

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
FAKULTA STAVEBNÍ**

**Katedra technologie staveb**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Možnosti využití CAM technologie při  
výrobě prefabrikovaných stavebních dílců.**

**Bc. Tomáš Kuře  
2016**

**Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Kovářik**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne: .....

.....

**Bc. Tomáš Kuře**

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Michalu Kovářikovi za cenné rady při konzultacích a vstřícnost při vypracování. Dále panu Ladislavu Bendovi z firmy LB Kovo s.r.o. za umožnění realizace praktické části této diplomové práce.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití CAM technologie při výrobě prefabrikovaných stavebních dílců. V teoretické části jsou popsány počítačem podporované systémy, CNC frézování a výrobní technologie prefabrikovaných dílců. Dále se autor zabývá využitím CAM systémů ve stavebnictví. Předmětem praktické části této práce je výroba polystyrenových forem pro betonové dílce složitých tvarů za použití CAD/CAM a CNC technologie a poukázat tak na využití těchto technologií při výrobě atypických prefabrikovaných betonových dílců.

## **Klíčová slova**

CAD/CAM, CNC frézování, prefabrikované dílce, výrobní technologie, forma

## **Annotation**

This master's thesis is focused on possibilities of CAM technology in production of prefabricated construction components. The theoretical part of this thesis describes computer aided systems, CNC milling and production technology of prefabricated elements. Followed by the application of CAM systems in the construction industry. The objective of the practical part of this thesis is a production of polystyrene molds for precast elements of complex shapes by using CAD/CAM and CNC technology and point out the application of these technologies in production of atypical prefabricated construction elements.

## **Keywords**

CAD/CAM, CNC milling, prefabricated elements, production technology, formwork

## Obsah

Úvod.....	10
TEORETICKÁ ČÁST	
<b>1. Počítačem podporované systémy .....</b>	<b>11</b>
1.1 Charakteristika počítačem podporovaných systémů.....	11
1.1.1 CAD – počítačem podporovaný návrh. ....	11
1.1.2 CAM – počítačem podporovaná výroba. ....	11
1.1.3 CAE – počítačem podporované inženýrství .....	13
1.1.4 CAPP - počítačová podpora návrhu a tvorby technické dokumentace .....	13
1.1.5 CAPE – počítačová podpora výrobního inženýrství .....	14
1.1.6 CAQ – počítačová podpora řízení kvality výroby .....	14
1.1.7 CIM – počítačem integrovaná výroba.....	14
1.2 Historický vývoj CAD/CAM systémů .....	16
1.2.1 Vývoj NC a CNC strojů .....	16
1.2.2 Vývoj CAD/CAM systémů .....	17
1.3 CAD/CAM systémy .....	19
1.3.1 Software pro CAD/CAM .....	20
<b>2. Technologie CNC frézování.....</b>	<b>23</b>
2.1 Charakteristika CNC strojů .....	23
2.2 CNC frézování.....	24
2.3 Strategie frézování.....	25
2.3.1 Hrubovací strategie.....	26
2.3.2 Dokončovací strategie .....	27
2.3.3 Speciální strategie .....	27
2.4 Technologie frézování tvarových ploch.....	28
2.4.1 3 osé frézování tvarových ploch.....	28
2.4.2 Víceosé frézování tvarových ploch .....	29
2.4.3 Oblast využití frézování tvarových ploch .....	29
<b>3. Prefabrikované stavební dílce.....</b>	<b>31</b>

3.1 Typizace a unifikace pro prefabrikaci.....	31
3.2 Legislativa – definice a požadavky .....	31
3.3 Značení stavebních dílců.....	32
3.4 Druhy betonových dílců dle použití .....	33
<b>4. Technologie výroby betonových a železobetonových dílců .....</b>	<b>33</b>
4.1 Členění výroby z hlediska technologické specializace.....	34
4.2 Členění výrobního procesu .....	34
4.3 Pomocné úseky a operace .....	35
4.3.1 Skládka surovin.....	36
4.3.2 Doprava surovin a materiálu .....	36
4.3.3 Vývoz dílců.....	36
4.4 Souběžná výroba.....	36
4.4.1 Výroba betonové směsi.....	37
4.4.2 Výroba výztuže.....	37
4.5 Hlavní výroba.....	38
4.5.1 Příprava formy.....	39
4.5.2 Vyztužování.....	40
4.5.3 Ukládání čerstvého betonu do formy.....	40
4.5.4 Zhutňování betonových směsí .....	40
4.5.5 Urychlování tvrdnutí betonu .....	41
4.5.6 Odformování dílců.....	42
<b>5. Příklady využití CAD/CAM systémů ve stavebnictví.....</b>	<b>43</b>
5.1 BMW pavilon „The Bubble“, Frankfurt, 1999.....	43
5.2 Zollhof Tower, Düsseldorf, 2000.....	43
5.3 Autobusová zastávka, Hoofddorp, 2003 .....	44
<b><u>PRAKTICKÁ ČÁST</u></b>	
<b>6. Předmět a cíle výzkumu.....</b>	<b>46</b>
<b>7. Postup výroby forem a betonových prvků .....</b>	<b>47</b>
7.1 Tvorba CAD modelu prvků a forem .....	47
7.2 Aplikace CAM systému Autodesk FeatureCAM.....	49

7.2.1 Import modelu formy a definice polotovaru .....	50
7.2.2 Volba obráběcích operací .....	50
7.2.3 Simulace a verifikace obrábění forem .....	52
7.2.4 Optimalizace obráběcích procesů .....	53
7.2.5 Tvorba NC programu .....	54
7.3 Výroba forem .....	54
7.3.1 Obráběcí stroj.....	55
7.3.2 Volba materiálu forem .....	56
7.3.3 Nahrání NC kódu do obráběcího stroje .....	57
7.3.4 Upnutí polotovaru a volba řezných nástrojů .....	58
7.3.5 Průběh frézování forem.....	59
7.4 Volba odformovacího přípravku .....	61
7.4.1 Výroba zkušebních forem a aplikace prostředků.....	62
7.4.2 Odformování zkušebních forem .....	63
7.4.3 Vyhodnocení odformovacích přípravků .....	64
7.5 Ošetření a betonování forem .....	65
7.6 Odformování betonových prvků .....	67
<b>8. Zhodnocení výroby forem a betonových prvků .....</b>	<b>69</b>
8.1 Zhodnocení práce v CAM systému .....	69
8.2 Zhodnocení výroby forem a dílců.....	69
8.3 Návrhy pro další výzkum .....	70
8.4 Technologické zhodnocení .....	70
<b>Závěr.....</b>	<b>72</b>
Seznam použité literatury .....	73
Seznam zkratk.....	76
Seznam obrázků a tabulek .....	77



## Úvod

Rapidní vývoj informační technologie ke konci 20. století znamenal revoluci ve výrobních procesech, kdy byly implementovány systémy počítačem podporovaného navrhování a výroby. To vše přineslo automatizaci výrobních procesů, která je dnes běžná snad ve všech průmyslných odvětvích. Ve stavebnictví je automatizace spíše ojedinělá, což je dáno tím, že stavba představuje nesmírně komplexní proces. Částečně probíhá při výrobě prefabrikovaných stavebních dílců.

Využití moderních informačních systémů změnilo také pohled na navrhování budov. Architektonické návrhy jsou v dnešní době podstatně složitější než dříve a zvyšují tak nároky na realizaci staveb. Nicméně využití těchto systémů v oboru stavebnictví je výrazně pozadu oproti jiným průmyslovým odvětvím. Je proto potřeba hledat nové progresivní výrobní technologie.

Cílem práce je seznámení se systémy počítačové podpory a základní přiblížení technologie CNC frézování. Následně ukázat na příkladech zahraničních projektů, jak již byly tyto technologie použity při realizaci staveb.

Hlavním cílem diplomové práce je poukázat na aplikace CAM systému a CNC technologie při výrobě stavebních prefabrikovaných dílců. Praktická část se věnuje návrhu a následné výrobě polystyrenových forem pro betonové prvky s vysokou tvarovou složitostí za využití CAD a CAM softwaru a CNC obráběcího stroje. Následuje vyhodnocení výroby a zamyšlení nad možným využitím při výrobě atypických betonových dílců.

## TEORETICKÁ ČÁST

### **1. Počítačem podporované systémy**

#### **1.1 Charakteristika počítačem podporovaných systémů**

##### **1.1.1 CAD – počítačem podporovaný návrh.**

CAD (Computer Aided Design) je modul pro počítačovou podporu konstruování. Jedná se o konstrukční návrh nové součásti, kdy celá geometrie je interaktivním způsobem modelována a zobrazována ve skutečné reálné formě. Je to tedy souhrn prostředků pro vytváření geometrických modelů [4]. Jednotlivé informace reprezentující geometrický model jsou ukládány do databáze, která tvoří základ modelu.

Prostorový model se dělí na drátový, plošný a objemový.

- Drátový model – je tvořen body, které jsou spojené v křivky.
- Plošný geometrický model – je určen hranami, vrcholy a stěnami.
- Objemový model (solid) – se skládá z geometrických těles zabírající určitý objem v prostoru.

Geometrický model je tvořen konstrukčními prvky, jako jsou body, přímkami, kružnice, křivky atd. Jednotlivým hranám lze přiřadit různé atributy např. typ čáry, barva, kóta, text. S objekty je možné dále prostorově manipulovat a měnit jejich tvar. Výstupem těchto operací jsou CAD data (modely, výkresy, sestavy), se kterými se dále pracuje v jiných CA systémech.

##### **1.1.2 CAM – počítačem podporovaná výroba.**

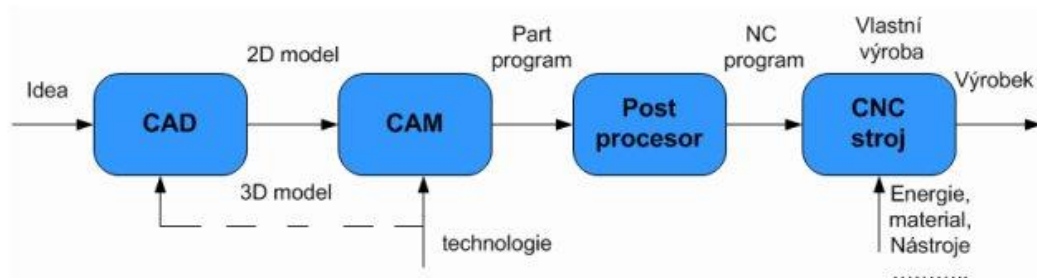
CAM (Computer Aided Manufacturing) označuje systém, který připravuje data a programy pro řízení numericky řízených strojů pro automatickou výrobu součástí. Tento systém využívá geometrické a další informace vytvořené ve fázi návrhu v systému CAD [4]. V užším pojetí představuje CAM automatizované operativní řízení výroby na dílenské úrovni a zahrnuje přímé řízení NC techniky, robotů, mezioperační dopravu materiálu, polotovarů, výrobků a nástrojů.

Nejběžnější užití počítačem podporované výroby je ve strojírenském průmyslu, kde CAM systémy simulují práci nástrojů v nejrůznějších technologiích obrábění. Nejprve CAM modul vytvoří tzv. **partprogram**, který je tvořen geometrickými a technologickými daty, jenž se postupně do CAM systému zadávají. Tím je jednoznačně popsán obráběcí postup pro bezpečný chod výroby. Při tvorbě partprogramu se vychází z těchto údajů [5]:

- geometrie stroje (souřadný systém, orientace os, nulové body),
- geometrie polotovaru (možnost kolize, umístění obrobku v souřadné soustavě stroje),
- geometrie nástroje (rozměry, tvar, korekce dráhy nástroje a tvar obrobku),
- geometrie výsledného obrobku (daná výkresem-modelem součástí),
- technologické a řezné podmínky (procesní prostředí, řezná rychlost, posuv, hloubka řezu, apod.),
- ostatní podmínky důležité pro činnost obráběcího stroje (pozice nástrojů, korekcí atd.).

Z partprogramu se dále vytváří **postproces** přímo pro konkrétní NC stroj a použitý řídicí systém. Postprocesor přihlíží k pracovním možnostem stroje a určuje rozmístění pozic nástrojů zásobníku, konečné otáčky vřetene a rychlosti posuvu. Dráhy nástrojů se transformují do souřadného systému stroje. Postprocesor tedy funguje jako překladač obsahující sadu instrukcí, pomocí kterých se převádí data vygenerovaná CAM systémem do NC programu, což je řeč, která je srozumitelná pro řídicí systém zvoleného CNC obráběcího stroje.

Postup výroby od CAD návrhu až po výrobu CNC strojem je zjednodušeně znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. č. 1: Postup výroby pomocí CAD/CAM systémů, zdroj: [6]

Samostatnou kapitolou CAM systémů je programování výrobních robotů. Ty na rozdíl od CNC strojů řeší transport zpracovaného materiálu mezi jednotlivými výrobními operacemi. S programováním výrobních robotů souvisí následující moduly [5]:

- CATS (Computer Aided Transport and Store) – počítačová podpora řízení dopravy a skladů,
- CAA (Computer Aided and Assembly) – počítačová podpora montáže výrobků,
- CARC (Computer Aided Robot Control) – počítačová podpora řízení a programování robotů a manipulátorů.

### 1.1.3 CAE – počítačem podporované inženýrství

Systém CAE (Computer Aided Engineering) analyzuje geometrická data získaná při tvorbě CAD modelů a umožňuje tak simulovat a studovat navržený objekt v extrémních pracovních podmínkách. Model se posuzuje ze stránky statické i dynamické a prověřuje se kinematika nebo i přestupy tepla apod. [5].

### 1.1.4 CAPP - počítačová podpora návrhu a tvorby technické dokumentace

CAPP (Computer Aided Process Planning) modul pracuje s CAD daty na základě konstrukční dokumentace pro tvorbu technologické dokumentace

včetně výběru strojů a zařízení pro výrobu. CAPP tvoří důležité propojení mezi CAD/CAM systémy a jeho výstupem jsou různé formy technologické dokumentace a NC programy [5].

### **1.1.5 CAPE – počítačová podpora výrobního inženýrství**

CAPE (Computer Aided Production Engineering) lze také chápat jako počítačem podporovanou technologii výroby. Tento systém zahrnuje počítačem řízenou podporu veškerých činností spojených s výrobou součástky od programování výrobní techniky až po provádění diagnostických měření.

Systém automatizované tvorby technologických postupů má za úkol určit nejvhodnější výrobní technologii a pro jeho tvorbu se často využívají znalostní databáze obsahující veškeré potřebné informace (podnikové metody a postupy, stroje, nástroje, přípravky, atd.). Výsledkem je technologický postup, NC program, seznam použitých strojů a nástrojů, odhad nákladů a potřebného strojního času [5].

CAPE tvoří subsystém počítačem integrované výroby a s jeho pomocí lze dosáhnout zvýšení kvality, snížení nákladů výroby a zkrácení času uvedení výrobku na trh.

### **1.1.6 CAQ – počítačová podpora řízení kvality výroby**

CAQ (Computer Aided Quality) představuje nástroj, jenž vstupuje do procesu technické přípravy a samotné výroby a prolíná se tak se všemi CA systémy. Jedná se o zabezpečení kontroly výrobku a řízení kvality výroby. Mezi hlavní úkoly kontroly patří prověřování výrobních plánů, kontrola výrobní dokumentace, technická diagnostika výrobních zařízení a automatizovaná výstupní kontrola. Cílem CAQ modulu je zvýšit kvalitu výrobku vlastního výrobního procesu a zkrátit zpětné působení vyhodnocených jakostních parametrů na výrobní a předvýrobní etapy [5].

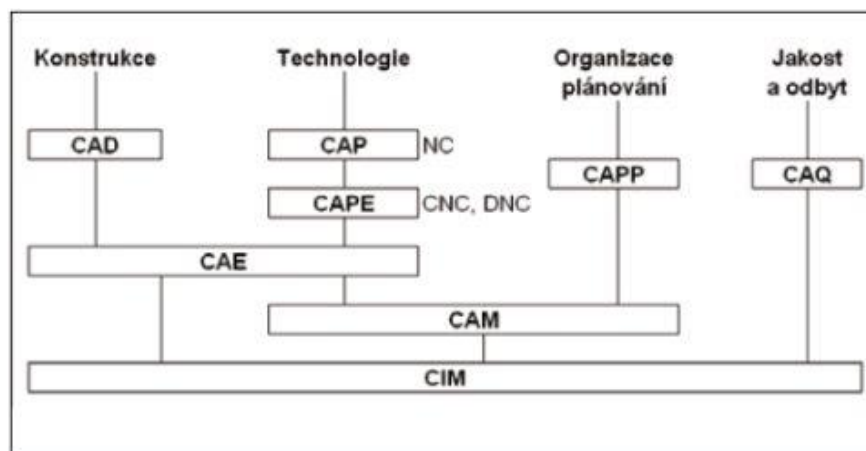
### **1.1.7 CIM – počítačem integrovaná výroba**

Systém CIM (Computer Integrated Manufacturing) zahrnuje řízení celého výrobního podniku. Jedná se o nasazení informačních technologií do

všech výrobních činnostech, od návrhu výrobku až po jeho výrobu a expedici. CIM v sobě zahrnuje CAD, CAM a CAE moduly. Cílem této integrace je [5]:

- snížení materiálové a energetické náročnosti,
- zvýšení produktivity práce,
- snížení skladových zásob,
- zkrácení předběžné doby vývoje a výroby,
- zvýšení časového a výkonového využití výrobních zařízení,
- zvýšení kvality výroby a výrobků,
- zlepšení hygieny práce.

