

TIŠTĚNÉ 3D MODELY VE VÝUCE CHEMIE

Printed 3D Models in Chemistry Education

LUDMILA NEUWIRTHOVÁ, Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta, katedra chemie ludmila.neuwirthova@uhk.cz; RAFAEL DOLEZAL, Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta, katedra chemie; KAREL KOLÁŘ, Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta, katedra chemie, Univerzita Karlova, Pedagogická fakulta, katedra chemie a didaktiky chemie; VERONIKA MACHKOVÁ, Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta, katedra chemie

Abstract

Classical examples of the material didactic aids used in chemistry teaching are rod, ball and calotte models that help students understand spatial layout and properties of molecules. Contemporary 3D printer technology is a new alternative to create a number of material models according to the actual teaching needs. Printed 3D models can be used to support active learning with practical manipulation in common learning, or to facilitate learning of students with visual impairment or impaired spatial perception. In this work, we focus on the design, preparation and application of printed 3D models to support teaching of chemistry within the following two thematic units: periodic law and properties of elements, structural properties of molecules of organic compounds. The objective is to find out how students of primary and secondary schools perceive printed models and how they help them understand the structure of chemical substances. An indispensable part of our research is also a reflection on the extent to which 3D printed models are useful tools for chemistry teachers.

Klíčová slova

didaktika chemie, 3D tisk, modely.

Key words

chemistry didactics, 3D printing, models.

Úvod

Materiální modely představují důležitou pomůcku ve výuce chemie, která napomáhá studentům chápat strukturu chemických látek a jejich fyzikálně chemické vlastnosti (Gilbert, 2004). V souladu s pedagogickou psychologií je studentům v materiálních modelech nabídnuta možnost si viděním a hmatem vytvořit konkrétní představu o struktuře molekul, snadněji si ji zapamatovat a porozumět jí. Velmi důležitou roli v oblasti vyučování chemie začala v posledních desetiletích hrát také počítačová chemie, která umožnila učitelům získávat velmi přesná data týkající se elektronové struktury a vlastností chemických látek, a ty prezentovat studentům v podobě takřka exaktních molekulárních modelů (Esselman & Hill, 2016). V úzkém vztahu k rozvoji počítačové chemie se začaly objevovat též nové technologie, které nabídly uživatelům například tiskárny schopné vytvářet hmotné 3D modely prakticky libovolných objektů, včetně modelů orbitalů a chemických struktur s realistickou geometrií (Robertson & Jorgensen, 2015; Rodenbough, Vanti, & Chan, 2015). Ačkoli se 3D tisk uplatňuje především v inženýrství k přípravě různých prototypů (např. funkční prototypy, koncepční modely), dále v biomedicině a nanotechnologiích, své místo našla tato technika i v didaktice, zabývající se tvorbou učebních pomůcek pro výuku přírodovědných oborů (Novak & Wisdom, 2017). Klasifikací a principy využití 3D modelů ve výuce různých přírodovědných předmětů se v současnosti věnují četné odborné práce, které poukazují především na potenciál modelů snižovat vysokou míru myšlenkové abstrakce, jež je vyžadována v hodinách pro žáky vyšších tříd (Jančaříková, 2017; Young et al., 2018).

V tomto příspěvku jsme si vytkli za cíl navrhnout sérii 3D tištěných modelů pro podporu výuky chemie v rámci těchto klíčových tematických celků:

1. periodický zákon a vlastnosti chemických prvků,
2. struktura organických látek.

Témata byla zvolena na základě analýzy rámcových vzdělávacích programů pro základní vzdělávání a gymnázia (RVP) a rovněž na základě naší zkušenosti. V další etapě výzkumu byly navrženy celkem 4 kategorie modelů pro potřeby výuky chemie na vybraných základních a středních školách České republiky. Tyto modely byly vytištěny a aplikovány ve výuce chemie. Pro jednotlivé pedagogické experimenty byly navrženy rozdílné didaktické metody a formy (např. skupinová práce, diskuzní metoda s pracovními listy, heuristická metoda). Pokud jde o didaktický účinek na studenty, efekt 3D tištěných modelů ve výuce byl sledován dotazníkem a pre/post-testy. Reakce učitelů na používání 3D tištěných modelů v daných pedagogických experimentech byla zjištěna rozhovorem. Výsledky této práce naznačují, že 3D tištěné modely mají pozitivní vliv na porozumění zvoleným chemickým tématům, i když aplikace těchto modelů ve výuce přináší také řadu úskalí.

