

Tvorba fyzikálních pomůcek 3D modelováním, 3D tiskem a CNC frézku

VLADIMÍR VOCHOZKA, MICHAL ŠERÝ

Pedagogická fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

V textu příspěvku jsou nastíněny možnosti tvorby fyzikálních pomůcek využitím 3D modelování, 3D tisku a obrábění CNC frézku. Vytvořené pomůcky byly vyzkoušeny ve výuce a diskutována jsou jejich omezení a případné postupy práce při řešení úloh.

Vybrané technologie

3D modelování

Pojmem 3D modelování se rozumí proces tvarování a vytváření 3D modelu [1]. Těleso je popsáno jako mnohostěn zcela určený svými hranicemi (stěnami, hranami a vrcholy) [2].

Počítačem podporované projektování – Computer Aided Design (CAD) je využití pokročilých grafických programů místo rýsovacího prkna. Většina aplikací pracuje s parametrickými 3D modely. [3]

Výchozí objekty pro parametrické modelování mohou být definovány pomocí 2D náčrtů (profilů) nebo předdefinovaných modelů. Při tvorbě parametrického modelu je nezbytné vytvoření vzájemných vazeb jednotlivých prvků skici. Geometrické vazby definují geometrické parametry, například vzájemnou rovnoběžnost, kolmost nebo soustřednost jednotlivých čar tvořících náčrt. [4]

3D tisk

3D tisk je proces tvorby třídimenzionálních pevných objektů z digitálního souboru. Aktuálně nejrozšířenějším typem tisku je postupné nanášení roztaveného materiálu známé pod názvem Fused deposition modeling (FDM). [5]

FDM je aditivní technologie, která spočívá v tavení materiálu ve formě vlákna uvnitř hlavy extrudéru. Tavenina je vytlačována na podložku. Pohybem trysky ve dvou osách dochází postupně k nanášení velmi tenké vrstvy materiálu v rovině. Jedna vrstva tvoří horizontální rovinu průřezu budoucího modelu. Po provedení všech potřebných pohybů v jedné rovině dojde k posunu po vertikální ose a nanášení materiálu v další vrstvě. [6]

CNC Frézka

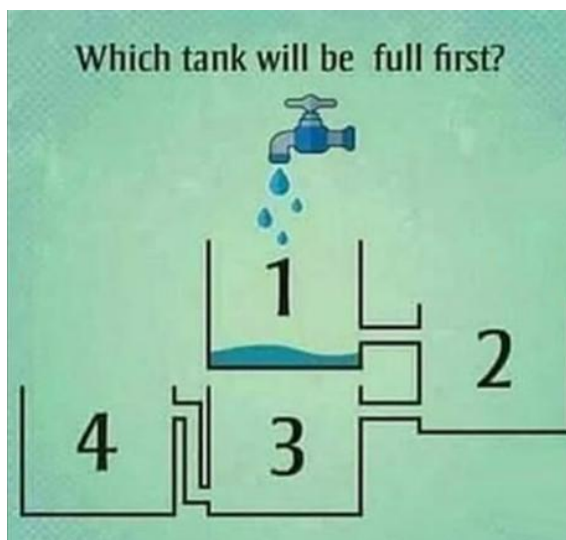
CNC frézka je, podobně jako 3D tiskárna, zařízení pro tvorbu výrobku z digitálního 3D modelu. Postup je ovšem opačný než u 3D tisku. To znamená, že pomocí nástroje odebíráme materiál z polotovaru pomocí rotujícího nástroje – frézy. Možnosti výroby jsou určeny počtem stupňů volnosti, které frézka má. Pro tyto stupně volnosti se vžil označení osy. Základní modely nesou označení 3-osé. To znamená, že pohyb frézy vůči obrobku je ve třech osách x, y a z. Pokud se rozšíří možnosti pohybu o osy rotace můžeme získat až 6-osou frézku. Hobby CNC frézy jsou typicky 3-osé stroje vhodné pro gravírování, vytváření reliéfů nebo výrobu desek plošných spojů. Typickým příkladem může být stroj označovaný CNC2418. Tyto stroje jsou vybaveny řídicí elektronikou, která „rozumí“ příkazům v G-kódu. Jedná se o jazyk vyvinutý pro řízení CNC strojů. Proto je potřeba pro vhodný progra-

mový nástroj, který z počítačového modelu vygeneruje potřebný G-kód. V našem případě jsme pro vytvoření návrhu měřítka použili program Inkscape [7] a pro generování gravírovacího G-kódu online nástroj MakerCAM [8].