Využití komplexních CAD/CAM/CAE systémů je velmi efektivní neboť se výrazně snižuje doba vývoje výrobku i doba jeho uvedení na trh. Tím že jsou systémy propojené navzájem i s výrobním a montážním provozem, je možné ihned zpětně získávat informace a dochází tak k efektivnímu využití moderních počítačových metod.



Obr. č. 2: Struktura CIM, zdroj: [9]

Struktura CIM systému se skládá ze třech hlavních komponent [3]:

- **Tvrdá automatizace** (automatizace výrobních systémů) – pružné výrobní a montážní systémy, obráběcí stroje, robotika, sensorika, počítačová architektura, měřicí a regulační technika,

- **Měkká automatizace** (automatizace inženýrských činností) – činnosti zabezpečující počítačem podporované systémy, problematika operačních systémů,
- **Integrace/strategie**

CIM při zkracování a optimalizování vývojového a výrobního procesu založený na dvou významných technologiích. Jedná se o Rapid prototyping (rychlá výroba prototypů pomocí technologie 3D tisku) a Concurrent engineering (soubežné neboli paralelní inženýrství). Jako nejprogresivnější a jediné možné softwarové nástroje pro tyto technologie jsou CAD/CAM systémy [3].

## 1.2 Historický vývoj CAD/CAM systémů

Historie CAD/CAM systémů je úzce spjata s vývojem počítačové techniky v druhé polovině 20. století. První systémy vznikly pro oblast obrábění a dodnes mají na tomto trhu dominantní postavení. Od použití dřevných pásek a štítků, až po zavedení číslicového řízení pomocí počítače (CNC). To vše znamenalo zvýšení efektivity a produktivity výrobních procesů. V dnešní době se CNC stroje používají k hromadné, sériové či ke kusové výrobě. CAD/CAM systémy jsou nenahraditelnými pomocníky při navrhování a výrobě prvků v různých průmyslových odvětvích.

### 1.2.1 Vývoj NC a CNC strojů

Současné moderní počítačem číslicově řízené stroje (CNC) vychází z protokolů starších číslicově řízených strojů (NC), které byly vyvinuty v polovině 20. století. Tehdy po druhé světové válce hledalo Letectvo Spojených států amerických novou mnohem přesnější metodu pro výrobu leteckých součástí. To vedlo Johna Parsona, prezidenta společnosti Parsons Works, k myšlence automatického obrábění a vyvinutí stroje poháněného pomocí servomotorů.

V padesátých letech Parson spolupracoval na vývoji číslicově řízených strojů spolu s Massachusettským technologickým institutem (dále jen MIT) ve městě Cambridge. V roce 1952 zde byl úspěšně předveden první tří-osý

číslicově řízený obráběcí stoj. Pro přenos dat sloužily děrné štítky, které se vkládaly do veliké řídicí jednotky. Děrný štítek představoval část programovacího kódu pro NC stroj. O sedm roků později byl na MIT vyvinut systém pro automatizované programování NC strojů APT (Automatically Programmed Tool). Téhož roku byl v bývalé Československé socialistické republice zaveden první NC stroj s vlastním řídicím systémem vyvinutý společností Škoda Plzeň.

V roce 1961 americká společnost Boeing zavádí do výroby první NC stroj. Do roku 1964 už po celém světě v provozu více jak 35000 těchto strojů. NC stroje byly průmyslovým standardem až do konce šedesátých let, kdy byly představeny první počítačem číslicově řízené stroje (CNC). Technologie CNC následuje stejné principy stanovené číslicově řízenými protokoly, avšak děrné štítky nahrazují mnohem vyspělejší počítačové softwarové programy. CNC stroje tedy velmi rychle nahradily své starší předchůdce [10].

V 70. a 80. dochází k podstatným změnám ve výrobním průmyslu, kdy jsou CNC stroje masově zahrnovány do výrobních procesů a to díky lepší cenové dostupnosti. Vše je úzce spjato s rychlým vývojem počítačů. Postupně se zlepšuje přesnost a produktivita strojů, roste variabilita obráběných dílů.

Do přelomu tisíciletí prošly CNC stroje mnoha generačními obměnami. Ve 21. století byl zahájen vývoj nové generace obráběcích center. Jedná se především o multifunkční stroje s plnou integrací CAD/CAM systémů. Posiluje se provázanost na externí počítačové stanice. Snaha je o minimalizaci časů výměn nástrojů a obrobků a dálkovou diagnostiku. Mezi poslední technologie patří suché víceosé a vysokorychlostní obrábění a ultra přesné obrábění (desetiny mikrometru) [11].

### **1.2.2 Vývoj CAD/CAM systémů**

Úplné počátky CAD sahají až do čtvrtého století před naším letopočtem, kdy řecký matematik a geometr Eukleidés sepsal třináct knih, známé jako „Základy“. V těchto učebnicích matematiky je definována tzv. Eukleidovská geometrie, na níž jsou v podstatě postaveny dnešní CAD softwary [7].

Hlavní mezníky systémů počítačové podpory, u kterých došlo k zásadním zvrátům jak v technologii, tak i v organizaci výroby, jsou [4]:



- ✚ 1950 - vynález světelného pera (prvopočátek kreslení),
- ✚ 1952 - aplikace numericky řízených strojů,
- ✚ 1960 - řízení pomocí číslicového počítače,
- ✚ 1970 - vznik koncepce CNC strojů,
- ✚ 1973 - poprvé definována počítačem integrovaná výroba
- ✚ 1980 - integrované CAD/CAM systémy,
- ✚ 1990 – systémy pro plánování a řízení výrobního procesu, plné uplatnění filosofie CIM

Vynález světelného pera v roce 1950 znamenal prvopočátek kreslení na počítači. Světelným perem se kreslilo na obrazovku jako na digitální papír (počítačový myš byla vynalezena až v roce 1965). Namalovaný obraz zůstával elektrostaticky zachycen na stínítku obrazovky, která sloužila zároveň jako paměť.

První CAD software vznikl na MIT, kde student Ivan Shutherland ve své disertační práci z roku 1962 vytvořil kreslicí program nazvaný Sketchpad. Sketchpad byl velmi inovativní CAD software využívající již výše zmíněné světelné pero. Díky velmi vysoké ceně počítačů bylo první komerční využití pouze ve velkých firmách působících v leteckém či automobilovém průmyslu. První generace těchto softwarů byly z dnešního pohledu primitivní, kreslení představovalo jednoduché dvou-rozměrné úlohy. Zprvu si firmy tyto softwary nechaly vyvíjet pomocí vlastních vývojových týmů. Jmenujme např. McDonnell-Douglas (CADD vydán 1966), Ford (PDGS vydán 1967), Lockheed (CADAM vydán 1967) a spousty dalších. V USA také vznikají první firmy specializované na vývoj a prodej CAD/CAM systémů (Applicon, Calma, Computervision, Gerber) [7].

V sedmdesátých letech byl významný nástup minipočítačů a hardwarového zlepšení. Dochází také ke značnému vyvíjení počítačové grafiky a začíná být stále větší zájem o komerční 3D CAD software. Právě vyvinutí komplexního softwaru pro 3D modelování se stává velkým milníkem v tomto desetiletí. První počítačový program pro tvorbu 3D objemových modelů vzniká v roce 1972. ve společnosti MAGI (Mathematics Application Group, Inc.). Tento program nazvaný 3D CAD Syntha Vision byl využíván pro

3D analýzu účinků radioaktivního záření. Nicméně první plnohodnotný program pro tvorbu 3D solid modelů BUILD vznikl v roce 1978 na univerzitě v Cambridge. O rok později vzniká také 3D průmyslový standard pro výměnu dat mezi konstrukčními systémy IGES (Initial Graphic Exchange Specification). Jedná se o neutrální datový formát, který se používá dodnes [7].

V roce 1973 byl poprvé definován pojem počítačem integrovaná výroba. Učinil tak Joseph Harrington ve své knize „Computer Integrated Manufacturing“, která vzbudila ve světě mimořádnou pozornost. CIM systém je pravděpodobně nejdůležitější filozofií současného chápání řízení výroby [3]. CAM systémy pomalu vznikají v sedmdesátých letech, ale jejich hlavní rozvoj a uplatnění přichází o dekádu později. Rychlé rozšíření CNC řízených strojů, které začaly efektivně využívat CAD data u oblasti návrhu, přináší velký průlom v technologiích pro podporu návrhu a výroby. Velké softwarové společnosti vyvíjejí komplexní systémy a tak vznikají integrované systémy počítačového návrhu, konstruování a výroby (CAD/CAM). Asi nejznámější 3D CAD/CAM systém je CATIA od francouzské společnosti Dassault Systèmes, první oficiální verze vyšla v roce 1981. CATIA se dodnes převážně využívá v leteckém a automobilovém průmyslu ale i ve stavebnictví.

V devadesátých letech se začíná naplno uplatňovat myšlenka počítačem integrované výroby. Tedy nasazení informačních technologií do všech výrobních činností, od návrhu výrobku až po jeho výrobu a expedici. Systém CAM tedy pomáhá řídit výrobu a zahrnuje tak fáze plánování i přípravy a řízení výroby. Postupný vývoj systému CAM do značné míry souvisel i s vývojem NC a CNC technologií [26].

### **1.3 CAD/CAM systémy**

CAD/CAM systémy představují integraci v CA systémech a to konkrétně mezi CAD a CAM. Pojem CAD/CAM systém lze chápat v těchto třech rovinách [3]:

- CAD/CAM systém jako útvar v rámci podnikového CIM,
- CAD/CAM jako technologie,

- CAD/CAM jako software.

CAD/CAM systém jako počítačem podporovaný útvar v rámci CIM znamená, že tento systém zabezpečuje veškeré činnosti a funkce spadající pod oba tyto CA systémy, s propojením na přímé vazby na ostatní CA systémy.

CAD/CAM technologii lze chápat jako využití počítače pro vykonávání určitých funkcí jak v předvýrobních etapách, tak i v samotné výrobě. Tato technologie představuje maximální možnou integraci předvýrobních a výrobních procesů ve všech průmyslových činnostech. Vyvíjí se směrem k vyšší integraci předvýrobních a výrobních fází, které byly dříve chápány jako oddělené činnosti výrobního podniku [3].

### **1.3.1 Software pro CAD/CAM**

Podstatná charakteristika současných CAD/CAM softwarů je, že dokáží generovat NC programy přímo z modelu. Podle rozsahu, účelu a ceny lze rozdělit software do následujících skupin:

- malý CAD software,
- střední CAD software,
- malý CAM software
- velký CAM software
- velký CAD/CAM software

Malé CAD software představuje poměrně levné řešení pro kreslení a skicování jako je např. Autosketch, Corell Draw apod. Do skupiny středního CAD SW patří programy podporující úplný 2D a 3D design. Typickým zástupcem je AutoCAD. Malý CAM software představuje jednoduchou aplikaci pro tvorbu NC programů pro jednu konkrétní technologii obrábění s malým rozsahem technologických možností. Model součástky je převzatý z některé CAD aplikace. Oproti tomu velké CAM softwary dokáží velmi efektivně a lehce řešit úlohy 3D až 5D obrábění, 3D složitých ploch s množstvím technologických řešení a postupů. CAD model se opět musí

importovat. Mezi velmi výkonné CAM softwary patří např. PowerMill nebo SolidCAM [3].

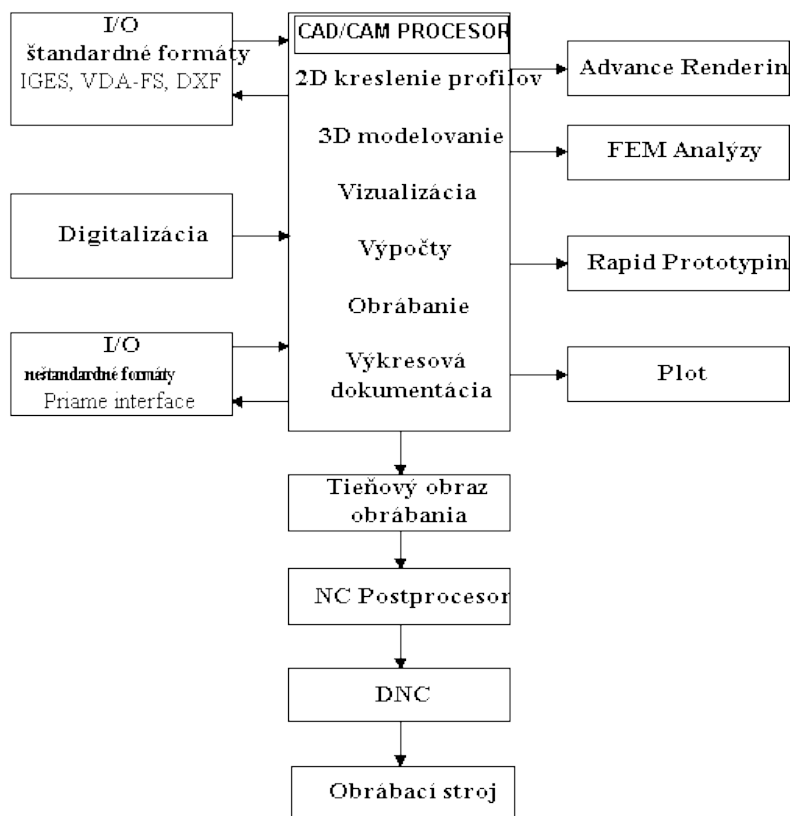
Velké CAD/CAM softwary podporují návrh 3D modelu a kompletní 3D – 5D simulaci obrábění. Obecně představují velmi výkonná a komplexní řešení pro firmy. Mezi nejznámější a největší CAD/CAM softwary lze zařadit FeatureCAM (Autodesk), CATIA V5 (Dassault Systemes), Mastercam (CNC Software), Surfcam (Hexagon Manufacturing Intelligence).

Všechny CAD/CAM systémy mají společné tyto aspekty:

- počítačovou grafiku,
- společnou databázi,
- grafickou vizualizaci.

Společná databáze umožňuje tzv. princip modulárnosti. To znamená, že každý CAD/CAM se skládá z několika samostatných modulů a přes společnou databázi je umožněno využívat výsledky jiných modulů. Počet a rozsah modulů závisí na složitosti konkrétní řešené úlohy. Všechny CAD/CAM softwary mají několik základních modulů tvořící funkční minimum CAD/CAM systémů, ke kterým lze dále přidávat specializované moduly. Hlavním CAD/CAM modulům v oblasti obrábění patří [3]:

- modul pro správu dat,
- modul pro 2D skicování a kreslení křivek
- modul pro 3D modelování
- modul pro simulaci obrábění
- modul pro vstup/výstup dat.



Obr. č 3: Schéma modulů v sestavě CAD/CAM, zdroj: [9]

## 2. Technologie CNC frézování

### 2.1 Charakteristika CNC strojů

Hlavní předností CNC strojů je velmi snadný přechod mezi jednotlivými typy vyráběných součástí. Přechod z jednoho typu výrobku na jiný se provádí změnou řídicího NC programu, který využívá seřízeného nástrojového a měřicího vybavení. Další významnou předností CNC strojů je jejich zcela automatický chod. Ovládání veškerých funkcí (jednotlivé pohyby rezného nástroje, nastavení pohybových rychlostí i otáček nástrojů, výměny nástrojů nebo obrobků pro jednotlivé výrobní operace atd.) probíhá postupným zpracováním jednotlivých řádků NC programu. Všechny informace, které jsou nutné pro obrobení součástí, jsou předem zaznamenány formou řad alfanumerických znaků. Mezi tyto nezbytné výrobní informace patří rozměry obráběného prvku, otáčky rezného nástroje, posuvné rychlosti a další rezné podmínky[26].

CNC stroje jsou plně uzpůsobeny pro práci v automatickém režimu. Programování se provádí pomocí ovládacího komunikačního panelu na CNC stroji nebo externě prostřednictvím výkonných počítačových stanic. Klíčovou záležitostí pro obráběcích procesy je správný zápis řádků v NC programu vytvořeným CAM softwarem [26]. Znalost struktury NC programů a formátu programových řádků je zcela nezbytné pro ruční programování a pro tvorbu nebo úpravu jednotlivých postprocesorů, které se liší podle výrobců CNC strojů. Proto např. pro stroj s řídicím systémem Heidenhain je potřeba vygenerovat odlišný NC program než pro stroj s řídicím systémem FANUC.

CNC stroje můžeme rozdělit na následující druhy [26]:

- CNC soustružnické stroje,
- CNC vyvrtávací stroje,
- CNC frézovací stroje,
- CNC brousicí stroje,
- CNC obráběcí centra na nerotační součásti,
- těžké CNC obráběcí stroje,

- CNC stroje pro vysokorychlostní obrábění,
- CNC stroje s nekonvenční kinematickou strukturou,
- CNC automatizované výrobní soustavy.

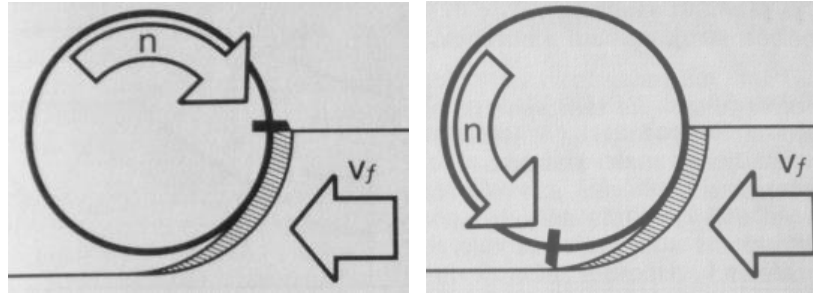
Moderní CNC stroje mohou mít až 5 os řízených najednou. Pětiosé obrábění může být řešeno pomocí posuvu vřeteníku os X, Y, Z, naklápění kolébky (osa A nebo B) a otáčením stolu (osa C). Dalším způsobem pětiosého frézování může být použití úhlové frézovací hlavy, kde posuv stolu koná pohyby v osách X, Y, Z a úhlová hlava realizuje výkyvné pohyby v osách B a C [23].

