



## **Středoškolská technika 2018**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

### **Výroba formy pomocí 3D tisku**

**Jakub David**

Vyšší odborná škola, střední škola, centrum odborné přípravy  
Budějovická 421, Sezimovov Ústí 391 02

## Anotace

Práce byla vypracována jako nezbytná součást povinné maturitní zkoušky. V samotném začátku se práce bude zabývat základním popisem grafických programů, 3D tisku, 3D tiskáren a jejich historií až po současnost. Nejdůležitější částí projektu je podrobný popis jak autor postupoval při vlastní tvorbě 3D modelu, jeho tisku, výrobě formy a vytvoření odlitku cínem. Práce bude sloužit jako didaktická pomůcka pro všechny, kteří by si sami takovou formu za pomoci 3D tisku chtěli vytvořit.

## Anotation

The work was developed as a necessary part of the compulsory school - leaving examination. At the beginning the work will deal with a basic description of graphic programs, 3D print, 3D printers and their history to the present. The most important part of the project is a detailed description of how the author proceeded with its own creating 3D model, his print, form production, and her filling with tin. The work will serve as a didactic tool for all who would like to create a form with using 3D printing.

## Klíčová slova a vybrané pojmy

3D modelování - Modelování pomocí grafických počítačových programů

3D tisk - Tisk 3D modelu za pomoci 3D tiskárny

Z-Brush - Grafický modelovací program vhodný pro modelování detailních modelů

Cinema 4D - Grafický modelovací program

MoldLay - Voskovitý materiál určený pro 3D tisk

## Seznam zkratk

3D - zkratka výrazu „trojdimenzionální“, „trojrozměrný“ a označuje svět, který je možné popsat třemi rozměry (viz kartézská soustava souřadnic); předměty ve trojrozměrném světě mají objem.

2D - Dvourozměrná (grafika, zobrazení)

NURBS - Non-Uniform Rational B-Splines (matematický model běžně používaný v počítačové grafice pro generování a reprezentování křivek a ploch, které nabízejí velkou flexibilitu a přesnost při manipulaci jak s analytickými tak s volnými tvary.)

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Základy programů, 3D tisku a slévárenství .....	2
2.1	Základy teorie programu Z-Brush.....	2
2.1.1	Prostředí a rychlost editoru .....	2
2.1.2	Některé základní vlastnosti a možnosti editoru .....	3
2.1.3	Závěr .....	4
2.2	Základní teorie programu Cinema 4D.....	4
2.2.1	Práce a možnosti Cinemy 4D.....	4
2.2.2	3D modelování v Cinemě 4D.....	4
2.3	Základní Teorie a historie 3D tisku.....	5
2.3.1	Historie 3D tisku .....	5
2.3.2	Technický popis 3D tisku.....	5
2.3.3	Možnosti 3D tisku.....	6
2.3.4	Novinky ve 3D tisku .....	6
2.3.5	Výhody 3D tisku .....	6
2.3.6	Nevýhody 3D tisku .....	7
2.4	MoldLay materiál .....	8
2.4.1	MOLDLAY Specifikace a vlastnosti.....	8
2.5	Slévání a výroba forem.....	9
2.5.1	Formy .....	9
2.5.2	Modely .....	9
2.5.3	Metoda ztraceného vosku.....	9
2.5.4	Historie přesného lití.....	10
2.5.5	Sádrové formy.....	10
2.5.6	Vytavování vosku .....	10
2.5.7	Metody pro vytavování vosku.....	11
3	Výroba formy pomocí 3D tisku.....	12

---

3.1	Příprava k realizaci .....	12
3.1.1	Stanovení postupu řešení.....	12
3.2	Popis vlastních postupů a výsledků.....	13
3.2.1	Výběr vhodného programu .....	13
3.2.2	Výběr podkladu pro vytvoření 3D modelu .....	14
3.2.3	Vytvoření základního modelu .....	15
3.2.4	Modelování detailů.....	16
3.2.5	Vytvoření akční polohy modelu.....	17
3.2.6	Modelování zbylých částí .....	20
3.2.7	Příprava 3D modelu pro 3D tisk .....	21
3.2.8	3D tisk .....	22
3.2.9	Tvorba formy .....	26
3.2.10	Pokus o vytvoření odlitku .....	28
3.2.11	Oddělení formy od odlitku .....	30
4	Závěr .....	33
5	Seznam použitých zdrojů a literatury .....	34
6	Seznam obrázků.....	35

# 1 Úvod

Dnes už je jasné, že o 3D tisku se bude hovořit víc a víc. S největší pravděpodobností si do pěti let začnou lidé pořizovat tiskárny domů a do deseti let budou součástí každé domácnosti jako mikrovlnná trouba nebo notebook. Odborníci tvrdí, že 3D tisk je jedním z největších vynálezů v dějinách lidstva a přirovnávají ho k vývoji knihtisku ve středověku nebo parního stroje o pár století později.

Záměrem práce bude vytvoření podrobného modelu dinosaura ve 3D programu Z-Brush. Dále vytisknout model pomocí, nepříliš známého, materiálu MoldLay a pokusit se zde ukázat jak může být 3D tiskárna účinná. Také chci tímto tématem přiblížit, jak dokážou dnešní technologie ve spojení s metodou „ztraceného vosku“, která je tisíce let stará, úzce spolupracovat. Poté následuje vytvoření formy pomocí sádry a již výše zmíněné metody „ztraceného vosku“ pro vytisknutý 3D model a pokus o zhotovení odlitku z cínu.

Toto téma jsem si vybral z důvodu v poslední době rychle vyvíjené technologie 3D tisku. Jelikož 3D tisk vidím, jakožto jednu z nejdůležitějších technologií za posledních pár desítek let, tak jsem se rozhodl tuto technologii prozkoumat a více jí přiblížit ve spojení s nepříliš známým materiálem MoldLay a s tvorbou formy tradiční metodou „na ztracený vosk“

## 2 Základy programů, 3D tisku a slévárenství

Základní teorie o využitých programech při 3D modelování, základy 3D tisku a jeho historie

### 2.1 Základy teorie programu Z-Brush

Pixologic Z-Brush je kombinace grafického editoru a modelovacího programu, jehož unikátní doménou je „digitální sochařství“ s možností kreslit a upravovat povrchy 3D modelů. Můžete tak zapomenout na komplikované přiřazování materiálů a textur jednotlivých objektům a pracovat s povrchy 3D modely podobně jako s 2D designem v Adobe Photoshopu.

Analogie s Photoshopem je samozřejmě jen vzdáleným zpodobněním schopností a způsobu práce s 3D modely objektů v editoru Z-Brush, který nativně přebírá funkce sofistikovaného modeleru, napojeného na (do detailů propracovaný) systém úprav textur a různých speciálních vlastností povrchů materiálů. [1]

#### 2.1.1 Prostředí a rychlost editoru

Mimo poměrně unikátních funkcí pro kreslení a interaktivní úpravy povrchů objektů má Z-Brush hodně zajímavé grafické rozhraní s plynule posouványými pracovními paletami nástrojů řazených do mnoha skupin. Některé důležité paletky jsou navenek skryté a lze je aktivovat přes hotkeys, jedná se například o výběr barev či rychlé transformační a výběrové funkce.



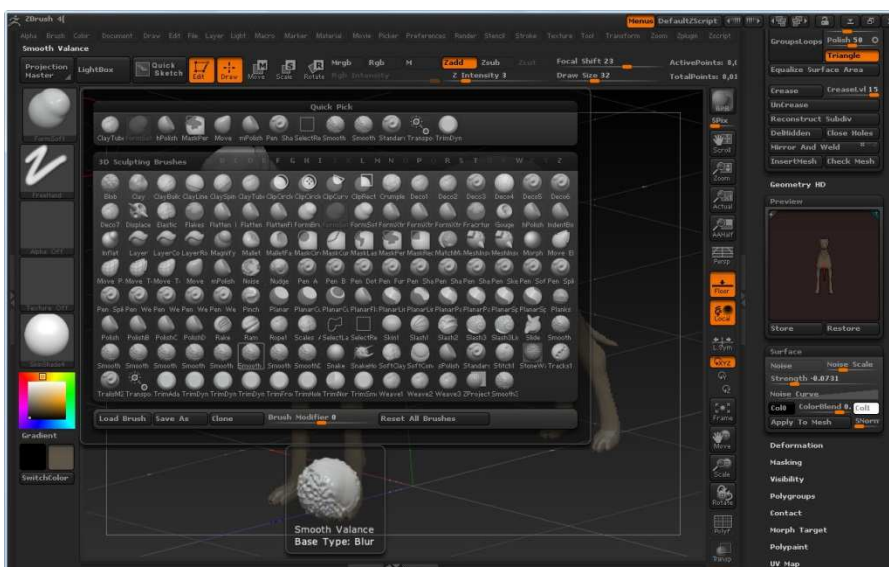
Obrázek 1- Pixologic ZBrush 4.0 - některé z důležitých skrytých (v praxi spíše překryvných) pracovních palet editoru se aktivují přes různé hotkeys

3D sochařství klade značné nároky na rychlost procesoru a vykreslování modelů objektů pomocí grafické karty. Z-Brush je ve své čtvrté verzi opravdu rychlý editor prostorových modelů a nabízí plynulou práci při kreslení a manipulacích s objekty obsahujícími řádově několik milionů polygonů. [1]

## 2.1.2 Některé základní vlastnosti a možnosti editoru

Mimo schopnosti nativně kreslit přímo po povrchu 3D objektů (aniž byste se museli starat o jejich původní vlastnosti) je asi nejdůležitější mít vůbec čím kreslit. Základní nabídku Z-Brush 4.0 tvoří třicet „sochařských“ štětců, které doslova modelují povrch objektů s využitím textur a různých specifických vlastností materiálů, UV map a dalších obvyklých modelovacích či kreslicích funkcí známých z 2D/3D editorů. Každý štětec má přitom přednastavený svůj materiál, který umí přetvářet – lze tak například snadno vyrývat povrchy kovů, upravit strukturu plastů, skla, kůže, dřeva apod.