Fyzikální pomůcky

Čtyři spojené nádoby

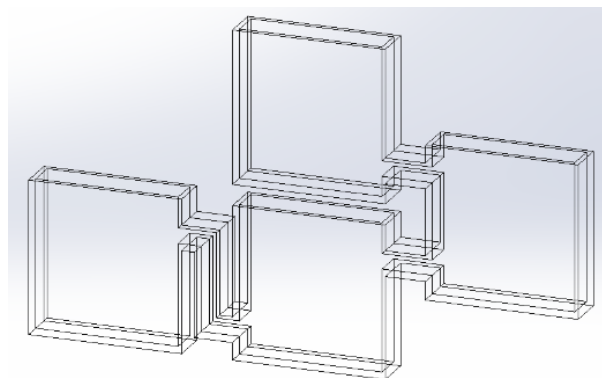
V listopadu 2016 se poprvé sociálními sítěmi začala šířit problémová úloha (Obrázek 1) s otázkou: „Která nádoba se naplní první?“ [9]



Obrázek 1. Zadání problémového úkolu v podobě šířící se na sociálních sítích [11].

V diskuzích se objevily a stále objevují různorodé odpovědi. Často i při dialogu se studenty dochází k jejich nesprávnému úsudku na základě miskoncepcí v chápání problematiky spojených nádob.

Návrh a tvorba



Obrázek 2. Čtyři spojené nádoby vymodelované v CAD programu SolidWorks.

O principu a správném řešení se lze přesvědčit spojením možností 3D modelování a tisku, kdy výsledný produkt poslouží jako výuková pomůcka.

Při tvorbě modelu se vychází ze skici, která kopíruje původní návrh a pomocí nástroje *Přidání vysunutím* o hloubku $h = 8$ mm dojde k vytvoření trojrozměrného tělesa. Všechny čtyři vrchní stěny a zároveň vnitřní část spojů, včetně vybrání objemu nádob, se odstraní nástrojem *Skořepina* s vlastností tloušťka $d = 1$ mm. Získá se tak výsledný tvar vhodný k tisku (Obrázek 2).

Z CAD softwaru SolidWorks je model exportován do formátu stereolithography (STL) a následně připravován pro tisk v programu Slic3r Prusa Edition.

Tvar modelu vyžaduje tisk s podporami. Je nutné nastavit 5% hustotu vnitřní výplně-*infill* a výšku vrstvy-*layer height* 0,35 mm, protože je k tisku použit transparentní 1,75mm filament. Po všech nastaveních je vyexportován G-kód soubor, podle kterého probíhá tisk v 3D tiskárně.

Didaktická a fyzikální analýza

Všechny vytisknuté části se chovají jako průsvitné optické prostředí, kterým světlo částečně prochází, ale také se při průchodu rozptyluje. Kapalina je lépe viditelná po obarvení potravinářským barvivem (Obrázek 3).



Obrázek 3. Vlevo spojené nádoby vytisknuté tiskárnou. Vpravo experimentální řešení otázky.

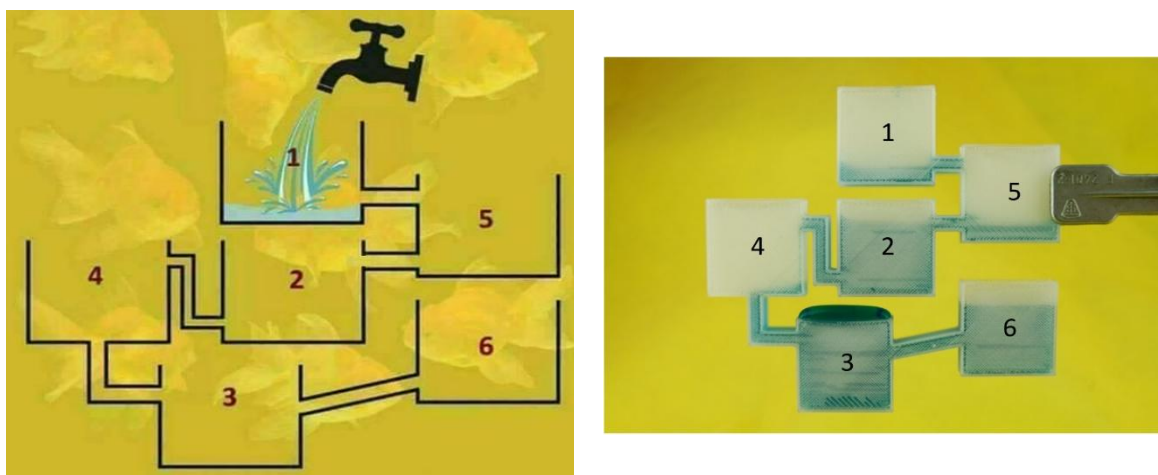
Správná odpověď na původní otázku je, že se současně naplní čtvrtá a třetí nádoba (za plnou nádobu je považována nádoba naplněná kapalinou po její horní okraj).