## 2.2 CNC frézování

Frézování je jednou z metod třískového obrábění. Třískové obrábění frézováním je obrábění rotujícím nástrojem (zpravidla se jedná vícebřitou frézu), jehož poloha se vzhledem k obrobku plynule mění po naprogramované dráze. Posuvný pohyb nástroje je možný téměř v libovolném směru. Díky tomu je frézování velmi univerzální a současně efektivní metodou třískového obrábění. Propojením rotačního a posuvného pohybu nástroje je zajištěno, že každý z břitů rezného nástroje odebírá objem materiálu ve formě třísek malých rozměrů nekonstantního průřezu[26]. Při frézování jsou běžně rozlišovány dvě základní orientace rezného nástroje vůči obrobku a to obvodové a čelní frézování. Vzhledem ke směru rotace nástroje a posuvu, lze frézování rozdělit na sousledné a nesousledné.

Při sousledném frézování je souhlasný směr rotace nástroje a posuvu obrobku. Tloušťka třísky materiálu je největší na počátku záběru a s posuvem klesá na nulu. Vyvíjené teplo je nižší než při nesousledném frézování [23].

Při nesousledném frézování je směr posuvu obrobku proti posuvu otáčení nástroje. Břit odřezává třísku z nulové hodnoty do maximální. Při najetí břitu do záběru vznikají velké rezné síly, které způsobují zpevněním povrchové vrstvy obrobku. Díky zpevnění je nástroj vystaven větším teplotám a třením a vzniká větší opotřebení. Při tomto druhu obrábění směřují rezné síly směrem vzhůru a zvedají obrobek. Proto je důležité stabilní upnutí obrobku na stole[23].



Obr. č 4: Sousedné (vlevo) a nesousedné (vpravo) frézování, zdroj: [26]

Mezi hlavní typy frézovacích operací lze zařadit [26]:

- rovinné frézování,
- čelní frézování do rohu,
- frézování tvarových ploch,
- frézování dutin,
- rotační frézování,
- frézování závitů,
- ponorné frézování,
- zahlubování,
- odvalovací frézování,
- frézování kotoučovou frézou
- frézování vysokými posuvovými rychlostmi.

Technologie frézování je dnes běžně rozšířena na CNC strojích. Moderní víceosé stroje kromě všech běžných aplikací umožňují i obrábění otvorů, dutin a povrchů, které se dříve výhradně soustružily nebo vyvrtávaly.

### 2.3 Strategie frézování

Frézovací strategie jsou metody, pomocí kterých CAM systém vypočítává dráhy nástrojů po obráběné ploše. Dráha nástroje se při frézování skládá ze tří pohybů [13]:

- **pracovní pohyb**, při kterém je realizováno vlastní řezání (odebírání materiálu ve formě třísky), se provádí pracovním posuvem (jeho



hodnota je závislá na použitém nástroji, obráběném materiálu a charakteru operace),

- **přesuny**, při kterých se nástroj přemísťuje pracovním posuvem bez řezání (náběh a výběh nástroje, překonávání drážek v příčném směru aj.),
- **rychloposuv** za účelem rychlého přemístění nástroje.

Strategie, jenž jsou běžně dostupné v CAM systémech, lze rozdělit na hrubovací, dokončovací a speciální. Hrubovací strategie jsou určeny k rychlému a hospodárnému odebrání co nejvíce materiálu a přiblížit tak výsledný tvar obráběného prvku. Při dokončování je obráběn zbylý materiál až k dosažení požadovaného tvaru. Mezi hrubovací a dokončovací operací může být i tzv. předdokončení. Speciální strategie slouží pro obrobení zbytkového materiálu v rozích, nebo obrábění tvarových ploch.

### 2.3.1 Hrubovací strategie

Mezi běžně používané hrubovací strategie patří [12], [13]:

- **Strategie hladiny Z** kopíruje konturu modelu po jednotlivých vrstvách s konstantní hloubkou záběru (osa Z). Po vyhrubování dané vrstvy se nástroj posune v ose Z o krok dolů a pokračuje v hrubování. Tato strategie v rozích vytváří zaoblené dráhy.
- **Řádkování** se využívá pro rychlé odebrání materiálu. Nástroj se pohybuje po jednotlivých řádcích, podle osy X nebo Y, dokud nedojede na konec obráběné plochy, kde se přesune o krok a pokračuje dále v řádkování.
- **Odvrtání** se využívá speciálních odvrtávacích nástrojů, pomocí kterých se odvrtává velké množství materiálu.
- **Kontura** se využívá pro obrysové prvky komplexního tvaru.

### 2.3.2 Dokončovací strategie

Mezi běžně používané dokončovací strategie patří [12], [13]:

- **Strategie spirála** se obrábí jediným spirálovým pohybem nástroje. Spirála může zároveň směřovat z vnějšku dovnitř či naopak z vnitřku ven. Dráhy nástroje jsou plynulé a s minimálními změnami směru.
- **Radiála** je strategie vhodná především pro obrábění oblých částí. Nástroj se pohybuje po modelu radiálou dovnitř a ven, kdy přechody mezi jednotlivými pohyby jsou pod určitým úhlem.
- **Řádkování** jako dokončovací strategie je určena pro dokončování horizontálních ploch. Materiál je odstraněn z obrobku s využitím paralelních řad, které kopírují osy X nebo Y. V ose Z tato strategie kopíruje tvar prvku.
- **Strategie hladina Z**, je klasická strategie, kdy se dráhy nástroje pohybují horizontálně po modelu v konstantní výšce Z s definovaným krokem dolů.

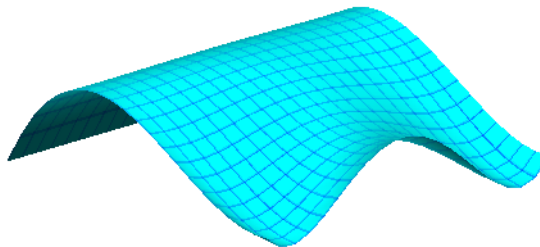
### 2.3.3 Speciální strategie

Mezi běžně používané speciální strategie patří [12], [13]:

- **Strategie zbytkového rohu** je určená pro dokončování zbytkových rohů, ve kterých zůstal neobrobený materiál po předchozích operacích vykonané většími nástroji.
- **Strategie tužkou** je obdoba strategie zbytkového rohu. Je tedy určená pro dokončení vnitřních ostrých rohů pomocí podélného jednopružkového pohybu nástroje.
- **Strategie 3D model** je vhodná pro obrábění tvarových ploch (freeform). Využívá se při ní hrubovací strategie kontura a dokončovací strategie řádkování, strategie hladiny Z nebo strategie spirála.

## 2.4 Technologie frézování tvarových ploch

Tvarové plochy mohou být pravidelné plochy (např. rovinné, polygonální, rotační, sférické, asférické plochy) nebo plochy nepravidelných tvarů (zborcené přímkové plochy, nesnadno definovatelné plochy) anebo plochy sestávající z dílčích elementů tvarově pravidelných nebo nepravidelných (prostorových těles, prohlubní, žlábků) [13]. Tvarová plocha je taky označována anglickým názvem jako freeform plocha. Výrobky s takto tvarově složitými plochami se běžně užívají např. v leteckém a automobilovém průmyslu, optice, a stále více i v architektuře.



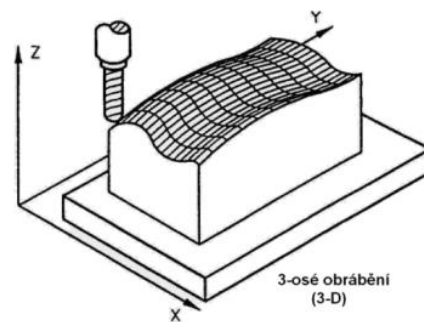
Obr. č.5: Příklad freeform plochy, zdroj: [32]

Pro výrobu složitých tvarových ploch je zapotřebí použít CNC obráběcí stroje se současným pohybem alespoň ve 3 osách. Obecné metody frézování tvarové plochy lze rozdělit na [5]:

- 3 osé frézování tvarových ploch,
- víceosé frézování tvarových ploch.

### 2.4.1 3 osé frézování tvarových ploch

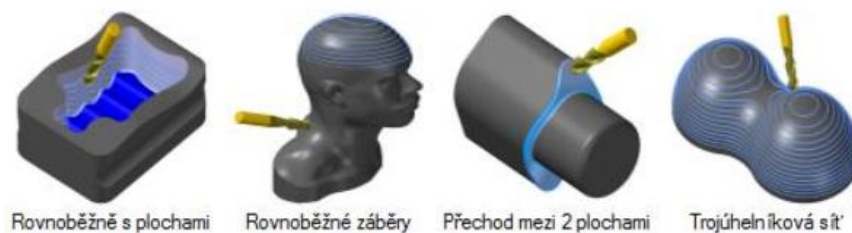
Běžnou obráběcí technologií je 3D - prostorové frézování nepravidelných ploch, k němuž se využívá CNC obráběcí stroj (frézovací centrum), pracující ve 3 přímkových osách X, Y, Z. Pohyb nástroje probíhá souběžně v těchto třech osách.



Obr. č. 6: Znárodnění frézování tvarové plochy na 3osé CNC fréze, zdroj: [5]

### 2.4.2 Víceosé frézování tvarových ploch

Pro potřeby moderního progresivního frézování prostorově náročných tvarových ploch je nutno použít víceosé prostorové obrábění. Nejběžnější technologií je 5tiosé frézování, kde 2 doplňkové osy zajišťují např. rotační pohyb (nasměrování, naklonění) obrobku a rotační pohyb (naklonění) vřetena. Obrábění ve všech osách může rovněž probíhat (souběžně). Především možnost naklonění vřetena hraje u víceosého frézování stopkovou frézou významnou úlohu, protože eliminuje tzv. mrtvý bod v ose frézy, kde je nulová řezná rychlost [13].



Obr. č. 7: Některé technologie 5ti osého frézování, zdroj: [5]

### 2.4.3 Oblast využití frézování tvarových ploch

Technologie CNC frézování tvarových ploch a parametrických ploch byla původně určena pro letecký a automobilový průmysl a průmysl zaměřený na energetiku. S rozšířením moderních CAD/CAM systémů si našla tato technologie uplatnění při výrobě elektroniky, lékařské techniky nebo třeba i optických čoček s vysoce definovaným tvarem povrchu. Ve strojírenské výrobě

se běžně metoda výroby tvarových ploch používá pro výrobu forem (pozitivní, negativní, dvoudílné) [13].

Dobré využití CNC technologie se našlo u opracování dřeva a to díky kompaktním CNC frézám nebo velmi specializovaným víceosým frézám, které dokáží obrábět více prvků najednou. Vyrábí se tak například některý nábytek jako jsou židle, stoly, skříně, postele, dále různé sloupky či dvevní křídla, okenní rámy nebo prvky schodišť (obrázek č. 8) [22]. U některých těchto prvků se využívá laserové skenování, kdy je hmotný prvek oskenován a z mráčna bodů se vytvoří velmi přesný digitální model.



Obr. č. 8: Speciální CNC frézovací stroje na obrábění dřevěných dílů, [22]

### **3. Prefabrikované stavební dílce**

Prefabrikace v současné době zahrnuje celou řadu specializovaných výrobních činností, které umožňují výrobu vysoce kvalitních výrobků pro různá odvětví stavebnictví. Ať už se jedná o betonové, ocelové, dřevěné, keramické skleněné, plastové dílce nebo jejich kombinací. V této a následující kapitole bude věnována pozornost betonovým stavebním dílcům.

#### **3.1 Typizace a unifikace pro prefabrikaci**

Základním předpokladem průmyslové výroby dílců je typizace a unifikace rozměrů, tvarů a jiných technických vlastností. Cílem typizace a unifikace je dosahovat maximální četnosti jednotlivých druhů (např. skupin dílců) a opakovatelnosti výrobních procesů [29].

Typem se rozumí produkt, který má typické rozměry, tvary a technické vlastnosti (objemová hmotnost, pevnost v tlaku, tahu, nenasákavost, mrazuvzdornost apod.). Pomocí typizace se také snižuje energetická náročnost výroby dílců a to díky dokonalému využití vlastností výrobních hmot. Unifikací rozměrů, tvarů nebo vlastností stavebních dílců lze dosáhnout zvýšení opakovatelnosti při jejich výrobních operacích. Účelem unifikace je i sjednocování výrobních a pracovních způsobů a postupů [29].

#### **3.2 Legislativa – definice a požadavky**

V nařízení vlády č. 163/2002 Sb. Kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky, jsou stanovena základní ustanovení pro stavební výrobky, dále požadavky na stavební technické osvědčení, technickou dokumentaci a postupy pro posuzování shody. V příloze č. 1 tohoto nařízení jsou stanoveny základní požadavky na stavební výrobky. Tyto základní požadavky musí být plněny při běžné údržbě po dobu jeho ekonomicky přiměřené živostnosti.

Základní požadavky na stavební výrobky dle nařízení vlády č. 163/2002 Sb. jsou:

- 1) Mechanická odolnost a stabilita
- 2) Požární bezpečnost
- 3) Hygiena, ochrana zdraví a životního prostředí
- 4) Bezpečnost při užívání
- 5) Ochrana proti hluku
- 6) Úspora energie a ochrana tepla

### **3.3 Značení stavebních dílců**

Prefabrikované stavební dílce jsou označovány pro snadnou evidenci, skladování, objednávání, montáž a také pro zvýšení odpovědnosti za jakost. Označení musí být vždy dobře umístěno, tak aby bylo viditelné nejenom při manipulaci, ale i při užívání dílců ve stavbě. Označení dílců obsahuje [29]:

- označení výrobního závodu,
- druh prefabrikátu,
- hlavní skladebný rozměr,
- použitá norma
- značka výrobní skupiny
- datum výroby
- značka jakosti
- jiné předepsané nebo odběratelem dohodnuté údaje.

V současnosti, při prosazování moderních technologií, se začínají prefabrikáty označovat také pomocí RFID (Radio-frequency identification) čipů. Pomocí chytrého telefonu nebo tabletu se dá čip jednoduše načíst a uživatel ihned vidí veškeré údaje o výrobku. Systém je schopný přečíst data i přes 30 cm tlustou vrstvu železobetonu. Není tedy potřeba, aby se uživatel bezprostředně přiblížil k požadovanému dílci [32].

### 3.4 Druhy betonových dílců dle použití

Betonové stavební dílce jsou vyráběny z betonu prostého, vyztuženého nebo předpjatého. Z tohoto hlediska se dílce rozlišují na:

- základové - patky, kalichy, pásy, prahy, piloty,
- svislé konstrukce vnitřní a vnější - sloupy, pilíře, panely, tvárnice,
- schodišťová ramena a podesty,
- vodorovné konstrukce – panely, stropní nosníky, stropní vložky, průvlaky, překlady,
- střešní dílce – vaznice, panely, atikové dílce,
- obkladové dílce fasádní, vnitřní, pro zvláštní účely,
- prostorové dílce – bytová jádra,
- ostatní dílce pro vybavení staveb – výtahové šachty, strojovny,
- dílce dopravních staveb,
- dílce pro rozvody inženýrských sítí – kanalizační trouby, šachty,
- dílce pro čistírny a úpravy vod,
- drobné betonové výrobky – dlažby, obrubníky, exteriérové a interiérové prvky
- zvláštní druhy dílců – příhradové a plnostěnné vazníky, stožáry, pražce.

## 4. Technologie výroby betonových a železobetonových dílců

Díky specializovaným výrobnám lze v dnešní době vyrábět vysoce kvalitní betonové a železobetonové dílce včetně takových, jejichž výroba tradičním monolitickým způsobem je při požadavku vysoké kvality provedení velmi obtížně proveditelná. Jedná se o tvarově složité plošné dílce nebo např. kanalizační trouby.

Výroba prefabrikovaných betonových dílců ve výrobních halách přináší řadu předností. Z velké části automatizovaná výroba prefabrikátů přináší zvýšení produktivity, efektivnosti práce a zlepšení kvality, která je velmi dobře



kontrolovatelná. Veškeré technologické procesy probíhají ve výrobních halách a tak je výroba nezávislá na povětrnostních podmínkách a ročním období. Nedochází tak k prodlužování doby výstavby. Je také umožněna výroba speciálních prvků složitých tvarů, která by byla na staveništi jen těžce nebo vůbec proveditelná [30].

#### **4.1 Členění výroby z hlediska technologické specializace**

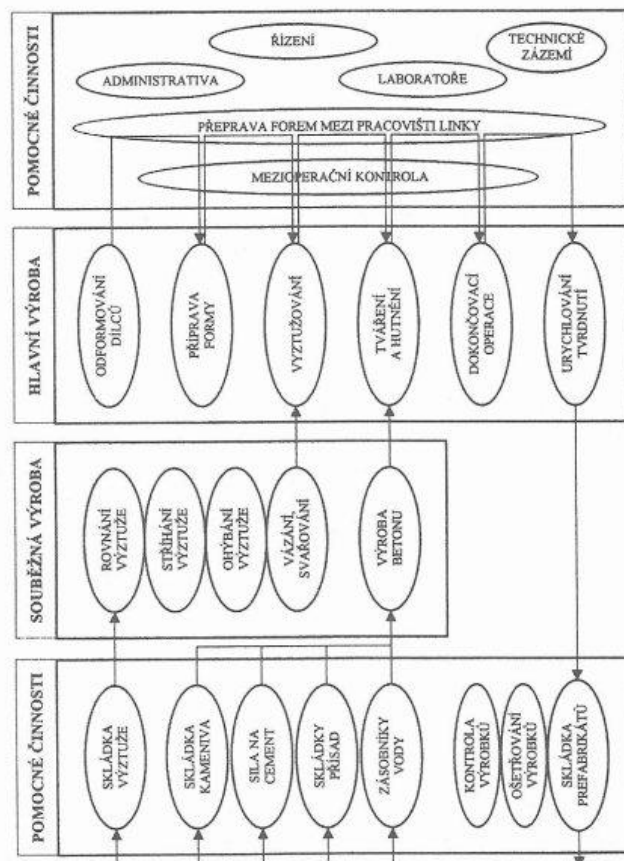
Dle množství vyráběných prvků stejného provedení lze výrobu dělit na kusovou, sériovou a hromadnou [29].