Při digitálním malování po površích objektů máte k dispozici spoustu doplňkových funkcí například v podobě různých způsobů vyhlazování polygonů, ovládání tahu perem/štětcem, ovládat můžete i alfakanály materiálů využívané i pro deformační funkce. Povrchy 3D modelů přitom umí příslušné štětce deformovat s dodržением gravitačních zákonů, kdy se hmota materiálu jednotlivých objektů vytlačuje či přesouvá stejně jako při reálném modelování s hlinou či jinou hmotou. Simulovat lze také například vítr, magnetismus či jiné fyzikální efekty.



Obrázek 2- Pixologic ZBrush 4.0 - jedna z kategorií nabídky kreslicích štětců, kterými lze malovat přímo po povrchu 3D modelů

V módu PolyPaint lze po 3D modelech kreslit bez zdlouhavého přiřazování textur, které lze zvolit až dodatečně a „nakreslené“ strukturální změny objektů se přizpůsobí vlastnostem zvolené textury či materiálu. PolyPaint je navíc nezávislý na rozlišení textur, takže můžete později navýšit preciznost detailů jednoduchým přiřazením textury s vyšším rozlišením. Dalším unikátním kreslicím módem je tzv. Pixol (někdy označovaný jako 2.5D mód), ve kterém lze v 3D prostředí editoru vytvářet 2D ilustrace, přičemž Z-Brush uchovává informace o světelných podmínkách kresby, barvách, umístění objektů a informace o všech použitých materiálech.



Úpravy postav lze realizovat s pomocí transpozičních funkcí editoru, s jejichž využitím můžete různé pózy a změnit tak výraz či naznačení pohybu celé postavy. [1]

### 2.1.3 Závěr

Pixologic Z-Brush je kreativní 3D malířský program pro digitální umělce, kteří se zabývají zpracováním a především vizuálními grafickými úpravami modelů objektů. Z-Brush v sobě de facto spojuje koncept 3D modeleru s 2D grafickým editorem, který mívají integrované pouze velmi drahé studiové animační systémy, a proto je přijatelná i cena aplikace.

I když by se mohlo zdát, že se editor hodí hlavně v produkčním procesu zpracování počítačových her, ve kterých se často vyskytují různé sci-fi postavy, přesvalnatělí akční zabijáci a další mutanti či příšerky, najde si Z-Brush své použití i u klasické 3D grafiky a obecně u sofistikované digitální malby. [1]

## 2.2 Základní teorie programu Cinema 4D

Cinema 4D je oblíbený 3D program. Díky snadnému ovládní, výborné spolupráci s kompozičními programy a přívětivému rozhraní se stal velice populární mezi 3D grafiky.

Cinema 4D je většinou spojena s modulem BodyPaint 3D (od verze 10 je BodyPaint 3D součástí programu). [2]

### 2.2.1 Práce a možnosti Cinemy 4D

Cinema 4D je komplexní program pro tvorbu 3D grafiky. Znamená to, že díky jednomu programu můžete vytvořit vše na modelu až po rendering.

Lze modelovat z hotových primitivních objektů nebo tvořit modely pomocí polygonů - polygonální modelování. Každý objekt je tvořen body, které se spojují do polygonů (jeden polygon je určen minimálně 3 body). Modelování spočívá v úpravě těchto bodů a polygonů, díky čemuž se mění tvar objektu. Cinema 4D nabízí široké možnosti úprav a mnoho různých objektů a funkcí. Naleznete zde také důležité nástroje NURBS. [2]

### 2.2.2 3D modelování v Cinemě 4D

Cinema 4D umožňuje modelovat pomocí polygonů, parametricky i tzv. sculpting. V oblasti polygonového modelování představila verze R16 novinku Polypen (polygonové pero). V jednom nástroji můžete tvořit, deformovat, přesunovat, ořezávat, kopírovat body, hrany i celé polygony v prostoru modelu velmi dynamicky. Cinema má značnou výbavu generátorů a deformátorů. [3]

## 2.3 Základní Teorie a historie 3D tisku

### 2.3.1 Historie 3D tisku

Technologii pro tisk fyzických 3D objektů z digitálních dat jako první vyvinul Charles Hull v roce 1984. Pojmenoval tuto techniku jako „stereolitografii“ a v roce 1986 na ní získal patent. Po získání patentu založil firmu „3D Systems“ a vyvinul první komerční stroj pro 3D tisk. Nicméně termín „3D tiskárna“ byl v té době neznámý a stroj byl tedy nazýván jako „stereolitografní aparát“. Protože byla tato technologie úplně nová firma „3D Systems“ vydala první verzi stroje pouze pro několik vybraných zákazníků a na základě jejich zpětné vazby vyvinula vylepšenou verzi s názvem SLA-250, která byla zpřístupněna veřejnosti v roce 1988.



Obrázek 3- Historie 3D tisku

První zmínky o 3D tisku zněly trochu jako ze sci-fi filmu. Děti si budou tisknout hračky. Vytiskneme si potřebné věci do domácnosti. A co víc, vytiskneme si i něco k večeři. Začátky 3D tisku byly docela nákladné a tisk probíhal třeba i pár dnů. První pokusy byly prováděny za pomoci jednoduchých materiálů a vytvářely se primitivní objekty. Stejně jako každá jiná technologie se i 3D tisk začal velmi rychle rozšiřovat a dostávat do podvědomí veřejnosti. Samotný 3D tisk se začal dostávat i do domácností, protože dnes již není složité si vlastní tiskárnu sestavit v domácích podmínkách. [4]

### 2.3.2 Technický popis 3D tisku

3D tisk je technologie, která využívá digitálních dat 3D modelů. Tato data jsou zpracována a je z nich vytištěn požadovaný fyzický 3D model. 3D model je možné vytvořit pomocí 3D grafického software nebo využitím dalšího zařízení, tzv. 3D skeneru, které dokáže skenováním fyzického objektu vytvořit jeho virtuální 3D model. Vytvořený 3D model je nutné připravit pro 3D tisk. Kromě vhodně zvolených rozměrů modelu,

v případě tisku více předmětů, které ve výsledku tvoří sestavu, je pro jejich snadné sestavení vhodné zvolit ideální toleranční hodnoty. Dalším krokem je rozřezání modelu na vrstvy, pomocí kterých bude model tisknut. Výška vrstev záleží na požadavcích pro tisknutý model a také na technologii, kterou daná 3D tiskárna využívá, a na technických parametrech 3D tiskárny. Nejčastěji používaným formátem pro ukládání 3D modelů již připravených pro 3D tisk je formát \*.STL (stereolitografie). [4]

### 2.3.3 Možnosti 3D tisku

Více než nové technologie a materiály, se v posledních letech v 3D tisku měnilo a nalézalo nové využití. Můžeme zde poukázat pro začátek samozřejmě na nejznámější technologie Fused Deposition Modeling, Selective Laser Sintering či Stereolitografii. Pokud shrneme využití 3D tisku, můžeme začít strojírenským průmyslem, pokračovat přes stavebnictví, design a umění, zdravotnictví a v neposlední řadě určitě školství. Školství, obor, do něhož i tato maturitní práce spadá, je oblast, která naskýtá možnosti využití 3D tisku skrze různě orientované předměty výuky. Na základních školách či nižších stupních gymnázií můžeme mluvit o předmětech jako: • Matematika - výpočet, návrh a tisk 3D objektů • Zeměpis - tisk reliéfu zemského povrchu • Výtvarná výchova - návrh a tisk různorodých designových objektů • Chemie - tisk molekul • Hudební výchova - tisk jednoduchých hudebních nástrojů. [4]

### 2.3.4 Novinky ve 3D tisku

3D tiskárny zatím umí replikovat tvar, ale nikoliv funkce orgánů. V případě 3D tisku orgánů je potřeba kopírovat nejen jejich tvar, ale i funkci. V současné době se proto uvažuje o možnosti 3D tisku z lidských buněk, tedy z živého materiálu. První pokusy o 3D tisk z živých lidských buněk nedávno úspěšně proběhly v Číně, lékařům se tam podařilo vytisknout zmenšeninu ledvin. Vytisknuté buňky přitom metabolizovaly a normálně fungovaly, navíc byla jejich životnost udávána na několik týdnů. Vědcům se tedy nakopírovat tvar orgánu a funkci buněk podařilo, nicméně cesta k vytvoření plnohodnotných orgánů použitelných při transplantacích je zatím daleká. Tisk nových orgánů na 3D tiskárnách tak prozatím stále zůstává spíše fikcí. [4]

### 2.3.5 Výhody 3D tisku

1. **Možnost přizpůsobení výrobků** - Pokud se budeme bavit o 3D tisku, tak možnost přizpůsobení je zde již pravidlem. Za pomoci požadovaného materiálu, 3D tiskárny a potřebného výkresu můžete vyrobit v podstatě jakýkoliv objekt chcete, dle vaší představivosti či specifikací.
2. **Rychlá výroba prototypů** - 3D tisk umožňuje rychlou produkci prototypů nebo reálných objektů v menším měřítku. Tato výhoda pomáhá vývojářům předcházet možným problémům, které by mohly mít dopad na kvalitu či funkci.

