimization-software-saves-time>
- [24] CADdy. *Eureka Chronos* [online]. 13.6.2017 [cit. 06.02.2021]. Dostupné z: <https://blogs.ib-caddy.com/2020/05/27/eureka-chronos/>
- [25] SANDVIK. *Frézování vnitřních rohů* [online]. [cit. 06.02.2021]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/milling-inside-corners.aspx>
- [26] SANDVIK. *Čelní frézování* [online]. [cit. 06.02.2021]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>
- [27] PRACTICAL MACHINIST. *Chatter in Corners of Deep Pocket* [online]. [cit. 06.02.2021]. Dostupné z: <https://www.practicalmachinist.com/vb/cnc-machining/chatter-corners-deep-pocket-346268/>
- [28] CHTECH. *OptiPath* [online]. [cit. 02.03.2021]. Dostupné z: <https://www.cgtech.com/products/product-line/100-optipath.html>
- [29] SAEILO THAILAND. *CO je to NC SIMUL Machine* [online]. [cit. 02.03.2021]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/saeilothailandcadcamcaeteam/ncsimul-machine>
- [30] CAD.CZ. *NCSIMUL – software nejen pro simulaci* [online]. [cit. 02.03.2021]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/6775-ncsimul-software-nejen-pro-simulaci.html>
- [31] NCBRAIN. *NCBRAIN* [online]. [cit. 02.03.2021]. Dostupné z: <https://www.ncbrain.cz/>
- [32] Doc.Ing. Ján Mádl, Csc. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obráběn*. Praha: ČVUT,1990, ISBN 80-01-00323-X
- [33] HRONEK, Ondřej. *Vliv kvality povrchu nástroje na trvanlivost*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

[34] MITSHUBISHI. *Formulae for Cutting Power* [online]. [cit. 12.03.2021]. Dostupné z: [http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mhg/enuk/html/product/technical\\_information/information/formula4.html](http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mhg/enuk/html/product/technical_information/information/formula4.html)

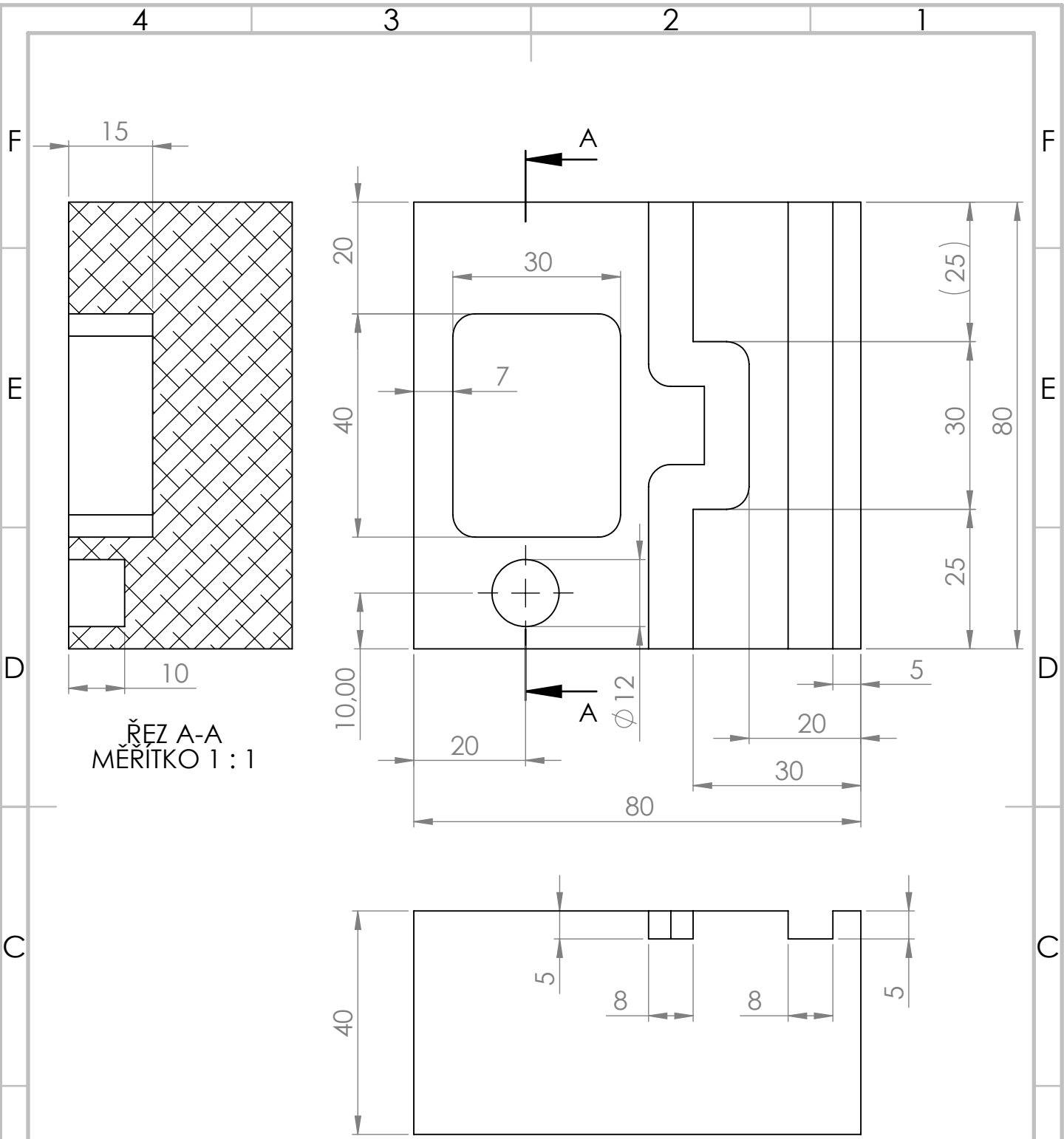
[35] VESELÝ, Jan. *Optimalizace řezných podmínek u vybrané součásti ve vybraném podniku*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Mádl, CSc.