- Kusová výroba se týká malého počtu často atypických prefabrikátů. Výroba bývá pracnější a nákladnější jelikož výrobu nelze účinněji mechanizovat.
- Sériová výroba probíhá u výrobků stejného druhu či technologického charakteru. Tyto dílce jsou vyráběny postupně nebo střídavě po určitých počtech neboli sériích. Po vyrobení jedné série dílců se zařízení upraví na výrobu další série. Protože se obvykle jedná o typizované dílce tak se často vyrábí na sklad a expedují se později.
- Hromadná výroba probíhá u typizovaných a normalizovaných dílců.

#### **4.2 Členění výrobního procesu**

Výrobu prefabrikovaných betonových a železobetonových stavebních dílců probíhající ve specializovaných výrobních závodech lze dělit na tři základní subsystémy [30]:

- hlavní výroba,
- souběžná výroba,
- pomocné úseky a operace.



Obr. č. 9: Schéma výroby prefabrikátů ve výrobní hale, zdroj: [29]

Jednotlivé subsystémy budou popsány v následujících kapitolách.

### 4.3 Pomocné úseky a operace

Pomocné úseky a operace zajišťují plynulý chod hlavní a souběžné výroby. Jedná se o skládky pro složky betonu, vztuže, pomocných materiálů, hotových výrobků, dopravu a manipulaci se surovinami, formami, dále o vyvážku hotových dílců na skládku, jejich skladování a ošetřování i následnou expedici. Důležité je, aby požadavky hlavní a souběžné výroby byly sladěny s kapacitou skládek a dopravních systémů. Dále pod pomocné operace spadají kontroly kvality, mezioperační kontroly, laboratorní zkoušky materiálů a výrobků, administrativní a řídicí činnosti [30].

#### **4.3.1 Skládka surovin**

Skládka surovin zajišťuje plynulou výrobu i v případě výpadku dopravy. Kamenivo se skladuje na volných vnějších plochách dle frakcí tak, aby nedošlo k jejich míchání. Skladování cementu probíhá ve velkokapacitních kruhových silech a jejich počet závisí na počtu tříd betonu. Pro skladování tekutých přísad, jako jsou např. plastifikátory a provzdušňovadla, slouží speciální nádrže. Sypké látky jako příměsi do betonu se uchovávají v silech. Betonářská ocel pro výrobu výztuže se skladuje v zastřešených halách nebo venkovních skladech.

#### **4.3.2 Doprava surovin a materiálu**

Doprava kameniva do mísícího jádra je zajištěna pomocí pásových a korečkových dopravníků nebo výtahů s výsypnými nádobami (skipové výtahy). Dopravu cementu zajišťují pneumatické nebo šnekové dopravníky. Výztuž je do potřebných úseků výroby dopravována pomocí mostových jeřábů a plošinových nebo vysokozdvížných vozíků. Čerstvá betonová směs se na místo spotřeby dopravuje nejčastěji na podvěsných dráhách nebo pomocí rozvozových vozíků, čerpadel a jiných systémů.

#### **4.3.3 Vývoz dílců**

Vývoz hotových dílců z výrobní haly na skládku je zajištěn pomocí mostových jeřábů, kolových či kolejových vozíků popřípadě vysokozdvížnými vozíky v závislosti na velikosti a hmotnosti prefabrikátů. Skládky jsou navrženy na určitou kapacitu výroby a jejich plochy musí být rovné, zpevněné a odvodněné.

### **4.4 Souběžná výroba**

Souběžná výroba zahrnuje technologické systémy zaměřené na výrobu polotovarů, pomocných materiálů a energií pro hlavní výrobu. Nezbytně důležité jsou i další souběžné provozy jako zámečnická a truhlářská dílna pro výrobu a úpravu forem, výroba vodní páry na proteplování betonu, stlačeného vzduchu a další [30].

#### 4.4.1 Výroba betonové směsi

Výroba betonové směsi probíhá v betonárnách, které jsou součástí výrobního závodu. Využít lze i centrálních betonáren mimo vlastní závod. Betonárny se skládají ze zásobníků složek potřebných pro výrobu betonové směsi, dávkovacího zařízení, mísícího jádra (míchačka) a zařízení pro automatizaci výroby. Výroba betonové směsi podléhá normě ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

Míchačky jsou zpravidla s nuceným oběhem s horizontální či vertikální osou otáčení (buben míchačky je stabilní). Kapacita mísícího jádra odpovídá potřebám hlavní výroby. Dávkování složek betonu zajišťují jednotlivé dávkovače. Sypké přísady se dávkuje hmotnostně, tekuté potom objemově. Při dávkování rozptýlené výztuže (ocelové drátky, skleněná vlákna) je velmi důležité důkladné rozmíchání směsi, aby se vytvořily shluky této výztuže. Při dávkování vody, nejlépe pitné, se musí zohlednit aktuální vlhkost kameniva, zejména drobné frakce do 4 mm, protože obsahuje stále se měnící množství vody.

Obvyklé hodinové výkony betonáren se pohybují od 20 do 150 m<sup>3</sup>/hod v závislosti objemu míchaček a době míchání.

Při výrobě, dopravě a ukládání betonových směsí mohou vznikat zbytky o objemu 1 až 5 %, což v průměru představuje až 40 kg kameniva a 7 kg cementu na 1 m<sup>3</sup> betonu. Zbytková betonová směs se recykluje ve speciálním recyklačním zařízení a vytríděné složky se opět použijí k výrobě čerstvé betonové směsi [29].

#### 4.4.2 Výroba výztuže

Při výrobě výztuže se nejdříve výztužné prvky rozdělí do skupin podle technologické podobnosti, aby bylo možné vytvářet prvky s možností menších úprav stejnými postupy na stejných zařízeních. Tvary výztužných prvků musí být co nejjednodušší, aby byly proveditelné dostupnými mechanismy. Dělení výztužných prvků podle druhu a profilu oceli je následující [29]:

- ocel prutová rovná nebo ohýbaná,
- prvky ze svitkové oceli rovnané, stříhané, ohýbané nebo svařované,

- svařované sítě,
- rohože,
- válcované profily,
- předpínací výztuž,
- rozptýlená výztuž.

Výroba výztuže probíhá v armovnách. Výztužné prvky se postupně stříhají, rovnají, ohýbají a váží dohromady pomocí vázacího drátu popřípadě svažují dle výkresové dokumentace. Při zpracovávání výztuže se používají stroje jako stříhačky, rovnačky, ohýbačky, svařovací agregáty. Zajištění rozměrové přesnosti výztuže závisí zejména na přesnosti ohýbání, stříhání a kompletaci jednotlivých prvků. Nedodržení přesnosti výztužných celků může vést ke snížení tloušťek krycích vrstev výztuže.

#### **4.5 Hlavní výroba**

Hlavní výroba je složena z výrobních úseků produkujících prefabrikované stavební dílce. Výrobní mají většinou několik úseků hlavní výroby, kde se na každé vyrábí jiný prefabrikovaný prvek. Pod výrobním úsekem se rozumí ucelený technologický systém – výrobní linka, složený z dílčích výrobních operací. Rozlišují se dva systémy výroby a to na výrobu na místě a výrobu na lince [30].

##### **Výroba na místě**

Při výrobě na místě setrvává dílec i s částí výrobního zařízení (forma apod.) na jednom místě po celou dobu výrobního procesu. Pohyblivými prvky v této výrobě je obsluha výroby výrobního zařízení, která se přesunují od jedné formy ke druhé.

Mezi výhody výroby na místě patří zpravidla jednodušší výrobní zařízení a s ním spojené menší náklady na pořízení, menší spotřeba energie a kapacitní proměnlivost.

Dělení výroby na místě dle technologického systému je následující:

- výroba na výrobní podlaze,
- výroba v samostatně rozmístěných formách,
- výroba na dlouhých drahách.

### **Výroba na lince**

Výroba na lince se odlišuje od výroby na místě tím, že veškeré výrobní operace jsou rozloženy do několika pracovišť, která jsou seřazena do výrobní linky. Každé pracoviště na výrobní lince má jinou funkci, tím pádem i jiná výrobní zařízení. Dílec, který prochází pracovišti linky je postupně dokončován.

#### **4.5.1 Příprava formy**

Prázdnou formu, formovací dílce je potřeba před dalším použitím vyčistit odstranit zbytky betonu nebo jiných nečistot. Následuje její kompletace. Probíhají tedy úkony jako uzavření bočnic, vložení a fixace vložek pro tvorbu otvorů, osazení těsnění, profilovacích lišt a dalších součástí formy. Na takto sestavenou a čistou formu se nanese odformovací přípravek.

Výběr vhodného odformovacího přípravku závisí na materiálu formy, složení betonu, vytvářecí poloze a způsobu zhutňování betonové směsi. Nejčastěji se používají specializované nátěry a postřiky. Odformování dílců je závislé na odformovacím přípravku, který by měl splňovat určitá kritéria [29]:

- vysoká odformovací schopnost,
- nesmí dojít ke znečištění betonového povrchu,
- nesmí vnikat do betonu a zhoršovat jakost povrchů a životnosti
- pracnost nanášení by měla být minimální
- mají přispívat k usnadnění čištění forem,
- zdravotně a ekologicky nezávadné.

#### 4.5.2 Vyztužování

Vyztužování může probíhat ve formě vkládání již hotových výztužných celků (armokošů) nebo u tvarově složitých prvků postupným svazováním výztuže po částech přímo ve formě. Pro zajištění potřebného krytí výztuže se osazují distanční tělíska (plastová, betonová). Pro pozdější možnou manipulaci s prefabrikáty se do forem umisťují transportní kotvy. Při návrhu transportních kotev třeba respektovat rozměry, hmotnost prvku a jakým způsobem s ním bude manipulováno. Kotvy prvky nejsou součástí hlavní výztuže, proto musí být samostatně fixovány k bočnicím nebo podložkám formy a musí mít samostatnou kotevní výztuž [30].

#### 4.5.3 Ukládání čerstvého betonu do formy

Pro ukládání čerstvé betonové směsi se nejčastěji používají různé typy rozprostíračů (stabilní as pojízdné), které jsou konstrukčně uzpůsobeny tvarům a rozměrům formy a ukládají tak betonovou směs v libovolné části formy. Čerstvý beton je dopravován a ukládán do forem pomocí jeřábů se zavěšenými betonovacími koši nebo pomocí čerpadel a dopravníkových pásů.

#### 4.5.4 Zhutňování betonových směsí

Pro hutnění čerstvých betonových směsí se používají různé způsoby hutnění, kterými jsou vibrování, lisování, válcování, vibrolisování, vibrotažení, odstředivování, a vakuování [29], [30].

**Vibrování** je nejpoužívanější způsob pro hutnění čerstvého betonu. Během vibrování dochází ke snížení vnitřního tření betonu a dojde k jeho ztekucení. To má za následek, že beton dobře vyplní formu, vypudí se podstatná část vzduchu a zhutní se jeho struktura, což je nutné k dosažení požadované pevnosti. Vibrační zařízení funguje na principu rotujícího excentru, který vyvozuje vibrace. Zhutňování vibrací lze rozdělit na vnější (nepřímé) a vnitřní (přímé) [29]. U vnějšího vibrování je pomocí vibračního zařízení rozkmitána forma. Mezi vibrační zařízení patří vibrační stoly a prahy nebo menší příložné vibrátory. U přímé vibrace je betonová směs v přímém

kontaktem s budičem vibrací, nejčastěji to jsou ponorné vibrátory, vibrační trubky a jádra.

**Lisování** je způsobem hutnění, kdy se tlakovou silou působí na povrch čerstvého betonu. Konzistence betonu musí být pro tento typ hutnění relativně tuhá. Technologie lisování je vhodná pro zhutnění tenkostěnných dílců z jemnozrnných betonů.

**Válcování** je podobný způsob hutnění jako lisování, kde výrobky procházejí pod rotujícími válci, které tlakovou silou hutní beton a současně tvarují horní povrch. Válcování se používá pro suché betonové směsi a prvky s malou tloušťkou. Dílce se vyznačují vysokou rozměrovou přesností a kvalitním povrchem.

**Vibrolisování** kombinuje technologii vibrování a lisování. Jedná se o vysoce účinný způsob hutnění betonů s velmi tuhou konzistencí. Pomocí vnější vibrace dojde nejprve k důkladnému vyplnění formy betonovou směsí a následně k jejímu lisování. Dílce lze částečně odformovat ihned po zhutnění.

**Vibrotážení** je v podstatě nízkotlaké vibrolisování odehrávající se na výrobní dráze (lince), kde formy po naplnění betonovou směsí prochází vibrčním štítem a pod shrnovací lištou, která profiluje beton. Touto technologií se vyrábí betonové střešní krytiny.

**Odstředování** využívá rotující formy s betonovou směsí, kdy v důsledku působení odstředivých sil dojde k rozložení betonu po obvodu formy a jeho zhutnění. Touto technologií se vyrábí betonové roury a předpjáté stožáry.

**Vakuování** je speciální technologie, kdy je z čerstvého betonu uloženého ve formě opatřené vakuovacím štítem odsávám vzduch (podtlak přibližně 0,07 Mpa) spolu s přebytečnou vodou. Při odsávání betonu dochází k zahřátí betonu. Čerstvý beton, zbavený části vody a vzduchu, se stává mnohem soudržnější a kompaktnější a okamžitě získá pevnost 0,1 až 0,2 MPa. Doba vakuování záleží na tloušťce prvku a složení směsi.

#### 4.5.5 Urychlování tvrdnutí betonu

Účelem urychlení tvrdnutí betonu (UTB) je zrychlení nárůstu pevnosti ihned po betonáži a tím podstatně zkrátit pobyt dílce ve formě. Při normální



podmínkách dozrávání betonu možné odbedňovat nejdříve po 48 hodinách. Při UTB je možné tuto dobu zkrátit až na 8 hodin a tím zvýšit obrátkovost bednicích forem.

UTB lze dosáhnout bez působení zdroje tepla a to zvýšením hutnosti betonové směsi (snížení množství záměsové vody nebo zvýšení množství cementu při zachování stejného množství vody), použitím cementů s vyššími počátečními pevnostmi nebo použitím urychlovacích přísad. Druhou možností UTB je prohříváním betonu a to předeřevem složek betonu před mícháním, ohřev čerstvé betonové směsi před uložením do forem a nebo ohřev betonu po jeho uložení do formy (nasyčená vodní pára, topná voda, elektroohřev).

#### **4.5.6 Odformování dílců**

Beton musí před odformováním dosáhnout požadované pevnosti, která bude odpovídat charakteru zatížení při odformování a manipulaci s dílcem. Odformování dílců zahrnuje veškeré úkony pro vyjmutí dílce z formy. Provádí se uvolnění spojů, otevření formy (v závislosti na druhu formy to může také být odklopení, odsunutí, odložení bočnic apod.), vyjmutí vložek na vytváření otvorů, zavěšení dílce na jeřáb a jeho následné zvednutí [29]. U předpjatých betonových dílců se při odformování vnáší předpětí.

## 5. Příklady využití CAD/CAM systémů ve stavebnictví

Na následujících stránkách jsou uvedeny projekty budov, konstrukcí, kde bylo pro výrobu stavebních dílců využito technologie CAD/CAM a CNC.