3. **Nízké náklady na výrobu** - I přes to, že počáteční cena pořízení a sestavení 3D tiskárny může být vysoká, celkové úspory ve formě mzdových nákladů, ušetřeného času a stejných podmínek jak pro sériovou, tak masovou výrobu, dokazují, že výrobní cena je relativně nízká.
4. **Žádné skladové prostory** - Vzhledem k tomu, že 3D tiskárny mohou tisknout výrobky až v případě potřeby a cena je srovnatelná s velkovýrobou, není zde pak potřeba utrácet peníze za skladové prostory.
5. **Větší počet pracovních příležitostí** - Celkové šíření se technologie 3D tisku může zvýšit poptávku po designérech, konstruktérech či technících k obsluze 3D tiskáren či přípravě výkresů pro výrobky. [4]

### 2.3.6 Nevýhody 3D tisku

1. **Omezený počet použitelných materiálů** - V současnosti dokáží 3D tiskárny pracovat se zhruba 100 materiálů. To je vcelku zanedbatelné číslo ve srovnání s materiály použitelnými v tradičním výrobním průmyslu. Je zapotřebí dalších výzkumů, které by nám ukázaly metody, které by umožnily 3D výtiskům být více odolné a robustní.
2. **Nekontrolovaná výroba nebezpečných věcí** - „Liberator”, světově první funkční zbraň vyrobená pomocí 3D tisku ukázala, jak jednoduché je vyrobit zbraň, pokud má někdo přístup k výkresům a 3D tiskárně. Vlády by mohly vymyslet způsoby a prostředky ke kontrole tohoto trendu.
3. **Omezená velikost** - Technologie 3D tisku je aktuálně omezena velikostí jednotlivých výrobků. Velmi velké objekty je stále nemožné vytvořit pomocí 3D tisku.
4. **Omezený počet použitelných materiálů** - V současnosti dokáží 3D tiskárny pracovat se zhruba 100 materiálů. To je vcelku zanedbatelné číslo ve srovnání s materiály použitelnými v tradičním výrobním průmyslu. Je zapotřebí dalších výzkumů, které by nám ukázaly metody, které by umožnily 3D výtiskům být více odolné a robustní. [4]

## 2.4 MoldLay materiál

Materiál MoldLay je plastová tisková struna s vlastnostmi vosku. Byla navržena speciálně pro výrobu forem. Při pokojové teplotě je materiál velmi tuhý a pevný, při zahřátí na 270°C díky speciálně vybraným olejovým parafínům zkapalní (s lehkou viskozitou oleje). Tiskne se téměř jako PLA, ale při nižší teplotě

3D tiskový materiál MoldLay je ideální pro ty, kteří si chtějí vytisknout vlastní formy. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby. Buď je možné vytisknout negativ objektu a následně naplnit pryskyřicí, nebo vytisknout daný objekt a poté odlévat formu. [5]

### 2.4.1 MOLDLAY Specifikace a vlastnosti

1. téměř nulová deformace
2. lze tisknout bez vyhřívané podložky
3. tiskne se při teplotách 170 - 210 °C
4. zkapalní při ošetření v troubě při teplotě cca 270 °C

Filament MoldLay není rozpustný v lemonelu, dá se lepit i běžným sekundovým lepidlem. Nedá se vyhladit acetonem, lze však brousit. Dá se vyhladit i ohřevem, může však dojít k deformaci. Je tvrdší než většina vosků, ale může být řezán nožem. [5]



Obrázek 4- MoldLay materiál

## 2.5 Slévání a výroba forem

Způsob výroby kovových součástí, při kterém roztavený kov vlijeme do formy, jejíž dutina má přibližně tvar a velikost budoucího výrobku – odlitku.

Odlitek získaný ztuhnutím kovu ve formě je buď již hotový odlitek, nebo jej ještě dále mechanicky opracováváme.

Sléváním vyrábíme předměty velmi složitého tvaru, kterého bychom těžko dosáhli obráběním, kováním,...

Odlitky odléváme ze šedé litiny, slitiny mědi, hliníku, hořčíku, cínu.

### 2.5.1 Formy

1. **Trvalé (ocelové kokily)** - pro odlévání ve velkých sériích odlitků z neželezných kovů, jsou vyrobeny z oceli nebo litiny, nazývají se kokily
2. **Polo-trvalé** - (na několik použití – keramické)
3. **Netrvalé** - na jedno použití - po ztvrdnutí odlitku se zničí, jsou většinou z křemenného písku s pojivem

### 2.5.2 Modely

Model slouží k výrobě netrvalých forem. Model se vytváří podle technického výkresu hotového odlitku, a to jednodílný nebo vícedílný. Kvůli smršťování odlitku během chladnutí musí být model větší než hotový odlitek.

1. **Trvalé modely** - může být opakovaně používán k výrobě forem
2. **Ztracené modely** - (např. z vosku) se z vnitřku vytaví a jeho místo zaujme slévavý kov vyplňující formy.

### 2.5.3 Metoda ztraceného vosku

Metoda vytavitelného modelu „na ztracený vosk“ („lost wax“), nebo také přesné lití („investment casting“) je stará metoda, která se vyvinula ze specializované metody na metodu v dnešní době rozšířenou reflektující požadavky zákazníků na odlitky, jak z pohledu tvarové a rozměrové přesnosti, tak i materiálové náročnosti.

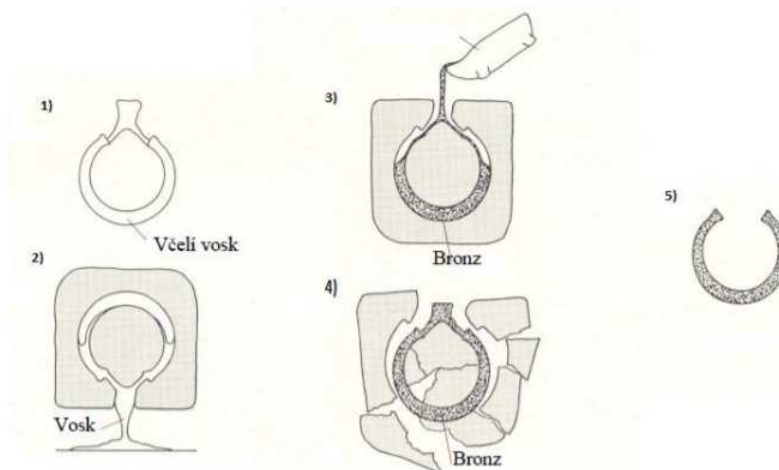
Lze ji začlenit mezi technologie near-net-shape, což jsou produkty blízké hotovým výrobkům, kdy se přeměna materiálu realizuje na tvary a rozměry blízkým hotovým výrobkům. Termín near-net-shape nelze chápat pouze jako prostředek k zajišťování přímé,

účinné a ekonomické cestě k výrobě hotové součásti, ale rovněž jako úsporu drahých materiálů a energií.

Při výrobě součástí se stále prosazují vyšší požadavky na jakost, kvalitu povrchu, rozměrovou přesnost, vnitřní čistotu, vyšší funkční parametry a to vše při silném tlaku na výrobní náklady. U některých strojírenských součástí se musí stále uplatňovat progresivní výrobní způsoby strojírenské metalurgie, které jsou schopny uvedené požadavky splňovat. Mezi progresivní způsoby lze zařadit také přesné lití vytavitelným modelem, které nabízí efektivním uplatnění umožňující podstatné úspory materiálu s minimálním použitím dalších dokončovacích výrobních operací. [6]

### 2.5.4 Historie přesného lití

Základy technologie přesného lití, jsou známé už skoro přes 6 tisíciletí. Původní místo vzniku této metody není přesně známé. Asi 5-6 tisíc let před naším letopočtem používali umělci včelí vosk na zhotovení modelů, které obalili hlínou a po vypálení do takto vytvořených forem odlévali bronz. [6]



Obrázek 5- Metoda vytavitelného vosku

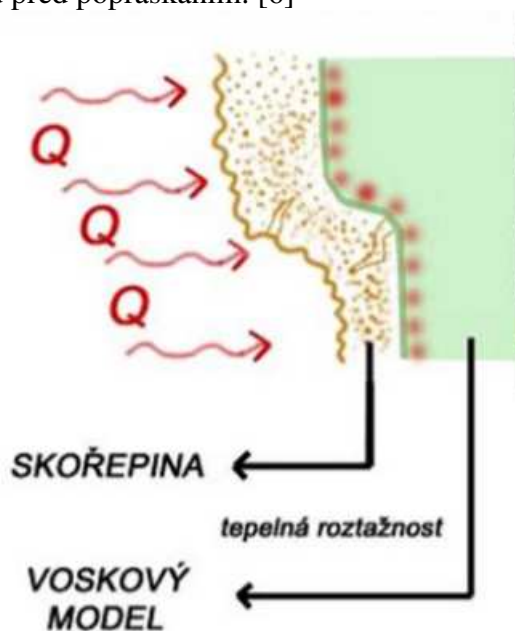
### 2.5.5 Sádrové formy

Jsou vyráběny zalitím matečného modelu ze sádry. Používají se na výrobu jednotlivých modelů bez nároků na rozměrovou přesnost. Sádra má nízkou tepelnou vodivost a díky tomu se používají jen málo, protože tuhnutí odlitku trvá dlouho. Životnost forem je minimální a proto se často používají při ověřování navrhované technologie výroby. Nepoužívají se na vstřikovacích lisech, ale používají se na výrobu modelů volným gravitačním litím. Hlavní využití mají ve světě umění. [6]