[36] KOVOSVIT. *Obráběcí stroje, CNC stroje, CNC soustruhy/KOVOSVIT MAS*. [online]. [cit. 20.05.2021]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcu-450vt-5x-p45.html#main>

## **PŘÍLOHA č. 1**

**Díl 1 – výkres**

**Díl 2 – výkres**



ŘEZ A-A  
MĚŘITKO 1 : 1

Nezakótované rádiusy R4

√ Ra 3,2

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE: Všeobecné  
tolerance dle:  
ČSN ISO 2768-1,2 mK

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
OSTŘÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU

ZMĚNA

JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Lukáš Nezbeda	10.03.2021
PŘEZKOUSEL		
SCHVÁLIL		
VÝROBA		
Z. JAKOSTI		

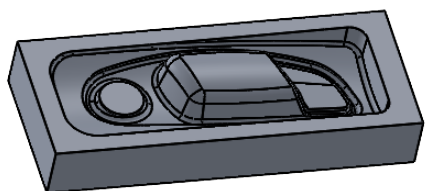
NÁZEV:	<b>Díl 1</b>	
MATERIÁL:	EN AW 5754	Č. VÝKRESU
		<b>1</b>
HMOTNOST: 0,61 kg	MĚŘÍTKO 1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ

A4

4 3 2 1

F

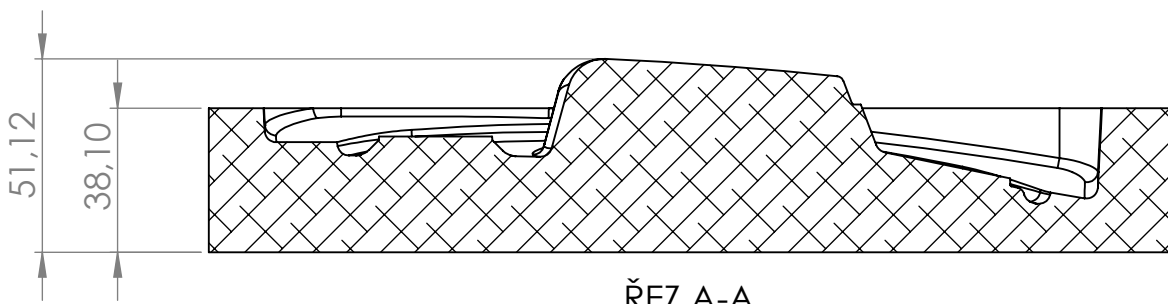
F



1:5

E

E

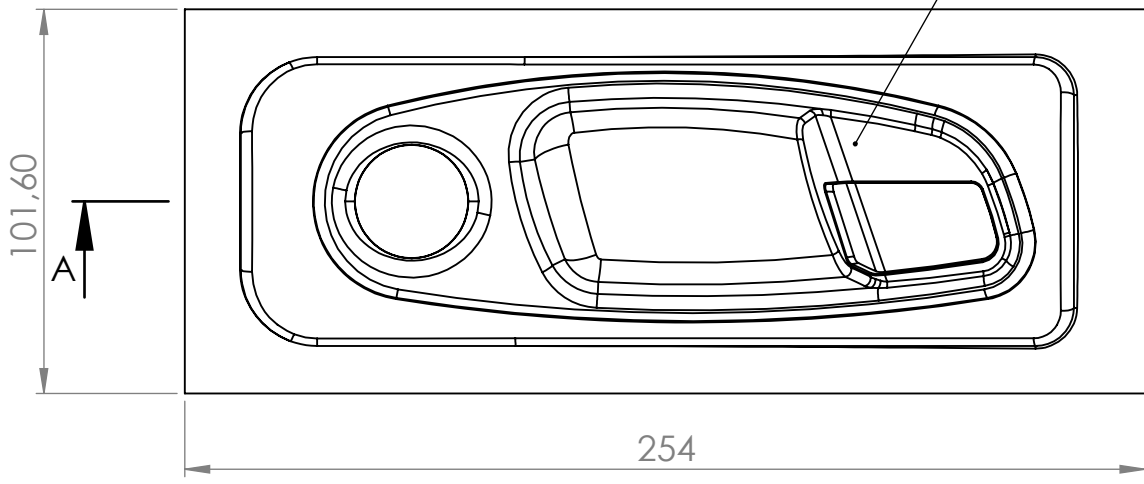


ŘEZ A-A

D

D

Tvar dle 3D modelu



C

C

B

B

√ Ra 3,2

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE: Všeobecné tolerance  
dle:  
ČSN ISO 2768-1,2 mK

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
OSTŘÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Lukáš Nezbeda		10.3.2021
PŘEZKOUSEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:	<b>Díl 2</b>	
MATERIÁL:	EN AW 5754	
Č. VÝKRESU	<b>2</b>	A4
HMOTNOST: 2,34 kg	MĚŘÍTKO 1:2	LIST 1 Z 1 LISTŮ

A

A

4 3 2 1



## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Popis prostředí Eureka Chronos**

Optimizable operations	Before/after	Mode
# 1 Tool code 113	0:0:09.92 / 0:0:09.71 2.2%	Mode A.I. Performance index: 3
# 2 Tool code 113	0:0:11.29 / 0:0:11.04 2.2%	Mode A.I. Performance index: 3
# 3 Tool code 113	0:0:01:26 / 0:0:01:13 15.1%	Mode A.I. Performance index: 3
# 4 Tool code 113	0:0:14.65 / 0:0:15.11 -3.1%	Mode A.I. Performance index: 3
# 5 Tool code 113	0:0:08.41 / 0:0:08.25 1.8%	Mode A.I. Performance index: 3

Zde se zvolí optimalizace dle A.I. nebo dle některých uživatelských omezení

Zde jsou zadávány hodnoty pro omezení posuvové rychlosti.

Zde je volena hodnota Performance indexu 1 až 5. Přičemž hodnota 1 značí maximální životnost nástroje a hodnota 5 maximální produktivitu

V této tabulce jsou uvedeny předpokládané časy výroby před a po optimalizaci. Eureka Chronos neoptimalizuje jednotlivé operace, ale nástroje.