Materiály a metody

Volba témat k výuce chemie a design 3D tištěných modelů

Pro výuku chemie s využitím 3D tištěných modelů byla zvolena následující čtyři klíčová témata:

1. atomový poloměr,
2. elektronegativita,
3. hmotnost atomů,
4. chiralita.

Výuka vztahující se k atomovému poloměru byla uskutečněna s využitím 3D tištěných modelů, jejichž rozměry byly odvozené od skutečné velikosti vybraných atomů. Podobně byly představeny pojmy elektronegativita a hmotnost atomů, kde byly k podpoře výuky využity modely atomů ve tvaru kruhu, které svým průměrem reprezentovaly tyto atomové vlastnosti. K názornému vyjádření změn elektronegativit atomů byl navíc použit také 3D tištěný model periodické tabulky prvků, který vyjadřoval jejich elektronegativitu výškou sloupce (obr. 1.). Pro výuku tématu chiralita bylo využito modelů enantiomerů kyseliny mléčné. Vyučovací jednotky trvaly 45 minut a pro realizaci výuky byly zvoleny tyto didaktické metody:

1. práce ve skupinách,
2. diskuze s pracovními listy,
3. heuristická metoda,
4. diskuze.

Princip 3D tisku a použité pomůcky

3D tisk je proces, při kterém se z počítačové předlohy vytváří fyzický model. Dnes nejpoužívanější technologie 3D tisku je fúzně depositní modelování (tj. fusion deposition modeling, FDM), které je založeno na tavení tenkého proužku plastového materiálu (např. polyakrylonitrilbutadienstyren, ABS, polymléčná kyselina, PLA) a jeho postupné vrstvení do podoby finálního modelu. Nicméně při 3D tisku se netiskne jen samotný finální model, ale také četná vyplňující vlákna a opěrné prvky, které pomáhají udržet tištěné struktury zamýšlenou geometrii, pokud materiál je ještě plastický a dostatečně nevychladl. Vedle počítačového modelu finálního 3D

objektu je nutné dále navrhnout vhodnou tloušťku tištěné vrstvy a množství opěrných prvků. Konečně je nutné vytištěný model mechanicky nebo chemicky upravit, opory odstranit, povrch modelu vyhladit (např. smirkovým papírem, brusnou pastou) a případně model obarvit.