### 2.5.6 Vytavování vosku

Po finálním vytvoření obalu a jeho vysušení skořepiny se z ní musí voskový model odstranit. V této části procesu je možnost zjistit existující vady (praskliny) na formě, protože vosk má tendenci detekovat tyto chyby, obzvláště když je používán tmavý vosk,

který prosákne skrz formu a zobrazí se jako skvrna na povrchu formy. Klíčovým problémem této části procesu je dilatační rozdíl mezi keramikou vrstvou a voskem. Kdybychom obalenou formu jednoduše vložili do pece za účelem vytavení vosku (bod tavení 60 – 90°C), tak by došlo k jejímu popraskání. Ohřev vosku musí být proto rychlý, tím se vytvoří tenká vrstva, tzv. dilatační spára. Která zachycuje veškeré deformace vosku, a tím chrání skořepinu před popraskáním. [6]



Obrázek 6- Dilatační spára

### 2.5.7 Metody pro vytavování vosku

1. **Za nízké teploty** - vytavování se provádí v roztavené a přehřáté lázni nízkotavitelného kovu. Stejného složení jako má hmota modelů po dobu 10 až 15 minut. Častým způsobem je i vytavování ve vroucí vodě. Výhodou je malé riziko popraskání. Nevýhodou je délka procesu (10 až 20 minut).
2. **Za vysoké teploty** - provádí se v peci za teploty 800 až 1000°C, kde dochází zároveň k vypalování i vytavování. Ztráty vosku jsou 10 až 15%. Vosková směs je částečně znehodnocována. Doba trvání se pohybuje od 10 do 20 minut.
3. **Dielektrickým ohřevem** - skořepiny se zvlhčí vodou a pak se umístí v poli vysokofrekvenčních oscilací. Vlhká skořepina se rychle ohřeje, vosk se těsně u skořepiny odtaví a vytvoří se dilatační spára, jež zabrání popraskání skořepiny rozpínajícím se voskovým modelem. U této metody je možná automatizace.



4. **Horkým vzduchem** - proud horkého vzduchu se zavádí do středu vtoku. Ten s protaví dřívě než se celý model ohřeje a k odtavování pak dochází z vnitřku.
5. **V autoklávu** - V současnosti je to nejpoužívanější metoda. Vytavení modelů se provádí tepelným šokem přehřátou párou v zařízení, které se nazývá autokláv nebo boilerkláv. Protože teplota páry záleží na jejím tlaku, používají se zařízení, která pracují s tlaky od 0,6 až 0,8 MPa při teplotě páry od 160 do 170°C. Skořepiny jsou v autoklávu umístěny tak, aby z nich vosk mohl volně vytékat. Vytavený vosk se zachycuje ve sběrné nádobě a po regeneraci se znovu používá. V dnešní době jsou zařízení vybavena sadou kontrolních a bezpečnostních prvků, které kontrolují výkon, přetlak, těsnost apod. [6]



Obrázek 7- Vytavování vosku v boilerklávu

## **3 Výroba formy pomocí 3D tisku**

V praktické části bych rád více přiblížil způsob tvorby a uvedl základní kroky k dosažení vytvoření formy pomocí 3D tisku.

### **3.1 Příprava k realizaci**

Cílem praktické části mé maturitní práce je především vytvoření 3D modelu pomocí programu Z-Brush a následné zhotovení formy pomocí 3D tisku, sádry a cínu. V následujících podkapitolách proto uvedu, jak jsem postupoval.

#### **3.1.1 Stanovení postupu řešení**

Pro výrobu formy pomocí 3D tisku jsem si tedy stanovil následující kroky řešení:

- 1) **Výběr vhodných programů**
- 2) **Výběr podkladu pro vytvoření 3D modelu**
- 3) **Vytvoření základního modelu**

- 4) Modelování detailů
- 5) Vytvoření akční polohy modelu
- 6) Modelování zbylých částí
- 7) Příprava modelu pro 3D tisk
- 8) 3D tisk
- 9) Tvorba formy
- 10) Pokus o vytvoření odlitku
- 11) Oddělení formy od odlitku

## 3.2 Popis vlastních postupů a výsledků

Popis pracovních postupů, řešení a výsledků.

### 3.2.1 Výběr vhodného programu

Výběr vhodných programů byla jedna z nejdůležitějších částí mé maturitní práce. Vybral jsem si program Z-Brush a Cinema 4D. Jelikož jedna z mých podmínek, na které jsem při výběru vhodného programu hleděl, byla možnost vytvoření co možná nejhezčího modelu dinosaura pomocí „digitálního sochařství“ s možností kreslit a upravovat povrchy 3D modelů. Z-Brush jsem tedy pro tento účel vybral jakožto nejvhodnější, ačkoliv s ním nemám dlouhodobé zkušenosti. Další podmínkou bylo, možnost importovat objekt do programu, ve kterém budu moci upravit různé detaily k přípravě pro 3D tisk, proto jsem jako druhý program zvolil Cinemu 4D. Každopádně v procentuálním poměru využití programů, byla Cinema 4D čistě supportovacím programem, která zahrnovala odhadem 15% práce.



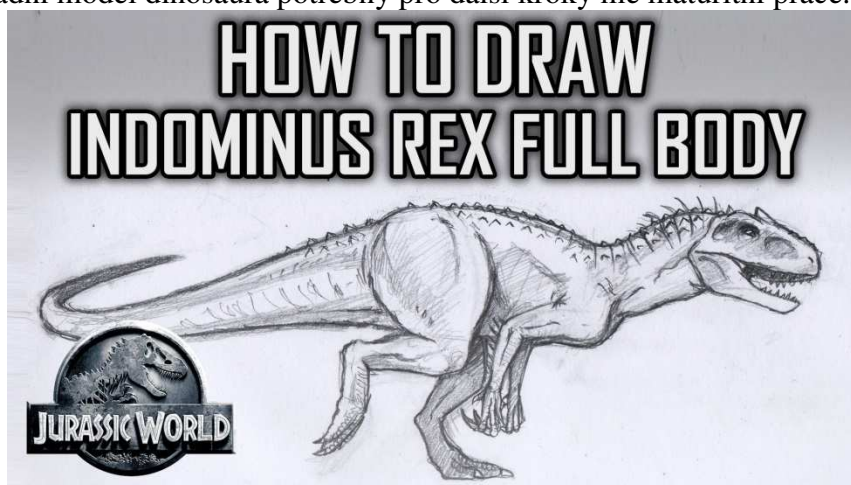
Obrázek 8- Logo Z-Brush



Obrázek 9- Logo Cinema 4D

### 3.2.2 Výběr podkladu pro vytvoření 3D modelu

Řešením tohoto kroku bylo nalezení vhodného podkladu pro vytvoření základního modelu. Pro tento účel jsem zvolil následující nákres. Podstatné pro mne byly dobře viditelné obrysy a vyobrazení dinosaura z boční strany. Díky tomu, jsem mohl začít modelovat základní model dinosaura potřebný pro další kroky mé maturitní práce.



Obrázek 10- Podklad pro vytvoření 3D modelu

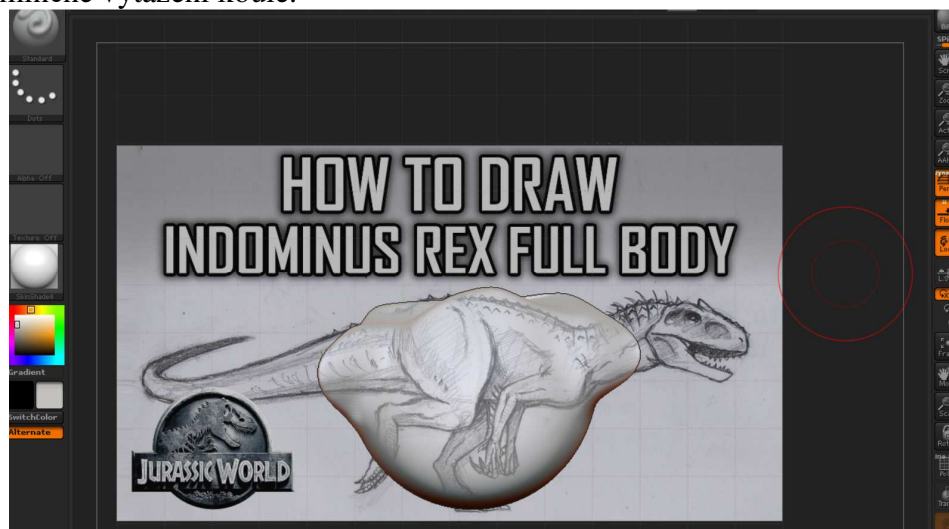
Nákres jsem umístil do pozadí z důvodu, abych před nákres mohl vložit základní průhledný 3D objekt, který jsem následně dále modeloval podle předlohy.