Zvolené velikosti spojených nádob jsou téměř hraniční, při menších rozměrech by se zapojily do chování kapaliny další fyzikální jevy. Při malém a různém průměru nádob či jejich spojů se také může projevit kapilární elevace nebo kapilární deprese. Tento jev je významný, pokud se jedná o nádoby s průměrem v řádech milimetrů a menším. [10]

Plnění vrchní nádoby je třeba dělat injekční stříkačkou dostatečně pomalu, ideálně po kapkách, jak je znázorněno na původním zadání. Důležitou podmínkou je nehybnost kapalin, při proudění mohou být tlaky kapalin v různých nádobách různé díky Bernoulliho jevu. [11]

Šest spojených nádob

Velká obliba původního zadání vedla k vytvoření další verze doplněné o dvě nádoby. Princip a chování nádob při napouštění je totožný jako v předchozím případě (Obrázek 4 vlevo).



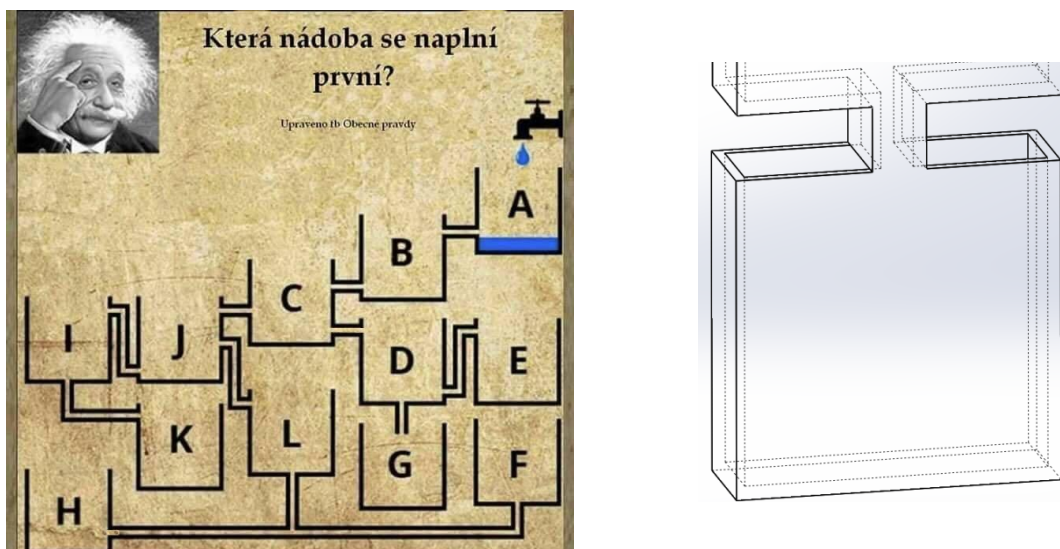
Obrázek 4. Vlevo zadání další verze problémového úkolu [12]; Vpravo experimentální ověření výsledku.

Postup nakreslení skici, vytvoření prvku těla, export a nastavení tisku se nemění. Systém spojených nádob se chová jako u prvního zadání. Při postupném plnění vodou je možné pozorovat, že se první naplní nádoba číslo tři. (Obrázek 4 vpravo)

Přidáním dalších nádob nedošlo ke zvýšení obtížnosti úlohy, řešení je jednodušší než v předchozím případě.