Settings for # 1 Tool code: 113 Jméno programu: DRAZKAAKAPSA\_Z.NC

Mode: **A.I.**

Performance index: 5 - Productivity

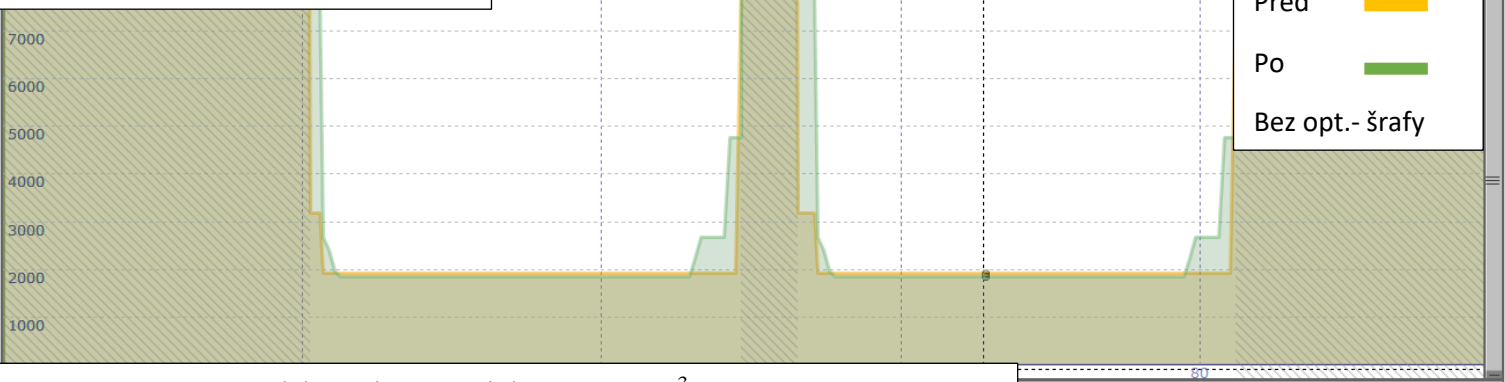
Tool life - 1

Fmax in air / Fprogrammed: 2.5  
 Fmax / Fprogrammed: 1.4  
 Fmin / Fprogrammed: 0.5

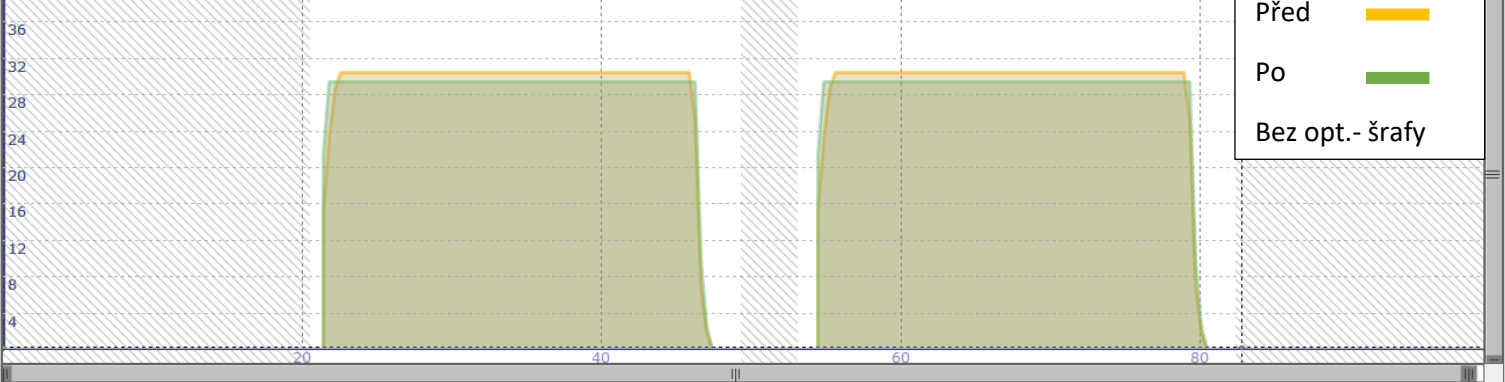
Max feed in air (mm/min): 40000  
 Max feed in cut (mm/min): 20000

Použít

Graf posuvové rychlosti [mm/min]



Graf pro množství odebraného materiálu za čas [cm³/min]