Obrázek 11- Předloha na pozadí

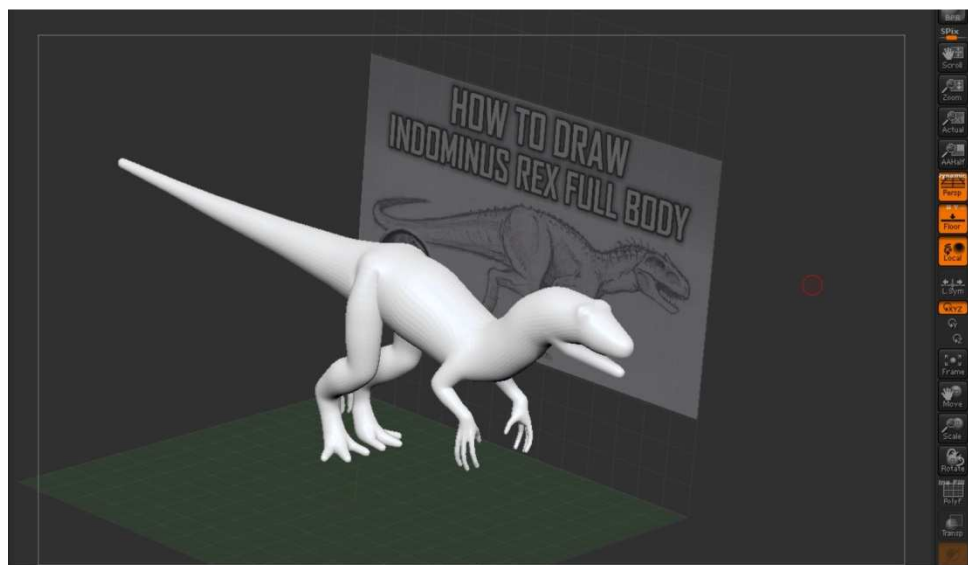
### 3.2.3 Vytvoření základního modelu

V tomto kroku jsem vytvořil základní model. Tento krok zahrnoval vytahování koule pomocí „sochařského“ štětce Standard, díky kterému jsem vytvořil základní podobu dinosaura. Zajímavé na programu Z-brush je, že některé modely lze vytvořit pouze za pomoci vytahování či modelování jednoho základního objektu. V mém případě již výše zmíněné vytážení koule.



Obrázek 12- Začátek modelování

Ukázka modelu přibližně po prvních 1-2 hodinách práce se základními štětci.



Obrázek 13- Model po 1-2 hodinách

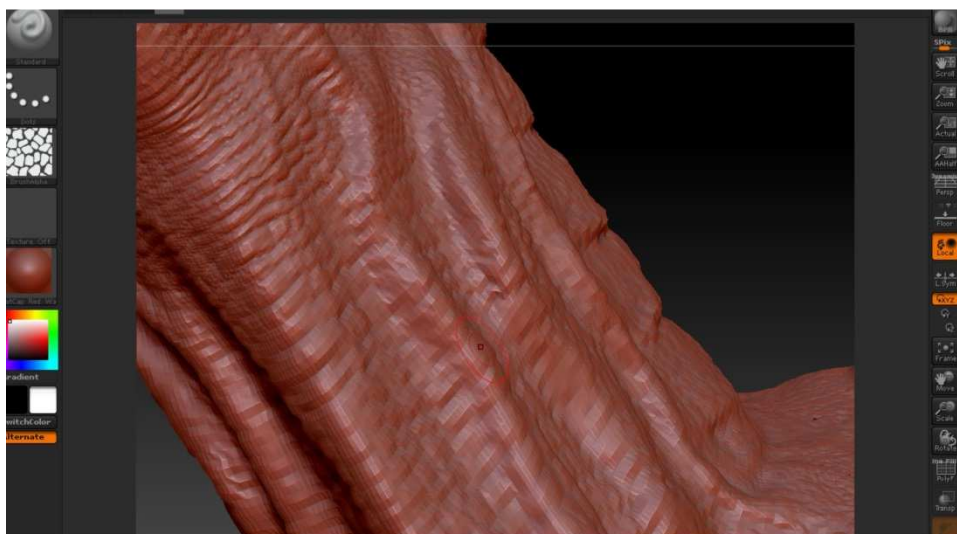
### 3.2.4 Modelování detailů

Další krok zahrnoval vymodelování detailů modelu dinosaura. Pro tento krok bylo potřeba několik modelovacích štětců. Štětce jsem používal jak ze základní nabídky, tak jsem i potřebné štětce stahoval. Tento krok pokládám za časově nejnáročnější, jelikož vymodelování detailů je ta nejpracnější část z modelovací části.



Obrázek 14- Z-Brush štětce

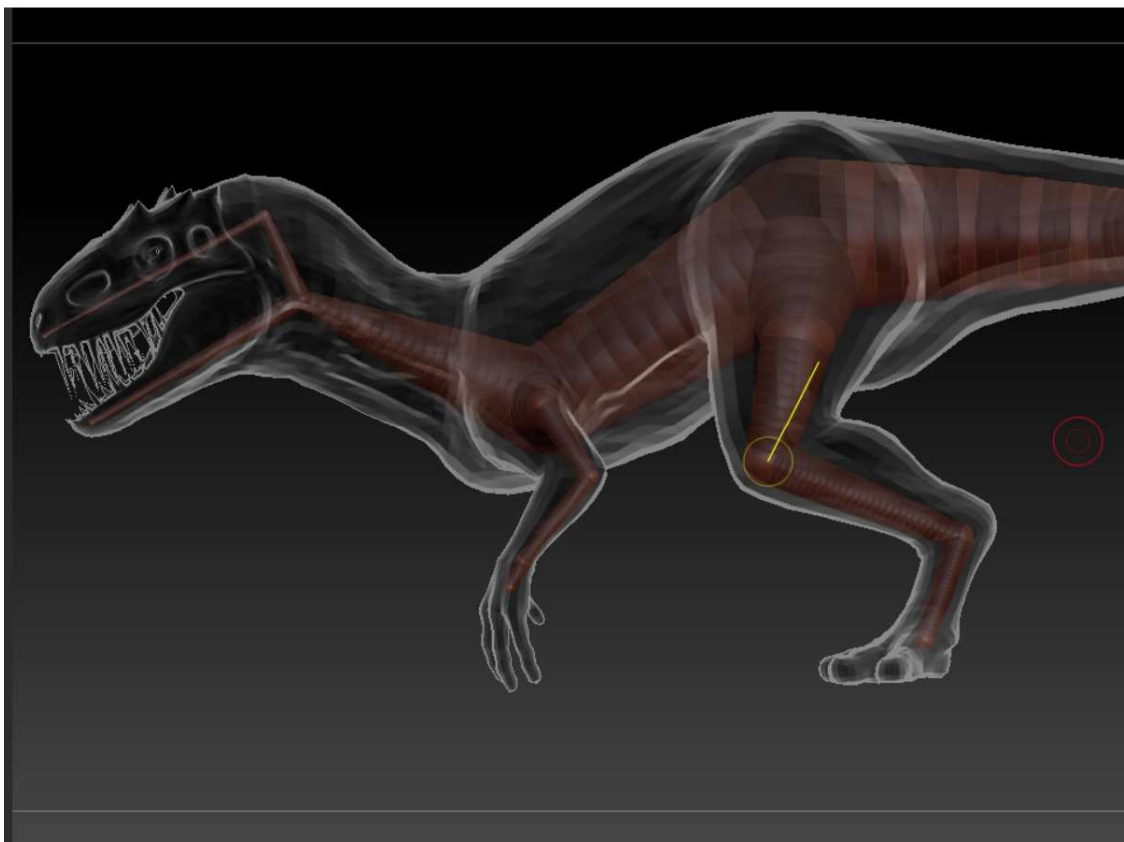
Zde probíhala práce na detailech na části krku pomocí stáhnutých štětců, které umožnili reálnější pohled na kůži dinosaura.



Obrázek 15- Modelování detailů

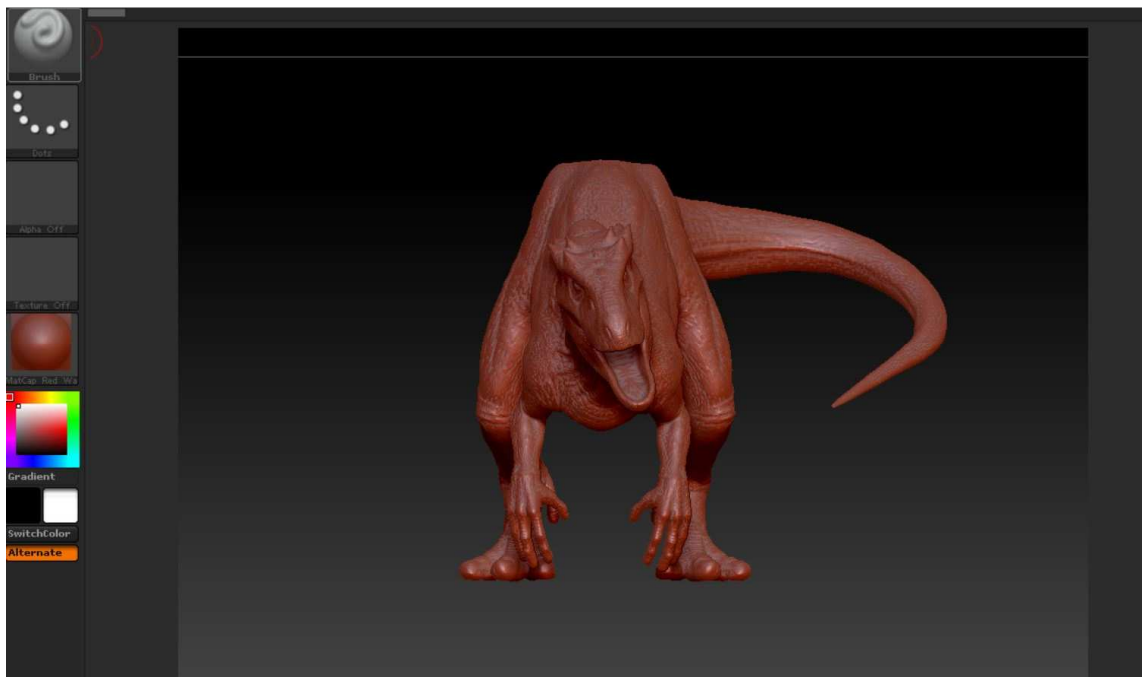
### 3.2.5 Vytvoření akční polohy modelu

V tomto následujícím kroku, bylo za úkol vytvořit akční polohu modelu. Což znamená vytvořit polohu dinosaura tak, aby vypadala následně po vytisknutí co nejrealističtěji. Proto jsem v modelu vytvořil jednoduchou kostru pomocí funkce Transpose Master kterou jsem si uzpůsobil tak, abych s částmi dinosaura mohl různě pohybovat nebo je naklánět. Výhodou pohybu modelu za pomoci kostry je minimální ztráta polygonů, takže model dinosaura nepřišel o žádné estetické a modelové vlastnosti



Obrázek 16- Vytvoření kostry modelu

Zde je dinosaur ukázán již po úpravách kostry. Jediným problémem bylo, že po uložení úprav kostry se již nešlo k tomuto kroku vrátit, takže je bylo zapotřebí kostru vytvářet znova, pokud bych potřeboval s kostrou dinosaura jakkoliv pohnout.