Dvanáct spojených nádob

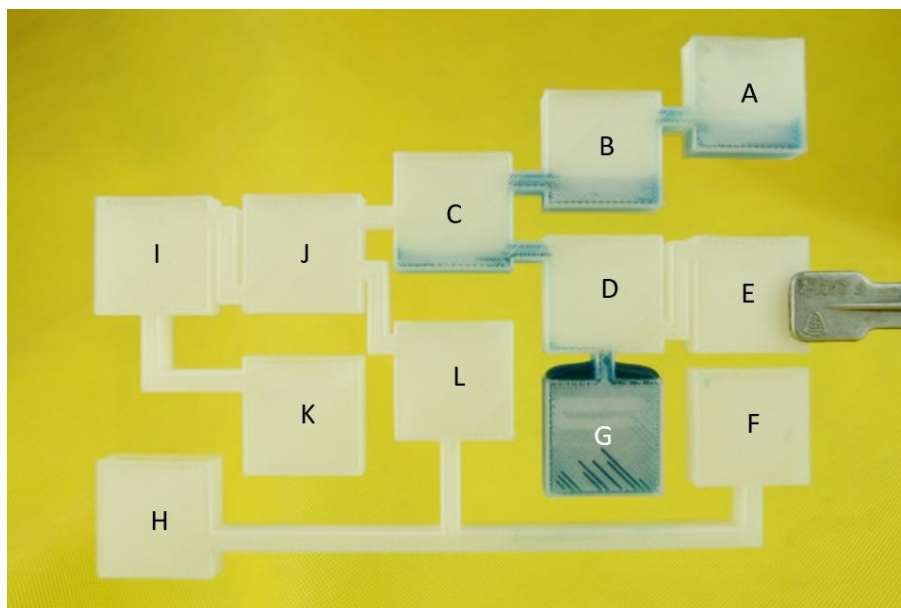
Poslední řešení úlohy je založeno na velkém množství nádob. Princip je stále stejný jako v předchozích případech. Zadání úlohy (Obrázek 5 vlevo) ideálně slouží pro ověření získaných znalostí na konci vyučování či na začátku další výuky.



Obrázek 5. Vlevo poslední zveřejněné zadání s největším počtem nádob [13]; Vpravo jedno z možných řešení pro tisk.

Nejkomplikovanější částí pro vytvoření modelu je nádoba s písmenem G. V obrázku 5 vpravo je vidět detail, jak byl tento element vyřešen pro možnosti tisku bez změny chování.

Při postupném plnění vodou je možné pozorovat, že se první naplní nádoba s písmenem G (Obrázek 6).



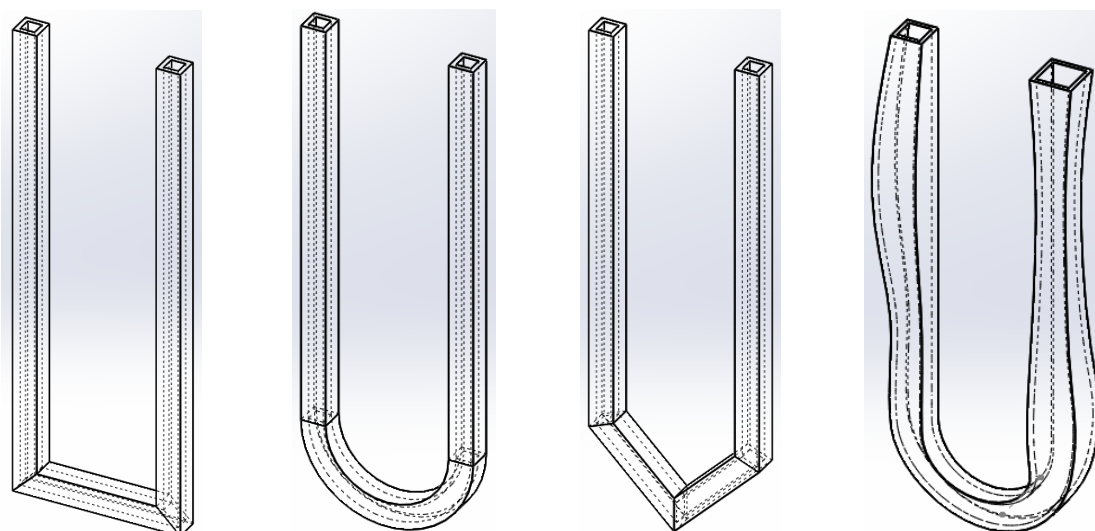
Obrázek 6. Experimentální ověření výsledku.

U trubice

U trubice je standardní model, který je používán jako ukázkový příklad v učebnicích. Diskutuje se především výška hladin v ramenech trubice v závislosti na hustotě kapalin. Téma spojených nádob bývá součástí řešení početních příkladů. Nabízí se možnost spojení řešení příkladu s experimentálním ověřením.