### 5.1 BMW pavilon „The Bubble“, Frankfurt, 1999

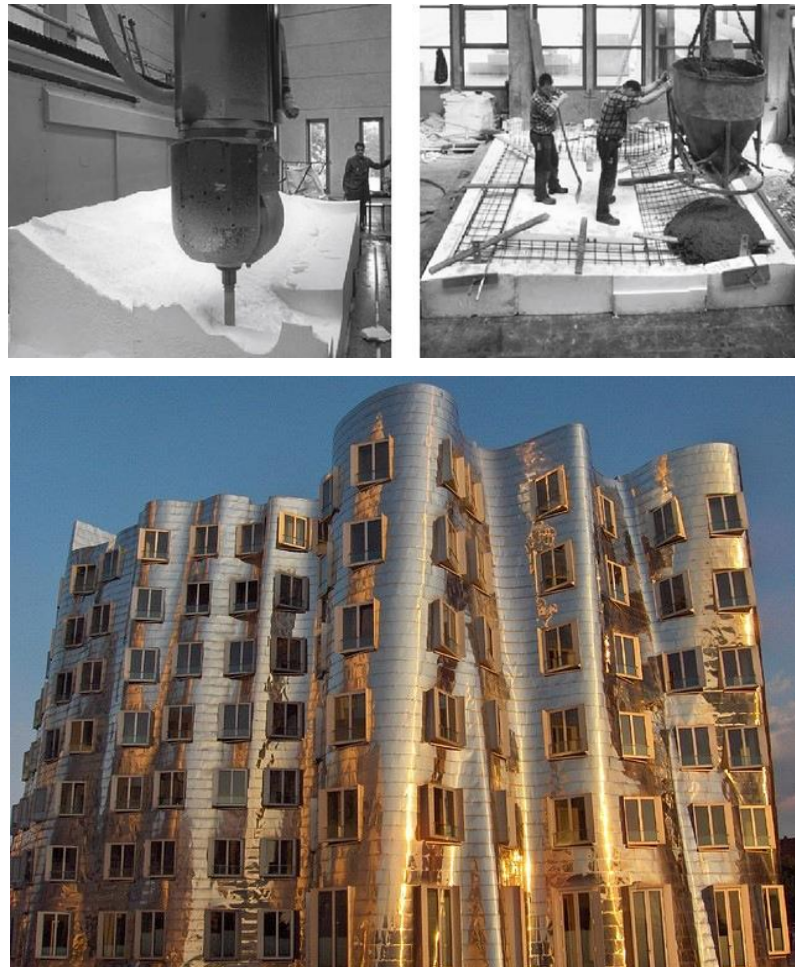
BMW pavilon připomínající tvar bubliny byl navrhnout v CAD/CAM softwaru CATIA. Projekt představoval opláštění pomocí panelů z plexiskla o dvojí křivosti, kterých bylo přes 300 jedinečných kusů. Na výrobu panelů byly využity polyuretanové formy, které se vyrobily pomocí CNC frézovacího stroje. Po vyrobení fasádního panelu z plexiskla se tvar formy poupravil opět pomocí CNC frézy. Takto se postupovalo postupně pro výrobu všech panelů [1].



Obr. č. 10: BMW pavilon (vlevo), výroba forem fasádních panelů [24]

### 5.2 Zollhof Tower, Düsseldorf, 2000

Při realizaci věže Zollhof v Düsseldorf byly na výrobu prefabrikovaných železobetonových stěnových dílců obvodového pláště použity rozměrné polystyrenové formy. Tvar negativních zakřivených forem byl vytvořen v CAD/CAM softwaru CATIA. Pomocí technologie CNC bylo na tomto projektu vyfrézováno 335 polystyrenových forem [24]. Architektem této stavby je Frank Gehry.



Obr. č. 11: Výroba polystyrenových forem (nahore), pohled na fasádu Zollhof Tower, zdroj: [24]

### 5.3 Autobusová zastávka, Hoofddorp, 2003

Společnost NIO Architecten navrhla v Holandsku netradiční zakřivenou autobusovou zastávku. Konstrukce zastávky byla vyřezána z kusů polystyrenu pomocí CNC stroje s řezacím odporovým drátem. Celková velikost polystyrenové konstrukce činí 50x10x5 m a byla opatřena speciálním GRP (Glass Re-inforced Plastic) nátěrem. Celková cena činila 1 milion €. Tato cena by však při použití tradiční železobetonové konstrukce byla takřka dvojnásobná. Technologie řezání odporovým drátem se velmi hodí pro tvorbu polystyrenových bednění, forem a velkých konstrukčních celků jako v případě této holandské zastávky [24].



*Obr. č. 12: polystyrenová konstrukce (nahore), pohled na zastávku (dole), zdroj: [24]*

## PRAKTICKÁ ČÁST

### **6. Předmět a cíle výzkumu**

Předmětem této práce je výroba polystyrenových forem pro betonové dílce s plochou o dvojí křivosti. Od návrhu dílců a od nich odvozených forem v CAD softwaru, přes využití CAM systému pro definování drah obráběcího nástroje a až po samotnou výrobu forem na CNC stroji, jejich ošetření, vyplnění betonem a odformování zhotovených dílců.

Sám disponuji základními znalostmi v obsluze CNC frézovacích strojů, které jsem před pár lety získal, kdy jsem jako brigádník obsluhoval CNC frézovací centrum, nikoli programoval. I to bylo důvodem, proč jsem jako předmět této práce zvolil výrobu polystyrenových forem pomocí CNC frézovacího stroje.

Cílem práce je tak poukázat na možné využití při výrobě atypických betonových dílců složitých tvarů. Tradiční výroba dřevěných nebo kovových forem pro tvarově složitě dílce může být velmi složitý, pracný a zdlouhavý proces, který se značně projevuje v ceně výsledného prefabrikovaného dílce.

## 7. Postup výroby forem a betonových prvků

V této kapitole je uveden postup pro výrobu mnou navržených prefabrikovaných betonových prvků prokládaný fotodokumentací a komentáři k průběhu a způsobu realizace.

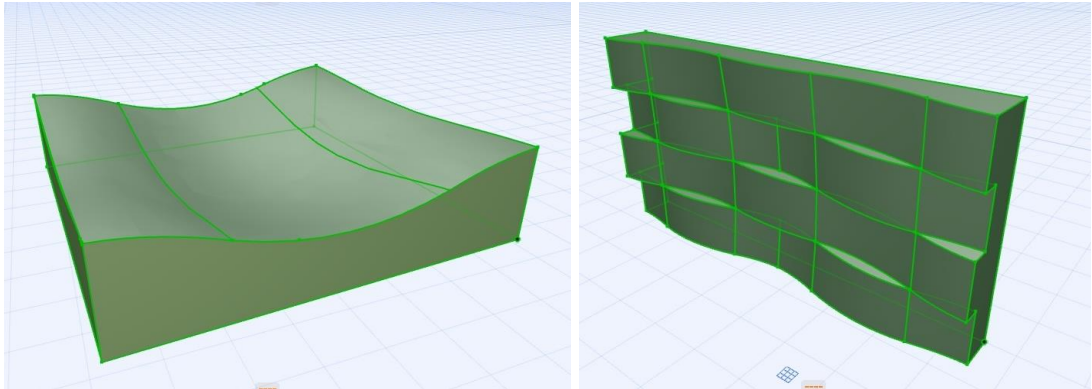
Nejprve byly pomocí CAD softwaru vytvořeny modely prvků, ze kterých se následně vymodelovaly negativní formy. CAD data těchto forem se importovala do CAM programu, ve kterém proběhla simulace obrábění forem, a byl vygenerován NC kód pro CNC stroj. Samotná výroba forem a následně zhotovení betonových dílců proběhlo v Trutnově ve firmě LB KOVO s.r.o. specializující se na činnost obrábění.

### 7.1 Tvorba CAD modelu prvků a forem

Jako CAD software byl pro tuto práci zvolen ArchiCAD 19 (studentská verze) od společnosti Graphisoft. ArchiCAD je 3D CAD/BIM systém obsahující výkonné nástroje pro modelování jako MORF nebo Skořepina. Nástroj MORF dovoluje vytvořit prvek s jakoukoli geometrií v intuitivním grafickém prostředí. MORF prvky mohou být vytvořeny "od nuly", třeba "vytlačení" 2D polygonu, nebo jakýkoli existující ArchiCAD BIM prvek lze na MORF převést a následně jej deformovat. Nástroj MORF poskytuje optimální řešení pro vytváření vlastních prvků a struktur [15].

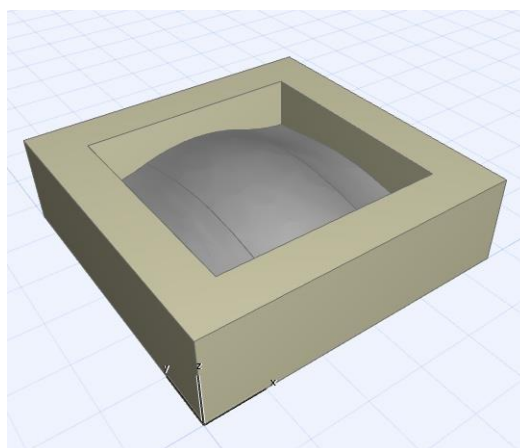
Oba prvky A i B demonstrují model s plochou o dvojí křivosti. Model A má půdorysné rozměry 250x250 mm, tloušťka prvku je proměnná od maximální hodnoty 60 mm až minimální hodnotu 15 mm. Model byl vytvořen jako deskovité těleso a upraveno pomocí nástroje MORF.

Model B se skládá z celkem čtyř segmentů. Nejprve byly pro každý segment ve 2D prostředí nakresleny křivky definující tvar pomocí nástroje Spline (křivka) a následně pomocí MORF vytaženy do 3D modelu. Segmenty se složily dohromady a pomocí nástroje Operace s tělesy byly „zmonolitněny“. Dvojí křivost byla docílena opět pomocí nástroje MORF jako u modelu A.

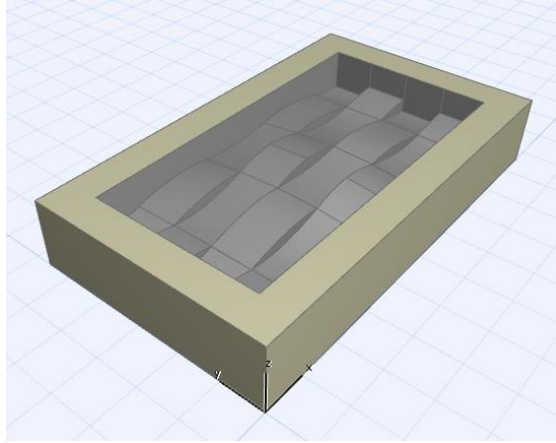


Obr. č. 13: Modely dílců vytvořené v programu ArchiCAD, prvek A (vlevo), prvek B (vpravo), zdroj: vlastní

3D modely forem pro prvky A i B se zhotovily následujícím postupem. Forma byla vytvořena jako kvádrovitý polotovar o výšce 100 mm (stejně jako tloušťka polystyrenové desky) o půdorysných rozměrech 350x350 mm pro formu A a 600x415mm pro formu B. Do modelu polotovaru byl umístěn model prefabrikovaného prvku a vystředěn. Pomocí operace s tělesy byl následně model prvku odečten od modelu polotovaru. Vznikl tak model negativní formy, se kterým se bude dále pracovat v CAM softwaru. Posledním krokem bylo uložit modely forem do CAD datového formátu, byl zvolen STL soubor. Na následujících obrázcích jsou 3D modely forem vytvořených v softwaru ArchiCAD.



Obr. č. 14: Model formy A, zdroj: vlastní



Obr. č. 15: Model formy B, zdroj: vlastní

## 7.2 Aplikace CAM systému Autodesk FeatureCAM

FeatureCAM je samostatný CAD CAM software společnosti Autodesk pro CNC programování frézovacích center, soustruhů, soustružnicko-frézovacích center, víceosých a více-kanálových obráběcích center a elektroerozivních drátových řezaček. Pro účely této diplomové práce byla použita 30-ti denní zkušební verze programu Autodesk FeatureCAM Standard 2017, která je zdarma dostupná na webových stránkách výrobce [16].

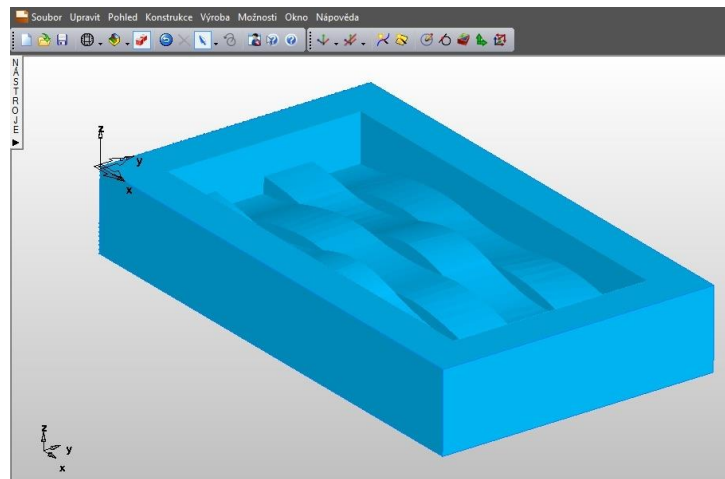
K hlavním přednostem systému FeatureCAM patří především jeho jednoduchost a rychlost vytvoření kompletního NC programu. Software pracuje na základě zadávání jednotlivých technologických prvků (např. díry, drážky či kapsy), které program umí i sám automaticky rozpoznávat a následně dokáže navrhnout vhodné řešení na základě přednastavených či uživatelských atributů obrábění. Uživatel může následně všechny parametry libovolně upravovat, či je může zadávat již od začátku sám. Užitečnou funkcí programu je automatické rozpoznávání prvků, které celý proces zadávání výrazně zjednodušuje. Tato funkce na modelu automaticky rozpozná dostupné technologické prvky, jako jsou například díry, kapsy, profily či 3D plochy a následně pro ně navrhne dle vestavěných nebo uživatelských kritérií optimální řešení rezných podmínek a obráběcích operací (hrubování, dokončení, zbytkové frézování). FeatureCAM obsahuje i jednoduchý modul Solid CAD,



který je postaven na jádře Parasolid. Obsahuje všechny základní CAD funkce. Jeho cílem není přímo nahradit jiný komplexní CAD systém, ale spíše vypomoci při tvorbě geometrie a modelů. V případě potřeby z něj lze exportovat 2D formáty dwg, dxf a 3D formáty Parasolid, IGES a STL [16].

### 7.2.1 Import modelu formy a definice polotovaru

FeatureCAM podporuje většinu CAD souborů, proto nebyl s nahráním souboru STL žádný problém. Po importu modelu je dobré provést vizuální kontrolu, zda došlo k úplnému nahrání modelu bez deformací, jak je tomu na obrázku na následujícím obrázku.



Obr. č. 16: Model formy B po nahrání do CAM softwaru, zdroj: vlastní

Po importu modelu program automaticky nabízí průvodce tvorby polotovaru. Zde je potřeba zadat rozměry a materiál polotovaru. Jelikož už samotný model formy má konečné rozměry, bylo zadáno, aby program vypočetl velikost polotovaru z velikosti součástky (importovaný model). Poslední, ale velmi důležitý krok je zadání polohy souřadného systému na polotovaru.

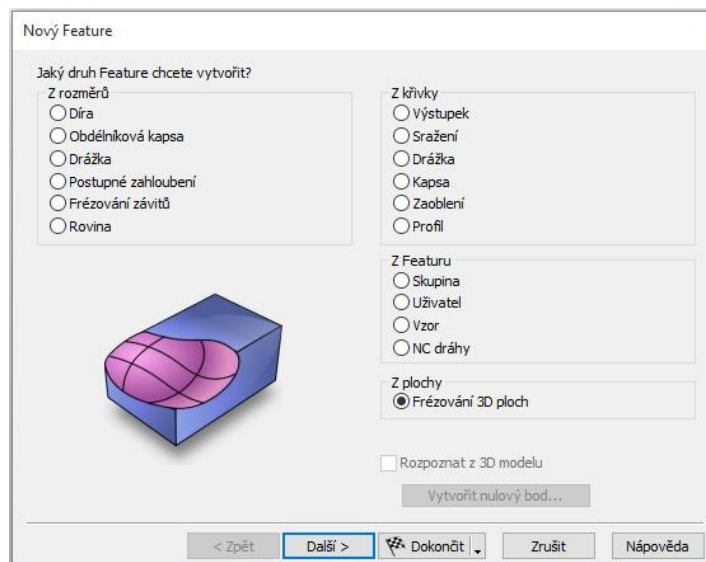
### 7.2.2 Volba obráběcích operací

Před vytvořením samotných obráběcích operací byla na každém modelu formy definována hranice obráběných ploch. Tyto hranice lze velmi snadno zadat pomocí řídicích křivek. V tomto případě hranici tvoří

čtvercová/obdélníková plocha budoucího prvku. V praxi to znamená, že CNC fréza nebude nic frézovat mimo plochu ohraničenou těmito křivkami.

Na výrobu forem A i B jsou použity tři obráběcí operace, v programu FeatureCAM to jsou tzv. featury. Každý feature je potřeba samostatně zadat. První operací bude hrubování sloužící k odstranění co nejvíce materiálu následováno před-dokončovací a dokončovací operací.

Pro vytvoření první obráběcí operace byla v programu zadána nová frézovací operace a jako feature zvoleno „Frézování 3D ploch“, jak ukazuje obrázek č. 17. Pro frézování 3D ploch je nutné vybrat plochy pro obrábění, v mém případě to jsou plochy uvnitř formy. Dalším krokem je výběr strategie obrábění. Pro hrubování byla zvolena hrubovací strategie „Hladina Z“ s možností navazující spirály. Aby nástroj najížděl do materiálu zvenku, je nutné přiřadit řezy jako 3D výstupek. Posledním krokem při tvorbě obráběcí operace je výběr nástroje. Po konzultaci s panem Bendou byly zvoleny stopkové frézy, pro hrubování se jednalo o stopkovou hrubovací frézu o průměru 20 mm.



Obr. č. 17: Volba obráběcích operací v programu FeatureCAM, zdroj: vlastní

Předdokončovací operace bude sloužit pro vytvoření hrubého tvaru formy. Jako strategie bylo zvoleno řádkování ve směru osy X, za nástroj byla vybrána začišťovací fréza o průměru 18 mm. Poslední operací bude dokončovací frézování. To ubírá zbytkový materiál, který zbyl po předchozích

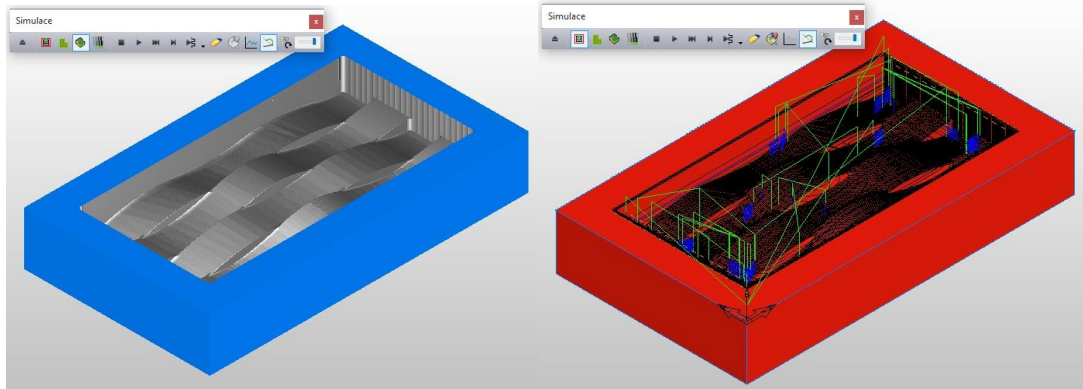
procesech. Strategie bude opět řádkování ve směru osy X, fréza bude začišťovací o průměru 10 mm.