Obrázek 17- Pohled na přední stranu

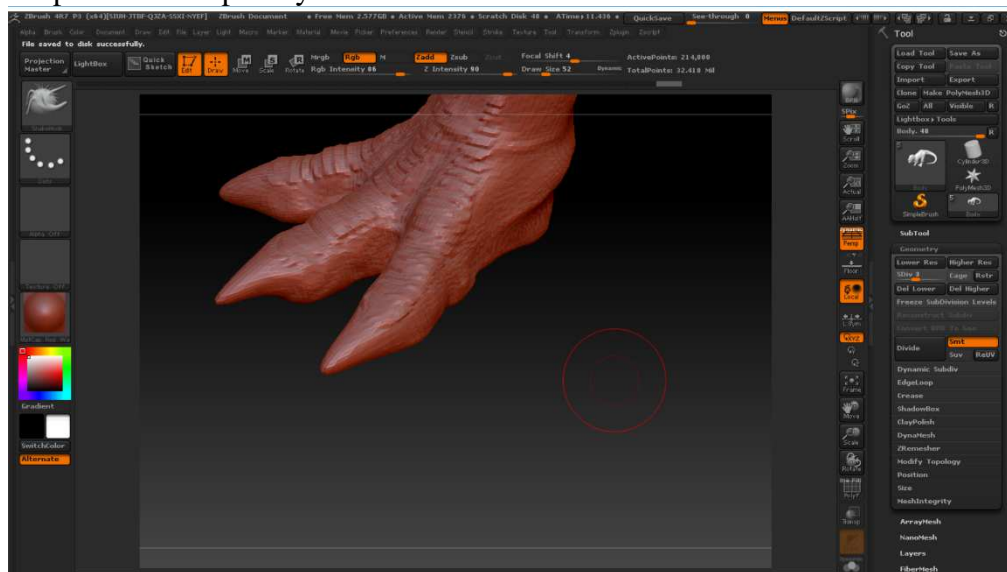


Obrázek 18- Pohled na boční stranu

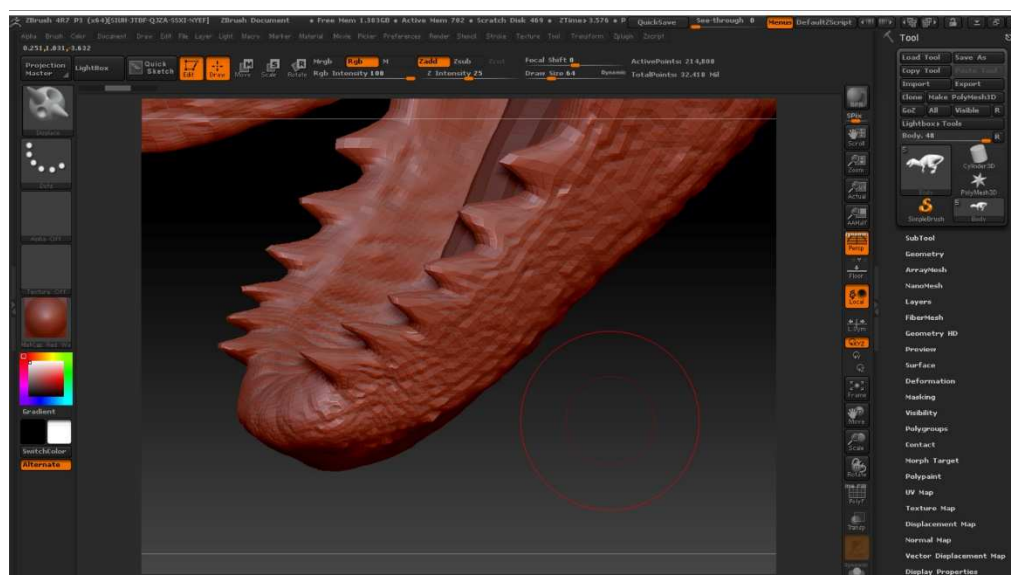


### 3.2.6 Modelování zbylých částí

Nakonec jsem v modelovací části své maturitní práce domodeloval zbylé potřebné detaily. Jednalo se především o drápy, čelisti a zuby dinosaura. Tento krok jsem si nechal na konec z důvodu případných problémů pohybu s kostrou, jelikož by se mohlo stát, že zuby či drápy by se nepohnuly zároveň s celým tělem, proto bylo výhodnější tento krok dělat až po nastavení polohy dinosaura.



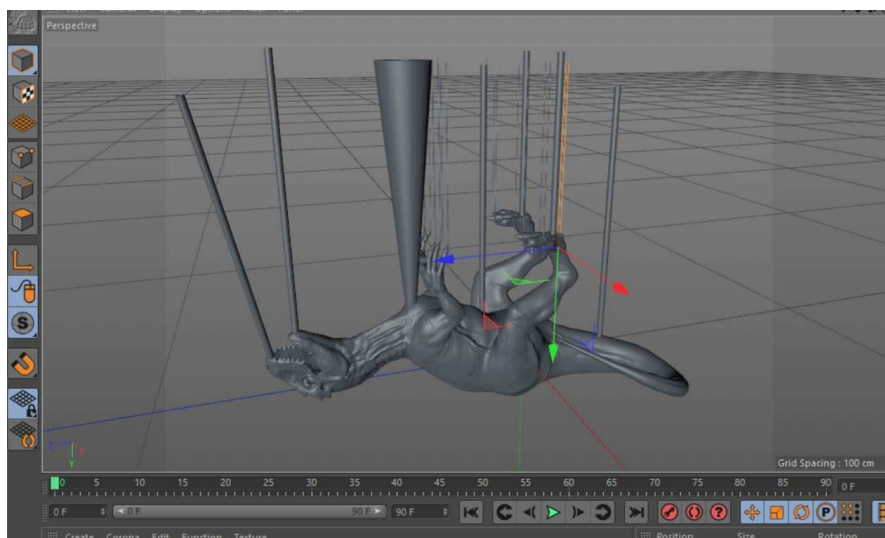
Obrázek 19- Modelování drápů



Obrázek 20- Modelování zubů

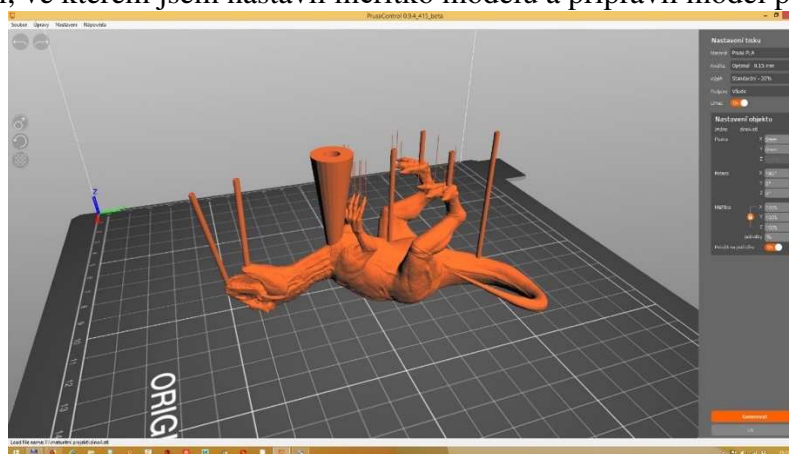
### 3.2.7 Příprava 3D modelu pro 3D tisk

Při přípravě 3D modelu pro 3D tisk bylo nejdříve zapotřebí importovat model do Cinemy 4D. Následně jsem v Cinemě 4D vytvořil k modelu výfukové a vtokové kanálky, které měli zaručit následný možný vnik cínu a únik vzduchu z vytvořené formy.



Obrázek 21- Model s výfukovými a vtokovými kanálky

Ze Cinemy 4D jsem model exportoval i s výfukovými a vtokovými kanálky do formátu STL, který je určen pro 3D tisk. Tento soubor jsem otevřel v programu 3D tiskárny PrusaControl, ve kterém jsem nastavil měřítko modelu a připravil model pro 3D tisk.