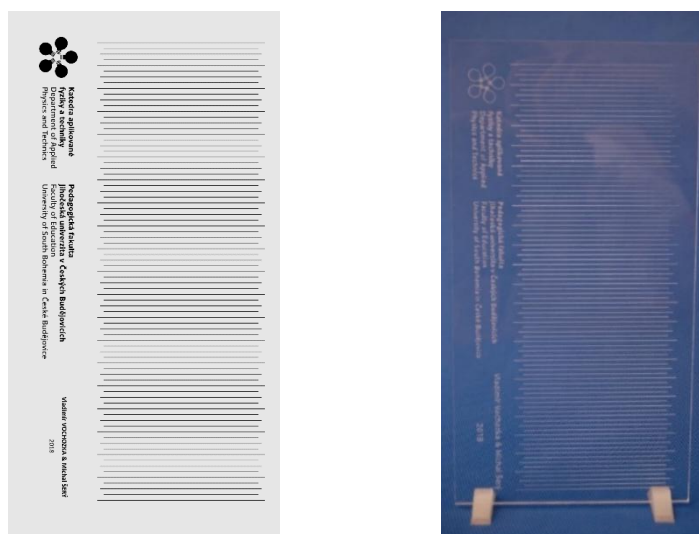
3D modelování, tisk a frézování

Studentům jsou k dispozici různé tvary spojených nádob, které jsou vymodelovány (Obrázek 7) a vytisknuty transparentním filamentem.



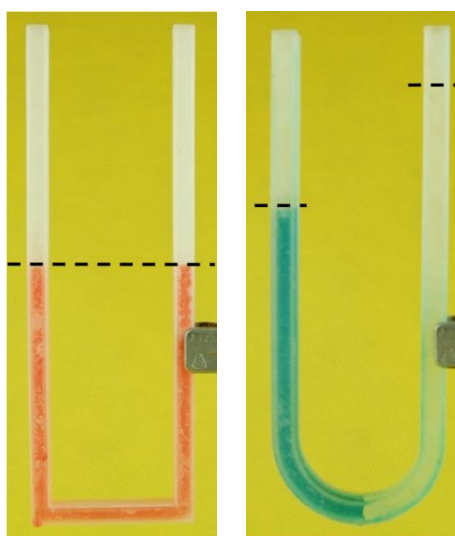
Obrázek 7. Spojené nádoby různých tvarů.

Pro přesnější odečítání rozdílů hladin je spojená nádoba připevněna suchým zipem k destičce s gravírovanými pruhy s rozestupy 2 mm. Gravírování se provádí na 3D tříosé CNC frézce. Vyznačeny jsou také vzdálenosti 5 mm a 10 mm různou šířkou pruhu v horizontálním směru (Obrázek 8).



Obrázek 8. Vlevo grafický návrh v programu Inkscape; Vpravo výsledek gravírování na frézce.

Pro lepší viditelnost obarvíme vodu potravinářským barvivem. Do U trubice nalijeme kapalinu, volná hladina v ramenech vystoupá do stejné výšky (Obrázek 9 vlevo).



Obrázek 9. Vlevo Trubice naplněná obarvenou vodou; Vpravo trubice naplněna nemísitelnými kapalinami – vodou a benzinem.

Do jednoho ramene začneme nalévat nemísitelnou kapalinu s první, například benzin k vodě (Obrázek 9 vpravo). Hustota první kapaliny je známá. Protože mají látky různou hustotu, zachovávají se podle následujícího vztahu.

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1} \quad (1)$$

K dosažení stejného tlaku na rozhraní mezi kapalinami, je nutná rozdílná výška hladin, v závislosti na jejich rozdílné hustotě.

Možný postup řešení pro výpočet hustoty benzínu

Pro měření hustoty benzínu byla použita jedna z vytisknutých spojených nádob. Naměřená výška vodního sloupce je 13 cm, sloupce benzínu 17,5 cm.

$$\rho_1 = 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ při } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_2 = ? \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$h_1 = 13 \text{ cm} = 0,13 \text{ m}$$

$$h_2 = 17,5 \text{ cm} = 0,175 \text{ m}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}$$

$$\rho_2 = \frac{h_1 \cdot \rho_1}{h_2} = \frac{0,13 \text{ m} \cdot 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{0,175 \text{ m}} \doteq 741 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hustota benzínu je $741 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Obrázek 10. Detail na stupnici areometru.