Po vytvoření jednotlivých obráběcích operací lze v jejich nastaveních dále upravovat nástroje a nájezdy, možnosti chlazení a spoustu dalších atributů pro frézování. Jak se později ukázalo při animaci procesu frézování i samotné výrobě forem, důležitým atributem je nastavení kroku, který udává rovinnou vzdálenost mezi středy dráhy nástroje.

### **7.2.3 Simulace a verifikace obrábění forem**

FeatureCAM má několik režimů simulace, mezi které patří simulace se zobrazením středové čáry, 2D a 3D simulace, 3D rychlá simulace a simulace se zobrazením stroje. Verifikace znamená ověření procesu obrábění, zda neobsahuje chyby v zadání drah nástrojů. Mezi činnosti verifikace patří simulace včetně zobrazení nástroje, vřetene, držáku, upínače či celého stroje, která dokáže odhalit, zda nástroje nenabourávají do materiálu, upínek, nebo do stolu stroje. Další důležitou činností je porovnání výsledku simulace s modelem součásti. Tím se zjistí, zda se na obrobene součásti nenacházejí neobrobená místa [12].

Po spuštění simulace se ze zadaných podmínek generují veškeré dráhy nástroje (jak je vidět na obrázku č. 18) a je měřen čas pro celkové obrábění i pro jednotlivé operace. Simulace neprobíhá v reálném čase a lze ji záměrně urychlovat. Po dokončení simulace program spočítal celkový čas pro frézování forem. Pro formu A činil čas 1 hodinu, 29 minut a 10 vteřin, pro formu B potom 2 hodiny, 19 minut a 23 sekund. S výslednými časy jsem nebyl spokojen, proto bylo nutné optimalizovat obráběcí procesy.



Obr. č. 18: Simulace frézování v programu FeatureCAM, zdroj: vlastní

#### 7.2.4 Optimalizace obráběcích procesů

Pro optimalizaci obráběcích procesů bylo potřeba upravit některé atributy pro frézování 3D ploch. Zejména se jednalo o vyladění kroků nástroje pro jednotlivé operace. U hrubovacího a před dokončovacího procesu jsem záměrně nastavil vyšší kroky, aby byly tyto operace provedeny v co možná nejkratším čase. U dokončovacího procesu bylo důležité nastavit takovou hodnotu, pro kterou by daný proces nebyl příliš pomalý a zároveň bylo dosaženo potřebné kvality úpravy povrchu. Jak se později ukázalo při výrobě forem, tak u vyšších hodnot kroku byly na povrchu formy viditelné drážky po fréze.

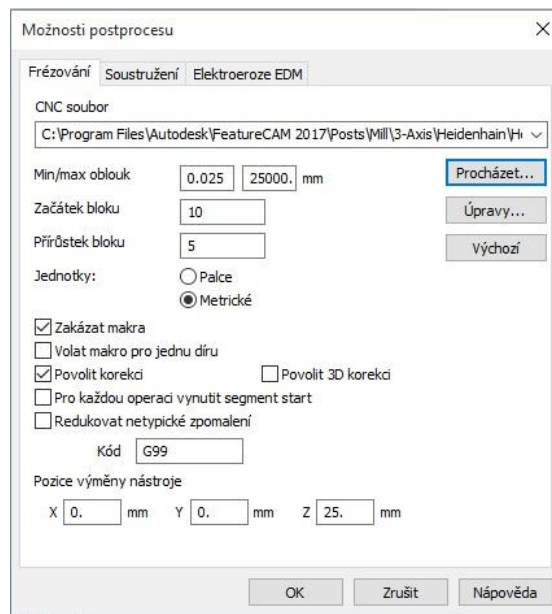
Po optimalizaci byla časová úspora u formy A přibližně 50 % a u formy B 40 %. Jednotlivé časy jsou zaznamenány v tabulce č. 1.

Tabulka 1: Časy frézování forem, zdroj: vlastní

<b>Časy frézování forem</b>				
Forma	Hrubování	Před dokončení	Dokončování	<b>Celkový čas</b>
A	0:07:17	0:08:44	1:13:00	<b>1:29:10</b>
B	0:25:40	0:05:45	1:47:50	<b>2:19:23</b>
<b>Optimalizované časy frézování forem</b>				
Forma	Hrubování	Před dokončení	Dokončování	<b>Celkový čas</b>
A	0:05:17	0:06:28	0:36:34	<b>0:48:28</b>
B	0:14:23	0:04:43	1:07:30	<b>1:26:47</b>

### 7.2.5 Tvorba NC programu

Výroba forem bude probíhat na CNC stroji s řídicím systémem od společnosti Heidenhain. Při tvorbě NC programu je nutné nejprve definovat postproces, který bude srozumitelný pro řídicí systém daného CNC stroje. FeatureCAM obsahuje více jak 350 připravených postprocesorů, které lze rovnou použít [16]. Z nabídky postprocesorů byl tedy vybrán „Heidenhain.cnc“. Pro následné vytvoření NC kódu v programu FeatureCAM stačí jednoduše pouze kliknout na tvorbu NC kódu a program sám vygeneruje kód a uloží ho na disk v počítači. NC kód má zapsané instrukce v ASCII textovém souboru, takže ho lze po nahrání do CNC stroje dále upravovat.



Obr. č. 19: Volba postprocesoru v programu FeatureCAM, zdroj: vlastní

### 7.3 Výroba forem

Výroba forem pro prefabrikované prvky proběhla v Trutnově ve firmě LB KOVO s.r.o. Pan Ladislav Benda, majitel firmy, má v oblasti obrábění více jak 20-ti leté zkušenosti, které přispěly k úspěšné výrobě forem.

### 7.3.1 Obráběcí stroj

Experiment byl proveden na vertikálním obráběcím 3-osém centru MAS MCV 754 QUICK s řídicím systémem HEIDENHAIN iTNC530. Technické parametry obráběcího stroje jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č. 2: Parametry obráběcího stroje, zdroj: vlastní

MAS MCV 754 QUICK		
Technické parametry	Hodnoty	
Upínací plocha stolu	1000 x 500 mm	
Maximální zatížení stolu	400 kg	
Pracovní rozsah	X-osa	754 mm
	Y-osa	500 mm
	Z-osa	550 mm
Maximální otáčky	10 000 min <sup>-1</sup>	
Výkon motoru včetně	9 kW	
Jmenovitý krouticí moment S1/S6	57/83 Nm	
Max. celkový příkon stroje	20 kW	

iTNC 530 od firmy HEIDENHAIN je všestranný, dílensky a konturově orientovaný řídicí systém pro frézovací, vrtací a vyvrtávací stroje stejně jako pro obráběcí centra. Systém iTNC 530 je universální a má široký a komplexní rozsah aplikací. Systém má optimalizované řízení pohybu, krátkou dobu zpracování bloku a speciální strategie řízení. Společně s jeho jednotnou digitální koncepcí a integrovanými digitálními pohony včetně měničů umožňuje dosahovat velmi vysokých obráběcích posuvů a nejlépe možnou obrysovou přesnost--zejména při obrábění 2-D kontur nebo 3-D tvarů [18].



Obr. č. 20: Obráběcí centrum MAS MCV 754, zdroj: [17]

### 7.3.2 Volba materiálu forem

Formy pro prefabrikované prvky jsem se rozhodl vyrobit z polystyrenu, který je lehce obrobitelný a navíc dobře dostupný materiál. Nastala otázka, který druh polystyrenu zvolit. Proto jsem provedl zkušební frézování na třech odlišných druzích polystyrenu. První vzorek byl klasický expandovaný pěnový polystyren (XPS), druhý expandovaný polystyren vyráběný do forem (perimetr) a poslední extrudovaný polystyren (XPS).

Zkušební frézování proběhlo ve formě vyfrézování drážek a otvoru pomocí stopkové frézy o průměru 10 mm. Všechny vzorky dopadly dle očekávání dobře, povrchy po fríze byly hladké bez známek vad. EPS mne popravdě překvapil, protože jsem očekával, že se bude po kuličkách trhat. Ve výběru rozhodly mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů. EPS nebude použit z důvodu špatné odolnosti vůči mechanickému poškození (budoucí manipulace s formou) a nižší pevnosti v tlaku. Vyfrézované plochy byly až příliš náchylné k deformaci. Objemová nasákavost je sice minimální, ale dosahuje hodnoty až 5 % při úplném ponoření do vody, což by bylo při vyplnění forem čerstvou betonovou směsí nežádoucí. Perimetr má, na rozdíl od EPS, vyšší pevnost v tlaku i mechanickou odolnost. Objemová nasákavost činí při úplném ponoření < 3 % [20]. Jako výsledný materiál pro formy jsem zvolil XPS. Oproti výše zmíněným materiálům má XPS lepší mechanickou odolnost, vyšší pevnost v tlaku, ale zejména jeho hlavní předností je téměř nulová nasákavost a to díky uzavřené struktuře pórů.



Obr. č. 21: Zkouška obrábění polystyrenů, zdroj: vlastní

Pro výrobu forem byl použity dvě desky z extrudovaného polystyrenu Isover STYRODUR 2800C o tloušťce 100 mm a rozměrech 1250x600 mm. Každá deska poslouží pro výrobu třech forem jednoho typu. Celkem tedy bude šest forem, tři formy A a tři formy B.

### 7.3.3 Nahrání NC kódu do obráběcího stroje

NC kód vytvořený v CAM softwaru FeatureCAM byl po nahrání do řídicího systému Heidenhain ručně upraven. Úprava spočívala v přiřazení řezných nástrojů k jednotlivým obráběcím operacím, upravení posuvů a přenastavení některých řezných podmínek. Jelikož se oproti kovům nebo tvrdým plastům frézovalo do měkkého materiálu, tak byly otáčky navýšeny na hodnotu  $8\,900\text{ min}^{-1}$ , tedy 89% na hranici maximálních otáček. Zvýšení otáček umožnilo i navýšení rychlosti posuvu nástroje. Následná simulace frézování v řídicím systému ukázala značné zkrácení výrobních časů. Forma A se ze 48 minut 5 vteřin zkrátila na 14 minut a 52 vteřin. Forma B z 1 hodiny a 27 minut na 29 minut a 38 vteřin. Jednalo se tedy o značnou úsporu času. To dokazuje, že CAM systémy jsou sice výkonnými nástroji, ale nemusí vždy sami navrhnout nejoptimálnější řešení. Proto je potřeba lidská kontrola





Obr. č. 22: Řídící a ovládací panel CNC frézovacího centra MAS MCV 754, zdroj: vlastní

### 7.3.4 Upnutí polotovaru a volba řezných nástrojů

Upnutí polotovaru (polystyrenových desek) bylo rozdílné pro formy A i B. Formy A mají rozměry 350x350 mm, rozhodl jsem se, že se tyto tři formy vyfrézují do jedné polystyrenové desky o půdorysném rozměru 1050x600 mm a až po výrobě se rozřežou na jednotlivé kusy. Po odměření se do XPS desky vyvrtaly pomocí aku vrtačky čtyři otvory a deska se pomocí šroubů, matic a podložek upnula k pracovnímu stolu obráběcího stroje.

Forma B má větší rozměry, proto byla nejprve polystyrenová deska nařezána na polotovary o rozměrech 600x415 mm. Upnutí polotovarů forem k pracovnímu stolu proběhlo pomocí čtyř svěrných zařízení po stranách desek.

Pro frézování byly zvoleny stopkové frézy z rychlořezné oceli HSSE od společnosti Hoffmann Group. Pro hrubování se použila stopková fréza o průměru 20 mm, pro před-dokončení začišťovací fréza o průměru 18 mm a pro dokončovací operaci začišťovací fréza o průměru 10 mm.



Obr. č. 23: Stopkové dokončovací frézy, zdroj: vlastní

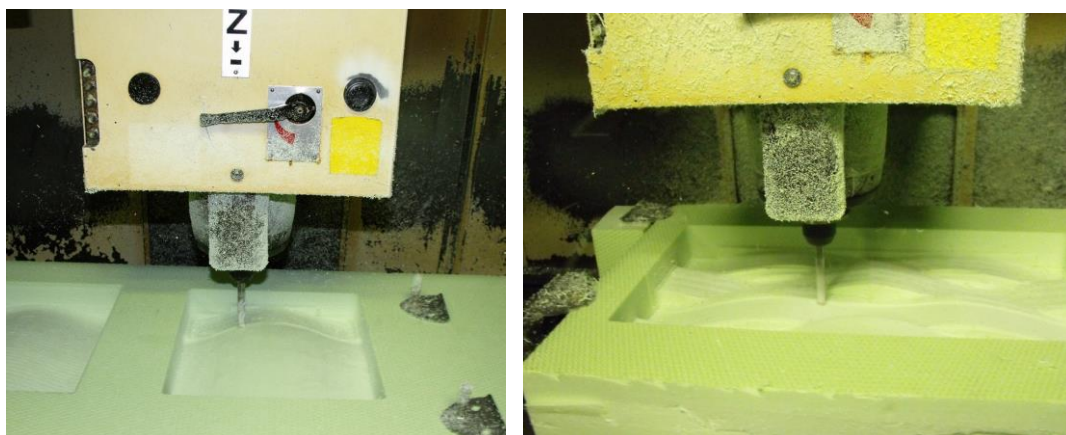
### 7.3.5 Průběh frézování forem

V průběhu frézování forem na CNC stroji nenastaly žádné komplikace. Vzhledem k povaze obráběného materiálu nebylo potřeba chlazení pro frézovací nástroje. Obrobený materiál byl průběžně odsáván vysavačem.

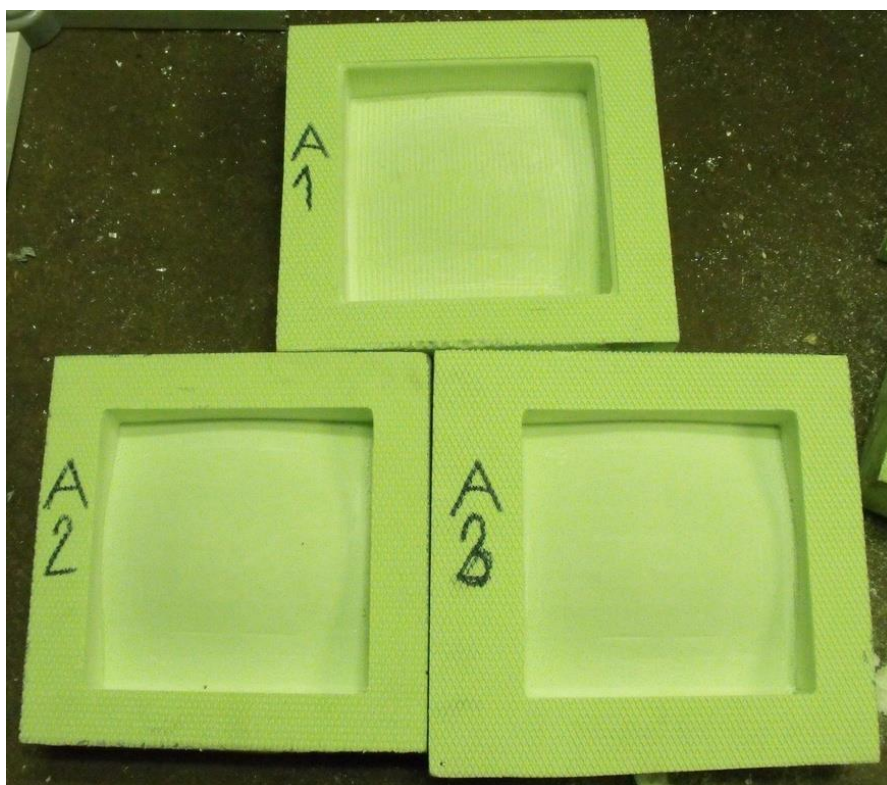
Po dokončení frézování první formy (forma A1) jsem nebyl spokojen s povrchovou úpravou. Na povrchu vyfrézované části formy byly patrné drážky od frézy. Bylo to dáno nastavením zbytečně velikého kroku začišťovací frézy. Pozastavil jsem proto výrobu a v CAM softwaru změnil hodnotu kroku pro dokončovací proces z původních 3,0 mm na 1.25 mm. Při frézování formy A2 již bylo docíleno dostatečně hladkého povrchu.

Určitá korektura proběhla i při výrobě B forem. U forem B1 a B2 byl povrch v určitých místech po stranách forem „chlupatý“ a také na dně ve specifických místech vykazoval povrch potrhanou strukturu. Jak se později ukázalo, bylo to zapříčiněno moc rychlým posuvem nástroje. Ve výše zmíněných místech totiž fréza ubírala relativně více materiálu a díky rychlému posuvu se nestačila čistit. Proto vznikly tyto povrchové vady. Řešením tedy bylo pro formu B3 snížit rychlost posuvu frézy v požadovaných místech. Výsledkem byla čistě opracovaná forma.