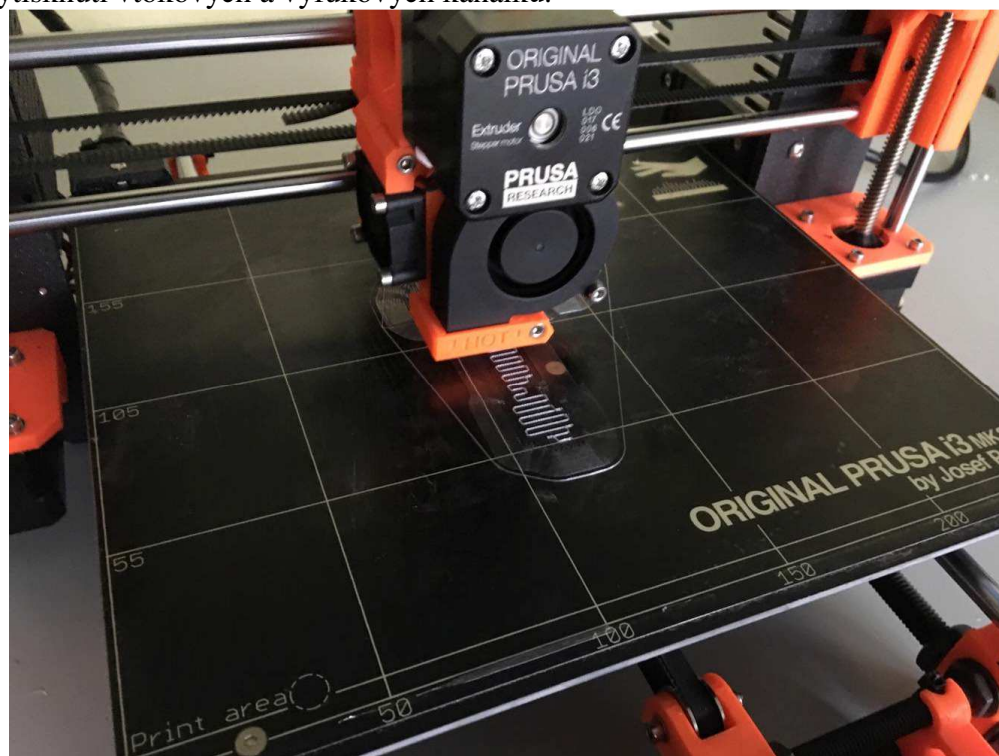


Obrázek 22- Model v programu 3D tiskárny

### 3.2.8 3D tisk

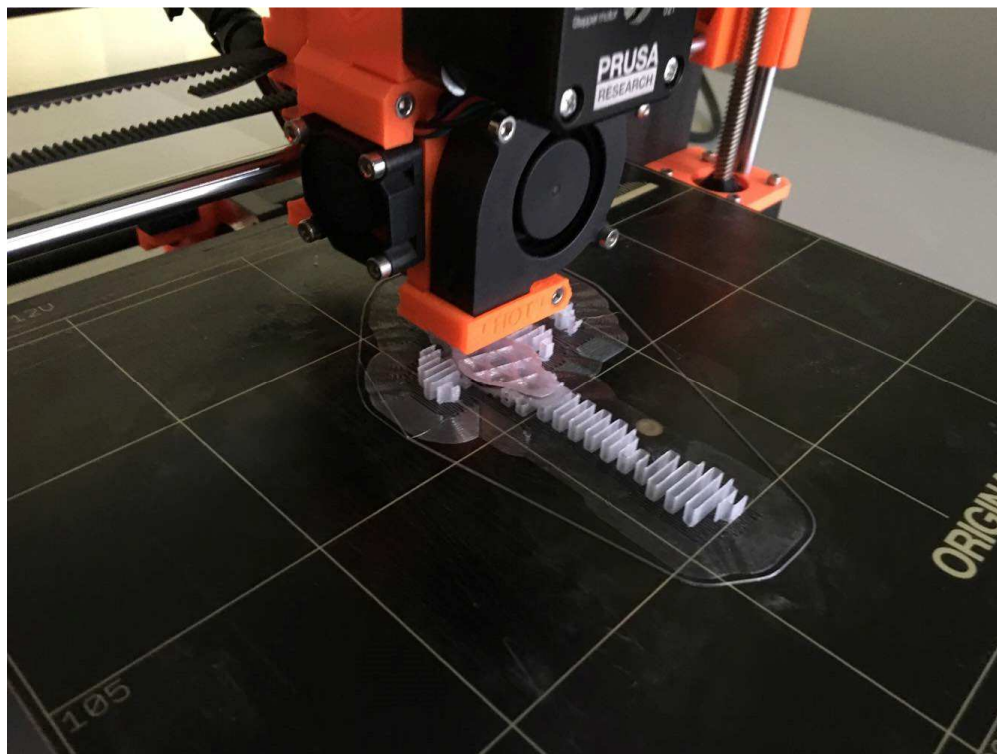
Po následném oskenování, upravení měřítka a dalších menších úpravách, jsem SD kartu, na kterou se nahrál model připravený k tisku, vložil do portu 3D tiskárny a dal pokyn k tisku. Tisknul jsem na tiskárně od firmy „Prusa Research“, přesněji na modelu i3 MK2, pomocí voskovitého materiálu MoldLay. MoldLay je vhodný pro tisk modelu, který je určen pro lití na ztracenou formu. Materiál bylo vhodné při tisku udržovat při teplotě 210 °C. Zajímavé na tomto materiálu je, že v České Republice je tento materiál podstatně zatím málo využíván. Důkazem je malá dostupnost na českých internetových portálech

Na této fotce je zobrazen začátek tisku, kde si 3D tiskárna nejdříve začala tisknout podstavu pro stabilní tisk, jelikož jsem model tiskl „vzhůru nohama“. Důvodem bylo správné vytisknutí vtokových a výfukových kanálků.



Obrázek 23- Začátek 3D tisku

Fotografie tisku po první půl hodině. Vše probíhalo podle předpokladů a bez sebemenších problémů.



Obrázek 24- Tisk po prvních 30 minutách

Zde je ukázáno základní nastavení probíhajícího tisku, procentuální splnění tisku, teplota a atd. 3D tiskárna držela správnou teplotu a materiál zatím splňoval svojí funkci.



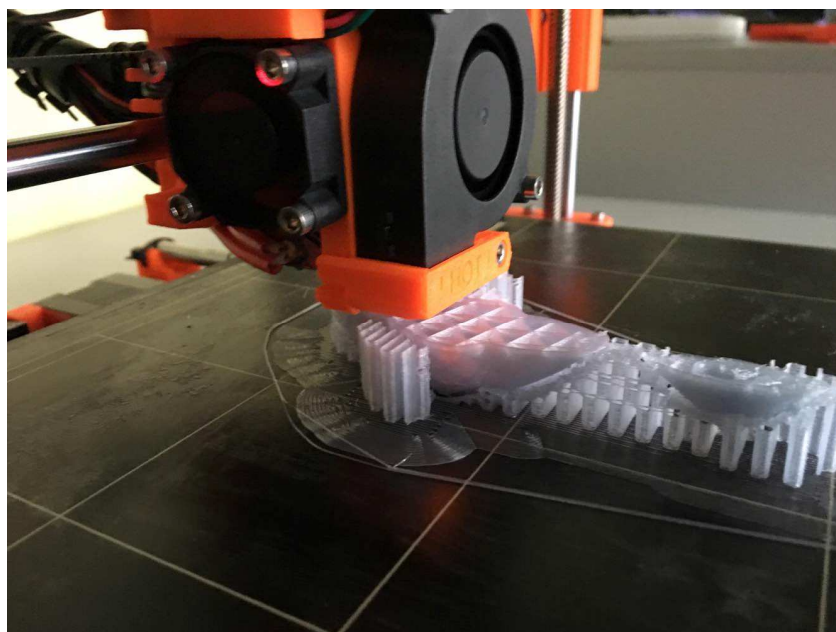
Obrázek 25- Nastavení 3D tisku

Tisk po první hodině. Tiskárna začala po vytisknutí podstavy tisknout model dinosaura. Začínají být vidět první obrysy.



Obrázek 26- Tisk po první hodině

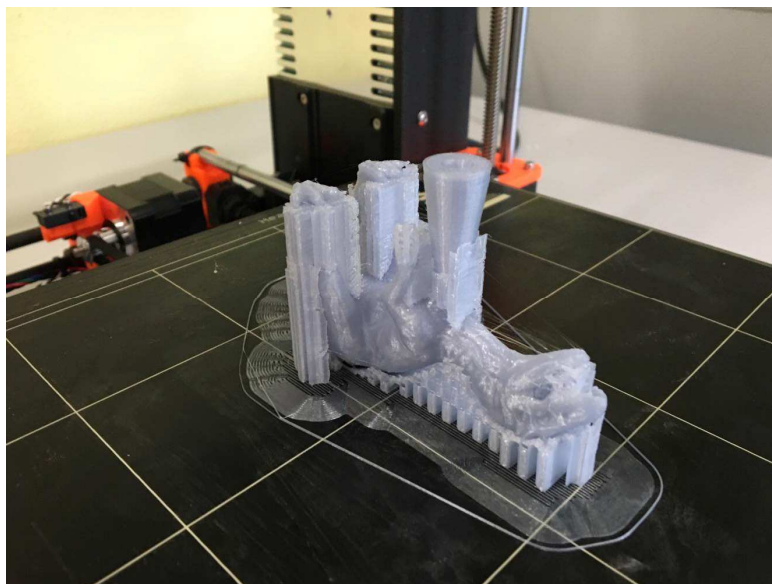
Po druhé hodině tisku byly už ztelněji vidět obrysy modelu. Tisk probíhal bez komplikací.



Obrázek 27- Tisk po druhé hodině

Tisk byl přibližně po 12 hodinách dokončen. V průběhu tisku nenastaly žádné komplikace co se teploty či materiálu týče. Bohužel se nevytiskly některé kanálky. Dů-

vodem bylo nejspíše malé měřítko modelu při tisku, takže 3D tiskárna nemohla informace ohledně kanálků zpracovat a vytisknout je. Také nebyly vytisknuty všechny detaily. Tento problém byl nejspíše zaviněn až moc velikou podrobností modelu s kombinací chemického složení materiálu MoldLay.



Obrázek 28- Dokončení tisku

Model, který je již oddělený od podstavy a připraven pro vytvoření formy.



Obrázek 29- Model oddělený od podstavy

### 3.2.9 Tvorba formy

Nevytisknuté kanálky jsem nahradil částmi materiálu MoldLay, které jsem k modelu přidělal tak, aby se při zahřívání vypálily i s modelem dinosaura.