Pro ověření výpočtu lze použít přímé měření areometrem (rozsah $700\text{-}800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Hustota Naturalu 95 ρ_2 při změření hustoměrem je $741 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Obrázek 10).

Tabulková hodnota hustoty Naturalu 95 je $725\text{-}775 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ při $15 \text{ }^\circ\text{C}$ [14]. Do měření vstupují nepřesnosti využíváním tabulkové hodnoty pro hustotu vody a nedokonalým odečtením hladin kapalin díky průsvitné barvě benzínu.

Ověření

Vytisknuté pomůcky byly ověřeny ve výuce na pěti základních a třech středních školách. Všem učitelům byly předány pomůcky k výuce společně s návrhem jejich zapojení do výuky k demonstračním učitelským pokusům nebo jako frontální žakovské pokusy. Podle didaktické funkce je možné využít pomůcky k heuristickým pokusům či k demonstraci fyzikálních zákonů.

Učitelé

V rámci individuálních polostandardizovaných rozhovorů s učiteli se objevovaly následující zpětné vazby:

- „Poskytnuté pomůcky jsou netradiční a umožňují zpestřit výuku.“
- „Pomůcky jsou zajímavé a odolné.“
- „Dodané pomůcky jsem využil bez problému, nijak bych je neupravoval.“
- „Ocenila bych více kusů od každé pomůcky.“

Žáci a studenti

- „Nejvíce oceňuji spojené nádoby z facebooku, žáci měli o vyzkoušení obrovský zájem.“
- „Kvíz se spojenými nádobami jsem často diskutoval na facebooku s ostatními a nyní jsem si mobilem nahrál řešení a můžu ho potvrdit i experimentem.“

Celkově byly poskytnuté pomůcky hodnoceny pozitivně a většina vyučujících projevila zájem i o další. Zároveň v rámci rozhovorů bylo diskutováno smysluplné využití 3D tisku, který předtím učitelé považovali pouze za zajímavý, ale jejich obor nijak obohacující.

Příspěvek byl podpořen z prostředků Operačního programu Podpora rozvoje digitální gramotnosti CZ.02.3.68/0.0/0.0/16_036/0005366.

Literatura

- [1] HOROVÁ, Iva. *3D modelování a vizualizace v AutoCADu*. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 978-80-251-0900-7.
- [2] SHAN, Jami J. a MÄNTYLÄ, Martti. *Parametric and feature-based CAD/CAM: concepts, techniques, and applications*. New York: John Wiley and Sons, 1995. ISBN 0-471-00214-3.
- [3] GROOVER, Mikell P. a ZIMMERS, Emory W. *CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1984. ISBN 978-0131101302.
- [4] VLÁČILOVÁ, Hana, VILÍMKOVÁ, Milena a HENCL, Lukáš. *SolidWorks*. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 978-80-251-1314-1.
- [5] KLOSKI, Liza Wallach a KLOSKI, Nick. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [6] HORVATH, Joan C. *Mastering 3D printing*. Berkley, California : Apress, 2014. ISBN 9781484200261.
- [7] Inkscape ver. 0.92.3, [Online] 2018. [Citace: 15. 06 2018.] <https://inkscape.org/>
- [8] MakerCAM, [Online] 2018. [Citace: 15. 06 2018.] <http://www.makercam.com/>
- [9] Forward Junction US. Which tank will be full first? [Online] 2016. [Citace: 15. 04 2018.] <https://bit.ly/2KGJQaU>.
- [10] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky. 5., přeprac. vyd.* Praha: Prometheus, 2014. ISBN 9788071964384.
- [11] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1869-9.
- [12] FunGate.cz. Která nádrž se naplní jako první? FunGate.cz Brána do světa zábavy. [Online] 2017. [Citace: 15. 4 2018.] <https://bit.ly/2ISaGIQ>.
- [13] Bezstresu.cz. Která nádoba se naplní první? 99% lidí odpoví špatně! Bez-stresu.cz. [Online] 2017. [Citace: 16. 4 2018.] <https://bit.ly/2KGCg3a>.
- [14] JAHODA, Milan a SCHREIBEROVÁ, Lenka. *Fyzikální vlastnosti látek. Ústav chemického inženýrství*. [Online] VŠCHT, 2018. [Citace: 1. 2 2018.] https://vscht.cz/uchi/e_tabulky/index.html.