Na následujících obrázcích jsou zachyceny hotové formy a jejich výroba. Více fotografií je přiloženo v příloze.



Obr. č. 24: Frézování forem A (vlevo), forem B (vpravo), zdroj: vlastní



Obr. č. 25: Formy A1, A2 a A3, zdroj: vlastní



Obr. č. 26: Polystyrenové formy B2 a B3, zdroj: vlastní

## 7.4 Volba odformovacího přípravku

Aby byly betonové prefabrikované prvky dobře vyjmutelné z polystyrenových forem, je potřeba tyto formy ošetřit odformovacím/odbedňovacím přípravkem. Od těchto prostředků se očekává, že ochrání formu a přispějí ke kvalitě betonového povrchu. Výběr odbedňovacího prostředku závisí zejména na materiálu formy a složení betonové směsi.

Obecně lze odbedňovací/odformovací přípravky rozdělit na [28]:

- Ropné oleje,
- nátěrové hmoty a emulze na bázi polymerů,
- chemicky aktivní přípravky,
- vosky.

Mezi přípravky založených na olejích patří rostlinné a minerální oleje, mastné kyseliny, vazelíny, vosky a hodí se pro různé materiály forem. Oleje ovšem mohou zanechat na povrchu betonu hnízda nebo bublinky a při aplikaci silných vrstev může dojít ke znečištění betonu. Vosky jsou dobré pro snadné odbednění, ale hůře se aplikují. Nátěrové hmoty na bázi polymerů jsou vhodné pro kovové formy nebo formy z překližky a po odbednění vytváří hladký a čistý

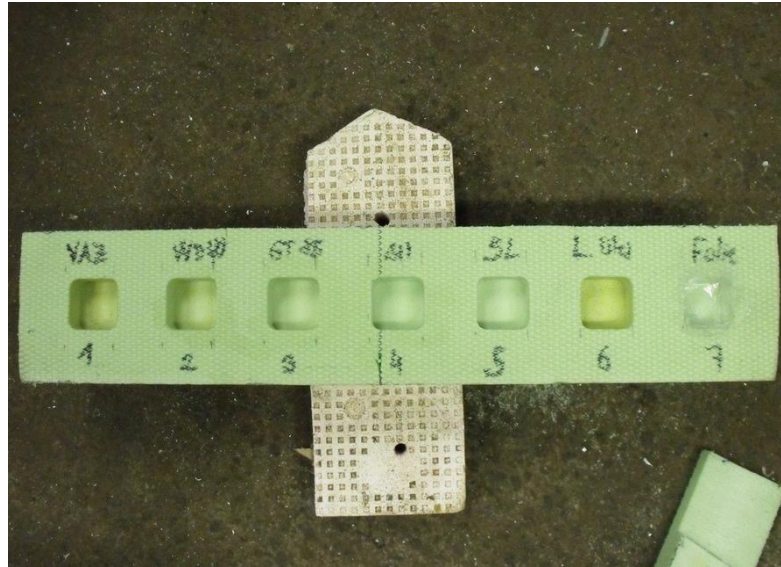
povrch betonu. Patří sem přípravky na bázi silikonů. Odbedňovací prostředky obsahující chemicky aktivní látky (nejběžněji to jsou mastné kyseliny) jsou stabilní a po odbednění dávají betonu velmi hladký povrch. Pro materiály z plastických pěnových hmot jsou zejména vhodné přípravky na bázi polymerů ve vodní emulzi. Naopak některé oleje mohou způsobit rozpuštění těchto materiálů. Proto je vždy dobré před aplikací daný přípravek vyzkoušet [27], [28].

Pro účel mého výzkumu, jsem se rozhodl použít běžně dostupné prostředky v domácnosti a pár základních olejů pro univerzální použití [21]. Pro odzkoušení těchto přípravků byly zhotoveny na CNC stroji zkušební formy. Použité přípravky pro snadné odformování jsou následující:

- 1) Univerzální plastické mazivo - vazelína NLGI 2
- 2) Univerzální mazivo WD 40
- 3) Minerální olej GT85 s přísadou PTFE
- 4) Silikonový olej ve spreji
- 5) Slunečnicový olej
- 6) Strojní olej Paramo OL – J68
- 7) Balící fólie

#### **7.4.1 Výroba zkušebních forem a aplikace prostředků**

Do seříznuté XPS desky o rozměrech 105x15x100 mm bylo vyfrézováno sedm kapes o půdorysném rozměru 50x50 mm a hloubce 30 mm. Fréza byla opět použita začišťovací 10 mm. Po vyjmutí desky z CNC stroje byly kapsy očištěny stlačeným vzduchem. Následovala aplikace odformovacího prostředku do jednotlivých kapes, jak je znázorněno na obrázku č. 27.



Obr. č. 27: Zkušební formy, zdroj: vlastní

Pro vybetonování forem byla použita jednosložková suchá betonová směs na bázi cementu Weber.bat beton s pevností 35 MPa. Po vyplnění forem byl povrch betonu uhlazen ocelovým hladítkem, deska s formami byla protřesena a by se beton zhutnil a následně přikryta plastovou fólií pro zamezení výparu vody z čerstvého betonu.

#### 7.4.2 Odformování zkušebních forem

Odformování proběhlo po 48 hodinách. Deska se rozřezala na jednotlivé formy a až poté proběhlo vyjmutí betonových tělísek z forem. Vyjmutí probíhalo nejprve jemným poklepáním formy po obvodu pomocí gumové paličky, kdy si beton odsedl od povrchu formy, a poté již stačilo betonová tělíška lehce vyklepnout z formy. Výsledky byly následující.

- ✚ **Vzorek č. 1 vazelína** – vyjmutí tělesa z formy proběhlo hladce a povrch tělesa byl hladký. Povrch formy byl hladký, dno čisté, ale na stěnách přilnula tenká vrstva betonu.
- ✚ **Vzorek č. 2 WD 40** – vyjmutí tělesa z formy bylo velmi hladké, povrch tělesa byl ovšem zdrsňený. Prostředek narušil povrchovou strukturu betonu a jeho vnější vrstva zůstala přilepená na stěnách formy.

- ✚ **Vzorek č. 3 GT 85** – těleso šlo vyjmout oproti předchozím o něco hůře, povrch betonu byl po stěnách hladký, ale povrch u dna byl drsnější a vykazoval hodně dutinek. Povrch formy čistý a hladký.
- ✚ **Vzorek č. 4 silikonový olej** – vyjmutí tělesa z formy bylo hladké, povrch hladký a bez známek vad. Forma čistá.
- ✚ **Vzorek č. 5 slunečnicový olej** – vyjmutí tělesa z formy šlo ztěžka, povrch byl hladký a mírně mastný. Povrch formy zůstal hladký a zašpiněný, zejména na stěnách se přichytila tenká vrstva betonu.
- ✚ **Vzorek č. 6 Paramo OL** – vyjmutí tělesa z formy šlo ztěžka, povrch byl mírně zdrsňený a mastný. Povrch formy zůstal hladký a zašpiněný.
- ✚ **Vzorek č. 7 fólie** – vyjmutí tělesa proběhlo nejhladčeji ze všech vzorků. Fólie se ale v průběhu plnění formy shrnula u okrajů a nekopírovala přesně tvar formy, což mělo za následek výrazné vlysy shrnuté fólie do povrchu betonu. Nicméně povrch betonu byl krásně vyhlazený.

### 7.4.3 Vyhodnocení odformovacích přípravků

Výsledky zkoušky odformovacích přípravků jsou přehledně znázorněny v následující tabulce.

Tabulka č. 3: Zkouška odformovacích přípravků, zdroj: vlastní

Zkouška odformovacích přípravků				
Vzorek č.	Přípravek	Vyjmutí tělesa z formy	Povrch betonu	Povrch formy
1	Vazelína	hladké	hladký	hladký a špinavý
2	WD 40	velmi hladké	zdrsňený	drsňený a špinavý
3	GT 85	dobré	stěny hladké/dno drsné	hladký a čistý
4	Silikonový olej	hladké	hladký	hladký a čistý
5	Slunečnicový olej	špatné	hladký	hladký a špinavý
6	Strojní olej	špatné	zdrsňený a mastný	hladký a špinavý
7	Balící fólie	velmi hladké	hladký s prolisy	hladký a čistý

Změna barevnosti betonového povrchu byla lehce patrná u použití oleje WD 40. Při porovnání s ostatními betonovými tělísky bylo viditelné tmavší zbarvení povrchu. Z ostatních použitých prostředků neměl žádný negativní vliv na barevnost betonového povrchu.

Z výše provedeného experimentu, dopadl nejlépe jako odformovací přípravek pro ošetření forem vzorek č. 4 - silikonový olej. Betonové těleso šlo z formy relativně lehce vyjmout a jeho povrch zůstal hladký bez známek vad či zbarvení. Povrch formy po ošetření silikonovým olejem zůstal v porovnání s ostatními prostředky velmi čistý. Formu by bylo možné ihned znovu ošetřit olejem a použít pro další betonáž.

Nutno ještě podotknout, že vyložení formy plastovou fólií u vzorku č. 7 proběhlo spíše z vlastní zvědavosti, určitý potenciál tam dle mého názoru je. Například kdyby se použila tenčí fólie, která by se nahřála takovým způsobem, aby dokonale okopírovala tvar formy.



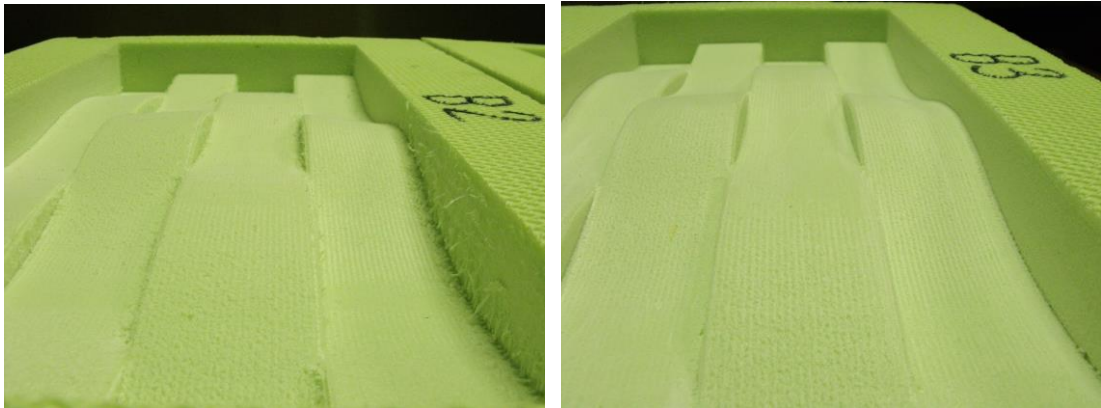
Obr. č. 28: Zkušební betonová tělíska po odformování zdroj: vlastní

## 7.5 Ošetření a betonování forem

Před vyplněním forem čerstvou betonovou směsí, byl jejich povrch lehce přebroušen smirkovým papírem o jemné zrnitosti. Odstranily se tak z povrchu vlasečnicové struktury, jak je patrné z obrázku č. 29. U formy B3 nebylo přebroušení potřeba, protože při její výrobě již byly odstraněny nedostatky z předešlých procesů frézování. Její povrch byl tak hladký a bez



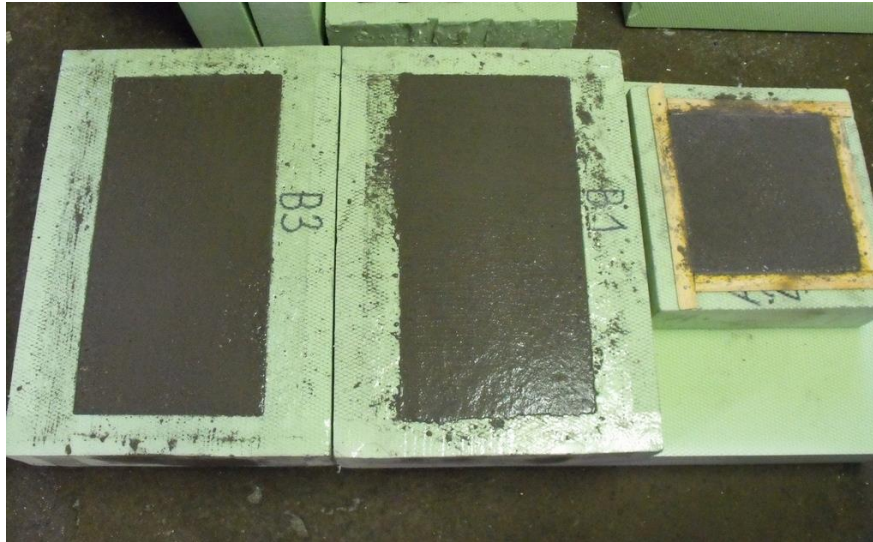
známek povrchových vad. Formy byly dále očištěny stlačeným vzduchem a ošetřeny silikonovým olejem.



Obr. č. 29: povrch formy B2 (vlevo) a B3 (vpravo), zdroj: vlastní

Prefabrikované dílce budou z prostého betonu. Jako beton byla použita jednosložková suchá betonová směs na bázi cementu Weber.bat beton s pevností 35 MPa, s maximální velikostí zrna 10 mm. Jedno 25 kg balení poslouží pro zhotovení jednoho dílce A a dvou dílců B. Příprava betonové směsi proběhla dle pokynů výrobce. Do plastového kbelíku se pomocí odměřovací nádoby nalilo 2,20 litru čisté vody a postupně se z pytle přisypávala suchá betonová směs. Směs byla důkladně promíchána za pomoci vrtačky se spirálovým míchadlem po dobu přibližně tří minut. Do betonové směsi nebyly přimíchány žádné přísady.

Pro betonování byly použity formy A2, B1 a B3. Plnění forem čerstvou betonovou směsí proběhlo pomocí kovové lopatky. Aby se beton po naplnění forem důkladně zhutnil a vyplnil veškerý objem forem, byla každá forma řádně protřesena a bylo provedeno 30 poklepů o rovnou plochu betonové podlahy v dílně. Tím bylo simulováno hutnění betonu. Nakonec byly formy přikryty plastovou fólií a byly takto uloženy po dobu tří dní do místnosti s okolní teplotou vzduchu 18 °C.



Obr. č. 30: Vybetonované formy, zdroj: vlastní

## 7.6 Odformování betonových prvků

Odformování prvků bylo provedeno přibližně 72 hodin od betonáže. Postup pro odformování byl následující. Gumovou paličkou se forma po celém obvodu poklepala, aby si beton odsedl od povrchu formy. Poté se betonový prvek vyklepl do takové míry, aby se dal uchopit na protilehlých stranách a následně byl vyjmut z formy.

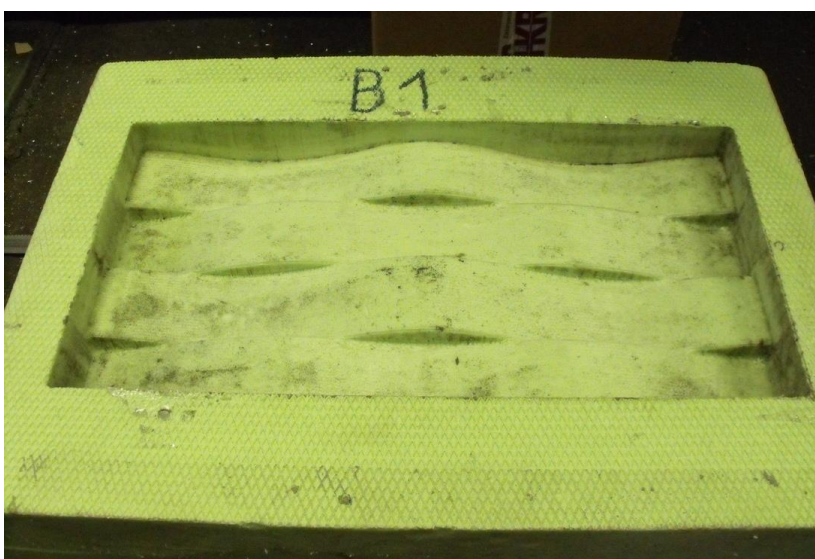
Menší prvek A2 šel vyjmout bez obtíží. Prvek B v porovnání s prvkem A šel odformovat o něco hůře. Bylo to zřejmě dáno tvarově složitějším dnem B formy. Při vyndávání prvku B1 došlo k jeho příčnému prasknutí. Příčinu bych hledal v nedostatečném vyvrání prvku pro odformování, pevnost nebyla dostačující. Nutno také říci, že prvek nebyl žádným způsobem vyztužen. Proto jsem se rozhodl ponechat prvek B3 ve formě déle. Odbednění bylo nakonec provedeno po sedmi dnech od uložení betonové směsi a bylo úspěšné. Na následujících fotografiích jsou zachyceny prvky ihned po vyjmutí z forem.



Obr. č. 31: Betonový prvek A po odformování, zdroj: vlastní



Obr. č. 32: Betonový prvek B po odformování, zdroj: vlastní



Obr. č. 33: Forma B1 po odformování, zdroj: vlastní

## 8. Zhodnocení výroby forem a betonových prvků

V této kapitole jsou zhodnoceny jednotlivé procesy návrhu a výroby forem a betonových dílců.