Obrázek 30- Model s kanálky

Tvorba formy proběhla za pomoci 4 dílů dřevěných překližek, mezi které jsem umístil vytisknutý model z MoldLay materiálu. Následně jsem mezi překližky na model nalil sádro, která vytvořila potřebnou formu. Bylo nutné dávat pozor, aby se vtokové a výfukové kanálky nezalily.



Obrázek 31- Model zalitý sádro

Ukázka sádrové formy po odstranění překližek a po 30 hodinách schnutí. Formu bylo nutné před vytvořením odlitku nechat vyschnout z důvodu hrozícího prasknutí.



Obrázek 32- Forma po 30 hodinách schnutí

Dalším krokem bylo vložení sádrové formy do domácí trouby při teplotě 270 °C. Díky vysoké teplotě model z materiálu MoldLay vytekl ze sádrové formy, a tak vznikl prostor pro vyplnění formy cínem.



Obrázek 33- Vypalování MoldLay materiálu pomocí domácí trouby



Protože teplota domácí trouba nebyla schopna rozehtát veškerý materiál MoldLay, bylo nutné využít metodu horkého vzduchu pomocí horkovzdušné pistole s kombinací ohřevu pomocí elektrického vařiče, díky kterému se forma zahřívala i ze spodní části.

Z důvodu rychlého zvýšení teploty, pomocí horkovzdušné pistole, forma lehce popraskala a začala se povrchově drobit. Proto jsem pro jistotu sádro zpevnil pomocí hliníkového alobalu tak, aby se částečně neodrolila a zbytečně neznečistila pracovní prostředí.



Obrázek 34- Forma zahřívána pomocí horkého vzduchu

### 3.2.10 Pokus o vytvoření odlitku

Posledním krokem byl pokus o vytvoření cínového odlitku. Forma se opět dala předehtát do horkovzdušné trouby, aby udržela dostatečnou teplotu.

Následně jsem rozehtál cín na elektrickém vařiči a s pomocí horkovzdušné pistole. Teplota dosahovala přibližně 370 °C



Obrázek 35- Rozehřívání cínu

Poté jsem si rozehrátou formu připravil pro zalití cínem. Cín jsem do formy vléval největším vtokovým kanálkem, aby z ostatních kanálků mohl odcházet zbylý MoldLay a vzduch.



Obrázek 36- Lití cínu do formy

Bylo možné sledovat, jak cín v kapalném skupenství vniká do formy a zbylý MoldLay odchází pomocí kanálků. Zajímavé bylo, že zbylý MoldLay unikal i vtokovým kanálkem zároveň s vnikáním cínu.



Obrázek 37- Únik materiálu MoldLay



Obrázek 38- Únik materiálu MoldLay (2)

### 3.2.11 Oddělení formy od odlitku

Po ztuhnutí cínu následovalo vložení rozehráté formy do vodní lázně. Díky studené vodní lázni se sádrová forma začala drolit a rozpadat. Tento efekt pomohl při oddělování odlitku od formy.



Obrázek 39- Oddělování odlitku po 1 minutě



Obrázek 40- Oddělování odlitku po 4 minutách

Po oddělení bylo očividné, že i přes malý vtokový kanálek, cín vnikl do velké části modelu dinosaura. Nevnikl ale do komplexnějších míst, jako byly přední a část

zadních končetin. Důvodem tohoto problému bylo nejspíše malé měřítko modelu, malé vtokové a výfukové kanálky a pravděpodobně i velká komplexnost a složitost modelu.



Obrázek 41- Oddělování odlitku po 10 minutách



Obrázek 42- Oddělování odlitku po 15 minutách

## 4 Závěr

Vymodelování modelu v grafických programech, 3D tisk pomocí materiálu MoldLay proběhl téměř se 100 % úspěchem a při následném zhotovení formy pomocí sádry nenašly žádné problémy. Vytvoření odlitku proběhlo přibližně s 50 % úspěchem. Cín vnikl do hlavní části torza, zadní části modelu a do částí končetin. Nedokázal ale proniknout přes veškerý materiál MoldLay, který ve formě zůstal. Příčina tohoto problému závisela na malých únikových kanálcích, protože viskozita rozehřátého materiálu MoldLay byla větší než se předpokládalo. Další problém nastal díky malému měřítku a komplexnosti modelu dinosaura. Kvůli složitosti modelu byl nutný velký počet vtokových a výfukových kanálků, které museli mít malý průměr, právě kvůli malému měřítku.

I přes veškeré problémy, lze o MoldLay materiálu říct, že se jeví jako velice účinný a s kombinací 3D tiskárny i jako velice efektivní při vytváření formy za pomoci 3D tisku. Nutné je pouze dodržení správného měřítku při 3D tisku, nepřiliš komplexního modelu a především správný průměr vtokových a výfukových kanálků, jelikož viskozita materiálu MoldLay je větší, než u klasického vosku.

Při výrobě formy je nutno dávat pozor, aby sádra vnikla mezi veškerá důležitá místa a aby se nezalily vtokové a výfukové kanálky. Posledním krokem při vytváření formy, je nutné sádro nechat minimálně den vyschnout, protože by nám vlhká sádra při odlévání praskla

Cín je před odléváním nutné držet minimálně kolem 350 °C. Při nižší teplotě by hrozila změna skupenství z kapalného na pevné. Cín je nejvhodnější do formy vlévat co největším vtokovým kanálkem.



Obrázek 43- Výsledek odlévání

## 5 Seznam použitých zdrojů a literatury

Pixologic ZBrush: dokonalé 3D malování. *Www.grafika.cz* [online]. Praha: Grafika.cz, 2010 [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://www.grafika.cz/rubriky/software/pixologic-zbrush-4-0-dokonale-3d-malovani-137936cz> [1]

Cinema 4D. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 31. 1. 2018 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Cinema\\_4D](https://cs.wikipedia.org/wiki/Cinema_4D) [2]

Cinema 4D R16 - CAD Zone. CAD Zone [online]. Copyright © Gustavo Ferrero Moya [cit. 26.02.2018]. Dostupné z: <https://cadzone.cz/cinema-4d-r16> [3]

Lexa, Petr. *3D tisk a jeho využití v technickém vzdělávání*. České Budějovice. 2015. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Pedagogická fakulta. [4]

MoldLay voskový filament (Wax-Alike) 1,75mm 250g - Materialpro3d.cz. Materiály a doplňky pro 3D tisk - filamenty - Materialpro3d.cz [online]. Copyright © Materialpro3d.cz, všechna práva vyhrazena [cit. 20.03.2018]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/moldlay-voskovy-filament-1-75mm-250g/> [5]

Žuja, Jaroslav. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno. 2013. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. [6]

## 6 Seznam obrázků

Obrázek 1- Pixologic ZBrush 4.0 - některé z důležitých skrytých (v praxi spíše překryvných) pracovních palet editoru se aktivují přes různé hotkeys.....	2
Obrázek 2- Pixologic ZBrush 4.0 - jedna z kategorií nabídky kreslicích štětců, kterými lze malovat přímo po povrchu 3D modelů.....	3
Obrázek 3- Historie 3D tisku .....	5
Obrázek 4- MoldLay materiál .....	8
Obrázek 5- Metoda vytavitelného vosku .....	10
Obrázek 6- Dilatační spára.....	11
Obrázek 7- Vytavování vosku v boilerklávu .....	12
Obrázek 8- Logo Z-Brush .....	13
Obrázek 9- Logo Cinema 4D .....	14
Obrázek 10- Podklad pro vytvoření 3D modelu .....	14
Obrázek 11- Předloha na pozadí .....	15
Obrázek 12- Začátek modelování .....	15
Obrázek 13- Model po 1-2 hodinách .....	16
Obrázek 14- Z-Brush štětce .....	16
Obrázek 15- Modelování detailů.....	17
Obrázek 16- Vytvoření kostry modelu.....	18
Obrázek 17- Pohled na přední stranu .....	19
Obrázek 18- Pohled na boční stranu .....	19
Obrázek 19- Modelování drápů .....	20
Obrázek 20- Modelování zubů.....	20
Obrázek 21- Model s výfukovými a vtokovými kanálky.....	21
Obrázek 22- Model v programu 3D tiskárny .....	21
Obrázek 23- Začátek 3D tisku.....	22
Obrázek 24- Tisk po prvních 30 minutách.....	23
Obrázek 25- Nastavení 3D tisku .....	23
Obrázek 26- Tisk po první hodině .....	24
Obrázek 27- Tisk po druhé hodině.....	24
Obrázek 28- Dokončení tisku .....	25
Obrázek 29- Model oddělený od podstavy .....	25
Obrázek 30- Model s kanálky .....	26
Obrázek 31- Model zalitý sádrou.....	26
Obrázek 32- Forma po 30 hodinách schnutí .....	27
Obrázek 33- Vypalování MoldLay materiálu pomocí domácí trouby.....	27
Obrázek 34- Forma zahřívána pomocí horkého vzduchu .....	28
Obrázek 35- Rozehřívání cínu .....	29
Obrázek 36- Lití cínu do formy .....	29
Obrázek 37- Únik materiálu MoldLay .....	30



---

Obrázek 38- Únik materiálu MoldLay (2) .....	30
Obrázek 39- Oddělování odlitku po 1 minutě.....	31
Obrázek 40- Oddělování odlitku po 4 minutách .....	31
Obrázek 41- Oddělování odlitku po 10 minutách.....	32
Obrázek 42- Oddělování odlitku po 15 minutách.....	32
Obrázek 43- Výsledek odlévání .....	33