Čas před optimalizací

0:02:10

Čas po optimalizací

0:01:57

Celková úspora času

10.1%

Output folder name: Opt\_20210528\_144506

Save optimized programs Zrušit

## **PŘÍLOHA č. 3**

### **Část NC kódu pro operaci Kapsa hrubování – Díl 1 Část optimalizovaného NC kódu pro operaci Kapsa hrubování – Díl 1**

```
;OPTIMIZED BY EUREKA CHRONOS
;VERSION: 9.5
;DATE: 21-05-10 11:51
;
```

```
N1 G90
; PROJECT: DIL1
; DATE AND TIME: 10-MAY-2021 11:49:33
; GPP VERSION: 29-06-2020
; ===== TOOL TABLE =====
;T113 Fr D8 r0.1 L19 z4 - SEH 422825-2
```

```
N2 G90 G17
N3 G54
N4 ;=====
N5 ;KAPSA HRUBOVANI
N6 ;=====
N8 T="FR-D8 Z4" M6
N9 S15915.494 M3
N9.5 G0 D0 SUPA Z500.
N10 G0 D1 X-15.3 Y3.85 M8
N11 G0 Z25.
N12 G0 Z2.
N13 G3 X-19.22 Y7.77 Z1.623 CR=3.92 F1909.859
N14 G3 X-23.14 Y3.85 Z1.247 CR=3.92
N15 G3 X-19.22 Y-0.07 Z0.87 CR=3.92
N16 G3 X-15.3 Y3.85 Z0.494 CR=3.92
N17 G3 X-19.22 Y7.77 Z0.117 CR=3.92
N18 G3 X-23.14 Y3.85 Z-0.259 CR=3.92
N19 G3 X-19.22 Y-0.07 Z-0.636 CR=3.92
N20 G3 X-15.3 Y3.85 Z-1.013 CR=3.92
N21 G3 X-19.22 Y7.77 Z-1.39 CR=3.92
N22 G3 X-23.14 Y3.85 Z-1.766 CR=3.92
N23 G3 X-21.418 Y0.604 Z-2. CR=3.92
```

```
G3 X-20.37 Y0.102 CR=3.92 F2674
G3 X-19.22 Y-0.07 CR=3.92
G3 X-15.3 Y3.85 CR=3.92
G3 X-19.22 Y7.77 CR=3.92
G3 X-23.14 Y3.85 CR=3.92
G3 X-21.418 Y0.604 CR=3.92
G3 X-19.22 Y-0.07 CR=3.92
G3 X-15.3 Y3.85 CR=3.92
G1 Y6.737 F2674
G1 Y7.7 F2128
G1 X-16.38 F2674
G1 X-20.7
G1 Y0.592 F2674
G1 Y-0.592 F2190
G1 Y-1.777 F1609
G1 Y-2.962 F1545
G1 Y-7.7
G1 X-19.62 F1786
G1 X-18.54 F1609
G1 X-17.46 F1545
G1 X-15.3
G1 Y-6.545 F2674
G1 Y3.85
G1 X-14.3 F2193
```

Optimalizovaný úsek

N1 G90  
; PROJECT: DÍL1  
; DATE AND TIME: 10-MAY-2021 10:35:34  
; GPP VERSION: 29-06-2020  
; ===== TOOL TABLE =====  
;T113 Fr D8 r0.1 L19 z4 - SEH 422825-2

N2 G90 G17  
N3 G54  
N4 ;=====

N5 ;KAPSA HRUBOVÁNÍ  
N6 ;=====

N7  
N8 T="FR-D8 Z4" M6  
N9 S15915.494 M3  
N9.5 G0 D0 SUPA Z500.  
N10 G0 D1 X-15.3 Y3.85 M8  
N11 G0 Z25.  
N12 G0 Z2.  
N13 G3 X-19.22 Y7.77 Z1.623 CR=3.92 F1909.859  
N14 G3 X-23.14 Y3.85 Z1.247 CR=3.92  
N15 G3 X-19.22 Y-0.07 Z0.87 CR=3.92  
N16 G3 X-15.3 Y3.85 Z0.494 CR=3.92  
N17 G3 X-19.22 Y7.77 Z0.117 CR=3.92  
N18 G3 X-23.14 Y3.85 Z-0.259 CR=3.92  
N19 G3 X-19.22 Y-0.07 Z-0.636 CR=3.92  
N20 G3 X-15.3 Y3.85 Z-1.013 CR=3.92  
N21 G3 X-19.22 Y7.77 Z-1.39 CR=3.92  
N22 G3 X-23.14 Y3.85 Z-1.766 CR=3.92  
N23 G3 X-21.418 Y0.604 Z-2. CR=3.92  
N24 G3 X-19.22 Y-0.07 CR=3.92  
N25 G3 X-15.3 Y3.85 CR=3.92  
N26 G3 X-19.22 Y7.77 CR=3.92  
N27 G3 X-23.14 Y3.85 CR=3.92  
N28 G3 X-21.418 Y0.604 CR=3.92  
N29 G3 X-19.22 Y-0.07 CR=3.92  
N30 G3 X-15.3 Y3.85 CR=3.92  
N31 G1 Y7.7  
N32 G1 X-20.7  
N33 G1 Y-7.7  
N34 G1 X-15.3  
N35 G1 Y3.85  
N36 G1 X-11.3  
N37 G1 Y11.7  
N38 G1 X-24.7  
N39 G1 Y-11.7  
N40 G1 X-11.3  
N41 G1 Y3.85  
N42 G1 X-7.3  
N43 G1 Y15.7  
N44 G1 X-28.7  
N45 G1 Y-15.7  
N46 G1 X-7.3  
N47 G1 Y3.85  
N48 G0 Z2.  
N49 G0 X-15.3  
N50 G0 Z0.