### 8.1 Zhodnocení práce v CAM systému

CAM software představuje velmi výkonný nástroj pro tvorbu a simulaci obráběcích procesů. Práce v CAM softwaru FeatureCAM je intuitivní i pro člověka, který dříve s tímto systémem nepřišel do styku. Vytváření obráběcích operací bylo snadné a rychlé. Simulace obrábění je velmi mocný nástroj, při kterém lze ladit výrobu do nejmenšího detailu. Vše je vždy jen otázkou pár vteřin než se simulace vygeneruje znovu. Program v případě kolizí vždy uživatele upozorní. Pomocí simulací jsem zkoušel různé frézovací operace a hledal tak optimální cestu pro výsledné vygenerování drah nástroje.

Nahrání NC programu do řídicího systému CNC stroje ještě neznamenal, že bude stačit jenom zmáčknout tlačítko startu pro zahájení výroby. Bylo potřeba přiřadit systému řezné nástroje ze zásobníku CNC stroje. Samozřejmě tohle běžně CAM systémy umí, je ale potřeba propojit data mezi systémy, což jsem neprovedl. Následnou úpravou otáček a rychlosti posuvu se podařilo výrazně zkrátit čas výroby.

### 8.2 Zhodnocení výroby forem a dílců

Výroba forem na CNC frézovacím centru proběhla u forem A za necelých 45 minut a u forem B přibližně 2 hodiny i s průběžnými korekcemi posuvů a kroků nástroje. Tyto korekce byly nutné, pro dosažení požadované povrchové úpravy forem. Proto první vyrobená forma A1 vykazuje v porovnání s poslední vyrobenou B2 mnohem horší kvalitu povrchu.

Odformovací přípravek v podobě silikonového oleje posloužil pro účely této práce dobře. Povrch se pokryl tenkou vrstvou oleje. Úskalí při nanášení oleje byla jeho čirá barva, která po nanesení byla na povrchu špatně rozpoznatelná a tak nanesení oleje neproběhlo po povrchu formy rovnoměrně. Proto by bylo dobré pro příště použít již specializovaný přípravek. Například emulzní nátěr na bázi polymerů, který by měl zacelit póry a sjednotit povrch.

Dosáhlo by se tak čistého a velmi hladkého povrchu a forma by byla ještě lépe odformovatelná.

Odformování menšího dílce A proběhlo relativně lehce, protože se jednalo o prvek malých rozměrů. Dílce B šly z formy o něco hůře. Jak bylo později zjištěno, tak to zapříčinil samotný tvar prvku. Po vnesení dvojí křivosti do modelu prvku se prostor mezi „vlnkami“ na okraji přiblížil, což při odformování vytvořilo jakýsi klín. Pro ještě snadnější odformování z formy vytvořené z jednoho kusu polystyrenu by bylo možné boční stěny formy vyfrézovat s úkosem, tak jako používá u formovacích rámců pro plošné betonové dílce. Dobrým řešením by také mohlo být nevyrobit formu jako jeden celek. Stačilo by vyfrézovat negativní tvar dna a stěny formy vytvořit z bočnic.

### 8.3 Náměty pro další výzkum

Při pokračování projektu této práce by bylo dobré dále prozkoumat:

- opakovatelnost polystyrenové XPS formy
- odbedňovací prostředek a jeho obrátkovost s formou
- skládaná forma

### 8.4 Technologické zhodnocení

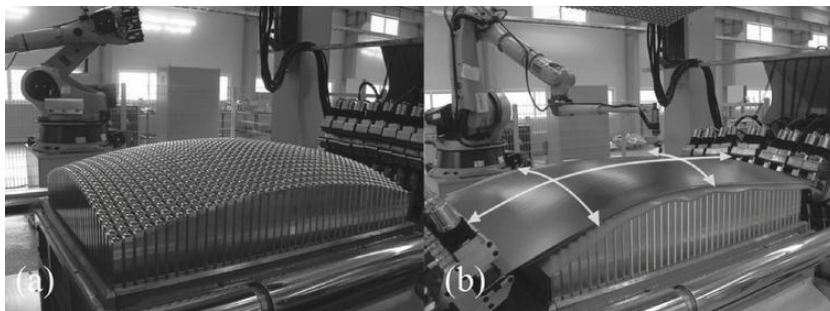
Tradiční výroba forem pro tvarově složité dílce při kusové nebo malosériové výrobě je pracnou operací. Využívá se tak nejčastěji dřevěných forem, kdy se vytvoří žebrová konstrukce a povrch forem je potom vyložen materiály jako je plech, umakart nebo voděodolné překližky. Povrch formy se nakonec dle potřeby přetmelí [29]. Ceny takovýchto forem mohou být až desítky tisíc. Kovové formy jsou potom ještě mnohonásobně dražší, kdy cena formy při tvarově složitém a rozměrném prvku může být až 2/3 z celkové ceny.

CAM a CNC technologie si pomalu nacházejí uplatnění ve stavebnictví, jak bylo ukázáno na některých realizacích. Připomeňme výrobu železobetonových stěnových dílců obvodového pláště, kdy bylo použito 335 polystyrenových forem vytvarovaných pomocí CNC frézovacího stroje.

V České republice nebyl nikdy podobný projekt uskutečněn. CAM a CNC technologie, která se na našem území momentálně uplatňuje, je výroba betonových kanalizačních šachet. Společnost BETONIKA využívá technologie PERFECT od rakouské společnosti SCHLUSSELBAUER technology GmbH [25]. Technologie Perfect umožňuje výrobu jednolitého šachtového dna včetně kynety a vstupů. Forma žlabu kynety ze styroporu (plně recyklovatelný materiál) je přesně seříznuta pomocí CNC stroje a vložena do speciální formy. Díky této automatizaci odpadla pracná ruční práce a výrobní cyklus šachtového dna se zkrátil na 24 hodin, to je trojnásobně kratší doba než u klasické technologie.

Je potřeba se zamyslet nad využitelností forem. Zda budou na jedno použití (postradatelné) nebo naopak pro co největší opakovatelnost. Polystyrenové formy se používají pro jedno použití. Při odformování dochází k jejich destrukci. Levná pořizovací cena materiálu a snadná výroba za pomoci stroje to plně kompenzuje.

Nové výzkumy se zabývají formami, které dokáží měnit tvar a umožnit tak výrobu pro freeform prvky. Prototyp tohoto formovacího zařízení byl využit na výrobu fasádních panelů pro budovu kulturního centra Dongdaemun Design Plaza v jihokorejském hlavním městě Soulu [24].



Obr. č. 34: Forma měnící tvar, zdroj: [24]

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo poukázat na možné aplikace CAM systému a CNC technologie při výrobě stavebních prefabrikovaných dílců. Již v dnešní době se tyto technologie uplatňují při realizacích. Zejména potom při výrobě fasádních panelů pro stavby s freeform architekturou. V oblasti betonových prefabrikovaných dílců již proběhly některé realizace při zahraničních projektech. Dobré uplatnění CAD/CAM a CNC technologie se našlo při výrobě betonových šachetních den.

Použití polystyrenových forem by si mohlo v budoucnu najít také dobré uplatnění nejenom ve výrobních halách prefabrikovaných dílců, ale i přímo na stavbě, kde by se polystyrenové formy mohly vkládat do bednění. Polystyren je lehce obrobitelný materiál, cenově příznivý a dobře recyklovatelný.

Samotná výroba polystyrenových forem a betonových dílců v rámci praktické části této diplomové práce jasně poukazuje na možnosti využití CAM a CNC technologií.

## Seznam použité literatury

- [1] SCHODEK, Daniel L. *Digital design and manufacturing: CAD/CAM technologies in architecture*. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2005. ISBN 04-714-5636-5.
- [2] GROOVER, Mikell P. a Emory W. ZIMMERS. *CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, c1984. ISBN 01-311-0130-7.
- [3] PETERKA, Jozef a Ivan KURIC. *CAD/CAM systémy – významný prvok integrovanej výroby* [online]. Slovenská technická univerzita, Materiálovo-technologická fakulta Trnava [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/32/32.htm>
- [4] SADÍLEK, Marek. *Počítačová podpora výroby*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. Studijní opora. ISBN 978-80-248-2738-4.
- [5] SADÍLEK, Marek a Zuzana SADÍLKOVÁ. *Počítačová podpora procesu obrábění: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2770-4.
- [6] Modelovanie a aplikácia programovania v CAD/CAM grafických systémoch. *Strojár Inovátor* [online]. [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://www.strojar-inovator.sk/projekty-2014/78-1-rocnik-2014/77-projekt-7-modelovanie-a-aplikacia-programovania-v-cad-cam-grafickyh-systemoch>
- [7] CAD software - history of CAD CAM. *CADAZZ* [online]. 2004 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.cadazz.com/cad-software-history.htm>
- [8] KUBÍN, Josef. Stručná historie CAD/CAM až po současnost. *Fakulta informatiky Masarykovy univerzity* [online]. 2002 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: [http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2002/xkubin2\\_CAD-CAM.htm](http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2002/xkubin2_CAD-CAM.htm)
- [9] CAD/CAM systémy. *ScriGroup.com - ajutorul de care ai nevoie* [online]. [cit.2016-11-27]. Dostupné z: [http://www.scrigroup.com/limba/ceha-slovaca/29/CADCAM-systmy71622.php#\\_Toc32911473](http://www.scrigroup.com/limba/ceha-slovaca/29/CADCAM-systmy71622.php#_Toc32911473)
- [10] NC Machining Evolving to CNC Machining. *ThomasNet.com* [online]. [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/cnc-evolution>
- [11] Historie CNC strojů. *COPTEL Internetový portál* [online]. [cit. 2016-11-30]. Soubor ve formátu pdf. Dostupné z: [coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=22926&instance=2](http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=22926&instance=2).



- [12] FOLTÁN, Petr. *Aplikace CAD/CAM softwaru FeatureCAM při obrábění*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [13] FÜGNER, Tomáš. *Výroba přesných volných ploch frézováním*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [14] CEGRA: *Centrum pro podporu počítačové grafiky ČR s.r.o.* [online]. Firemní webové stránky, 2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.cegra.cz/>
- [15] GRAPHISOFT: *ARCHICAD* [online]. Firemní webové stránky, 2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.graphisoft.com/archicad/>
- [16] CAD CAM SYSTEMS: *Autodesk® Master reseller a distributor* [online]. Firemní webové stránky, 2016 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.cadcam-systems.cz/>
- [17] KOVOSVIT MAS: *Machine your future* [online]. Firemní webové stránky, 2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/>
- [18] HEIDENHAIN: *Měřicí a řídicí technika pro náročné aplikace polohování* [online]. Firemní webové stránky, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: [http://www.heidenhain.cz/cs\\_CZ/](http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/)
- [19] Hoffmann Group: *Tools to make you better* [online]. Firemní webové stránky, 2016 [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/>
- [20] Polystyrenové izolace. *TZB-info* [online]. [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/297-polystyrenove-izolace>
- [21] First Concrete Casting. In: *CarveWright* [online]. Webové forum, 2007 [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: <http://forum.carverwright.com/showthread.php?8018-First-Concrete-Casting/page5&highlight=cement+Mol>
- [22] CNC Solutions for Building Industry. *CMS North America* [online]. ©2015 CMS North America [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.cmsna.com/industry-solutions/building>
- [23] VONDRÁK, Jan. *Technologie CNC frézování*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

- [24] CASTAÑEDA, E., B. LAURET, J.M. LIROLA a G. OVANDO. Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price. In: *Journal of Facade Design and Engineering* [online]. 2015, s. 1-13 [cit. 2017-01-02]. DOI: 10.3233/FDE-150031. ISSN 2213302x. Dostupné z: <http://www.medra.org/servlet/aliasResolver?alias=iospress>
- [26] POLZER, Aleš. Akademie CNC obrábění. *Technický týdeník* [online]. Business Media CZ s. r. o., 2009 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc-obrabeni/akademie-cnc-obrabeni-2\\_8537.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc-obrabeni/akademie-cnc-obrabeni-2_8537.html)
- [27] Choosing a form release agent. *XBH Corp* [online]. The Aberdeen Group, [cit. 2017-01-05]. Soubor ve formátu pdf. Dostupné z: <http://davidlu.net/Choosinga.pdf?G=736&In=jp>
- [28] KOSKI, John A. Selecting and using form release agents: Enhance the quality and economy of precast products by using the right release agent. *The Concrete Producer* [online]. The Aberdeen Group, 1994 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: [www.theconcreteproducer.com/\\_view-object?id=00000154](http://www.theconcreteproducer.com/_view-object?id=00000154)
- [29] HELA, Rudolf. *Technologie stavebních dílců* [online]. Brno, 2005. Studijní opora. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ09-Technologie%20stavebnich%20dilcu/Technologie%20stavebnich%20dilcu>.
- [30] WITZANY, Jiří. *Konstrukce pozemních staveb 70: prefabrikované konstrukční systémy a části staveb*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2656-6.
- [31] *Prefa Brno: jsme tam, kde vy stavíte* [online]. Firemní webové stránky, © 2010–13 Prefa Brno [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.prefa.cz/>
- [32] RFID for Precast Concrete Manufacturers. *FALKEN Secure Network* [online]. Brožura společnosti FALKEN Secure Networks © 2008 [cit. 2017-01-06]. Soubor ve formátu pdf. Dostupné z: [http://www.falkensecurenetworks.com/PDFs/0829\\_RFID\\_for\\_Precast\\_Concrete.pdf](http://www.falkensecurenetworks.com/PDFs/0829_RFID_for_Precast_Concrete.pdf)
- [32] MILLER, James R. *Freeform Curves: Interactive Construction and Editing for Shape Approximating Curves* [online]. 2013. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <https://people.eecs.ku.edu/~miller/Courses/IntroToCurvesAndSurfaces/page4.html>
- [33] CAM systémy a výroba tvarových ploch. *CAD.cz* [online]. Webservis © 2009 - 2017 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2321-cam-systemy-a-vyroba-tvarovych-ploch.html>

## **Seznam zkratk**

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

CAE - Computer Aided Engineering

CAPP - Computer Aided Process Planning

CAPE - Coputer Aided Production Engineering

CAQ - Computer Aided Quality

CIM - Computer Integrated Manufacturing

NC – Numeric Control

CNC – Computer Numeric Control

DNC – Direct Numeric Control

UTB – urychlování tvrdnutí betonu

## Seznam obrázků a tabulek

Obr. č 1: Postup výroby pomocí CAD/CAM systémů, zdroj: [6] .....	13
Obr. č. 2: Struktura CIM, zdroj: [9] .....	15
Obr. č 3: Schéma modulů v sestavě CAD/CAM, zdroj: [9] .....	22
Obr. č 4: Sousedné (vlevo) a nesousedné (vpravo) frézování, zdroj: [26] ..	25
Obr. č.5: Příklad freefrom plochy, zdroj: [32].....	28
Obr. č. 6: Znárodnění frézování tvarové plochy na 3osé CNC fréze, zdroj: [5] .....	29
Obr. č. 7: Některé technologie 5ti osého frézování, zdroj: [5].....	29
Obr. č. 8: Speciální CNC frézovací stroje na obrábění dřevěných dílů, [22]	30
Obr. č. 9: Schéma výroby prefabrikátů ve výrobní hale, zdroj: [29].....	35
Obr. č. 10: BMW pavilon (vlevo), výroba forem fasádních panelů [24] .....	43
Obr. č. 11: Výroba polystyrenových forem (nahore), pohled na fasádu Zollhof Tower, zdroj: [24] .....	44
Obr. č. 12: polystyrenová konstrukce (nahore), pohled na zastávku (dole), zdroj: [24] .....	45
Obr. č. 13: Modely dílců vytvořené v programu ArchiCAD, prvek A (vlevo), prvek B (vpravo), zdroj: vlastní.....	48
Obr. č. 14: Model formy A, zdroj: vlastní .....	48
Obr. č. 15: Model formy B, zdroj: vlastní .....	49
Obr. č. 16: Model formy B po nahrání do CAM softwaru, zdroj: vlastní .....	50
Obr. č. 17: Volba obráběcích operací v programu FeatureCAM, zdroj: vlastní .....	51
Obr. č. 18: Simulace frézování v programu FeatureCAM, zdroj: vlastní.....	53
Obr. č. 19: Volba postprocesoru v programu FeatureCAM, zdroj: vlastní ....	54
Obr. č. 20: Obráběcí centrum MAS MCV 754, zdroj: [17] .....	56
Obr. č. 21: Zkouška obrábění polystyrenů, zdroj: vlastní .....	57
Obr. č. 22: Řídící a ovládací panel CNC frézovacího centra MAS MCV 754, zdroj: vlastní.....	58
Obr. č. 23: Stopkové dokončovací frézy, zdroj: vlastní .....	59
Obr. č. 24: Frézování forem A (vlevo), forem B (vpravo), zdroj: vlastní .....	60
Obr. č. 25: Formy A1, A2 a A3, zdroj: vlastní .....	60

---

Obr. č. 26: Polystyrenové formy B2 a B3, zdroj: vlastní .....	61
Obr. č. 27: Zkušební formy, zdroj: vlastní.....	63
Obr. č. 28: Zkušební betonová tělíska po odformování zdroj: vlastní.....	65
Obr. č. 29: povrch formy B2 (vlevo) a B3 (vpravo), zdroj: vlastní .....	66
Obr. č. 30: Vybetonované formy, zdroj: vlastní .....	67
Obr. č. 31: Betonový prvek A po odformování, zdroj: vlastní .....	68
Obr. č. 32: Betonový prvek B po odformování, zdroj: vlastní .....	68
Obr. č. 33: Forma B1 po odformování, zdroj: vlastní.....	68
Obr. č. 34: Forma měnící tvar, zdroj: [24].....	71
Tabulka č. 1: Časy frézování forem, zdroj: vlastní .....	71
Tabulka č. 2: Parametry obráběcího stroje, zdroj: vlastní .....	715
Tabulka č. 3: Zkouška odformovacích přípravků, zdroj: vlastní.....	64