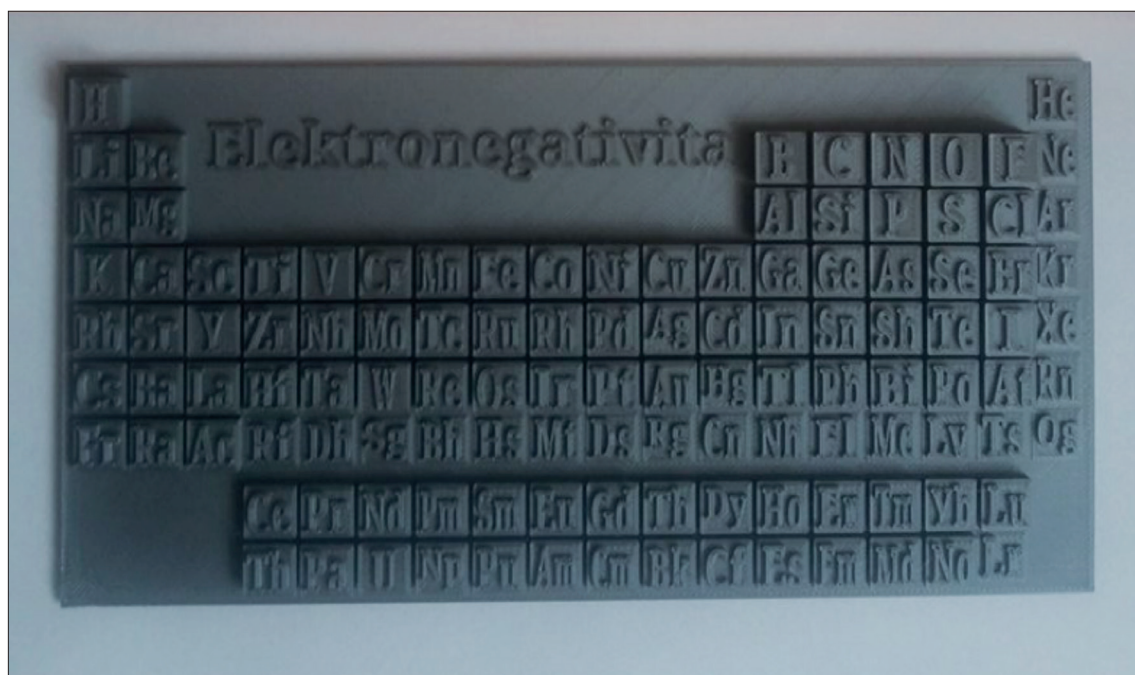
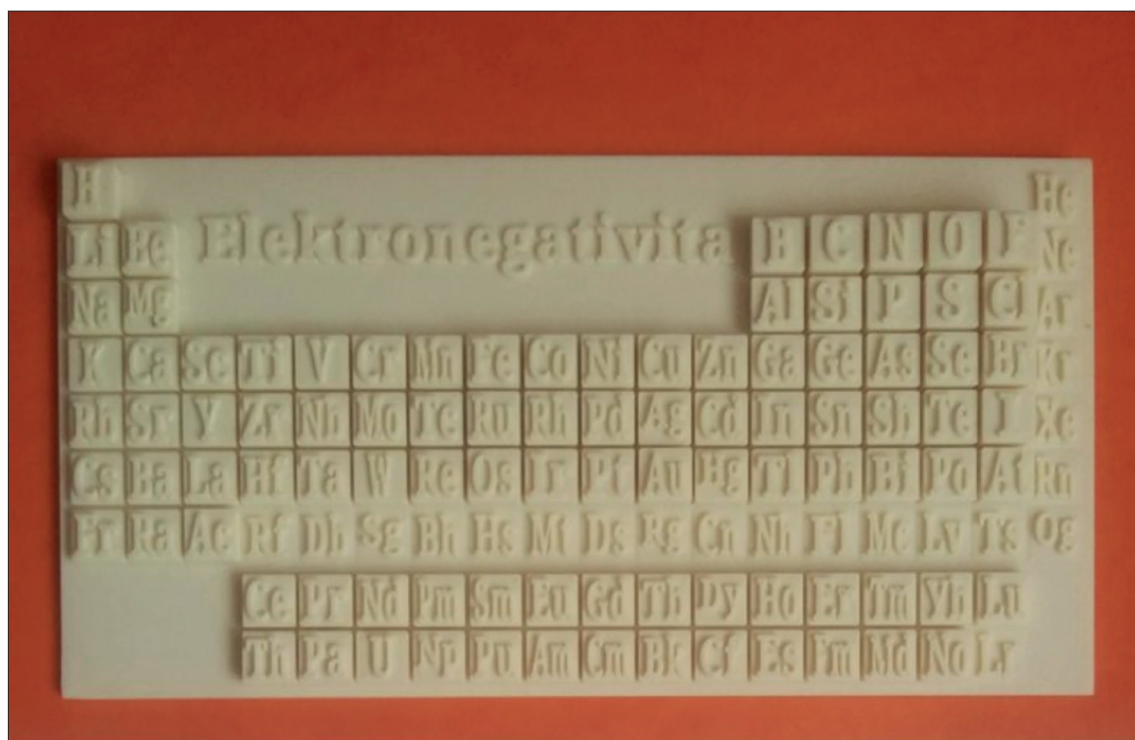
Čtyři zvolené typy modelů (tj. „kruhové“ modely atomů vyjadřující svým rozměrem atomový poloměr, elektronegativitu, atomovou hmotnost a kuličkové modely enantiomerů kyseliny mléčné) a periodická tabulka prvků vyjadřující elektronegativitu atomů byly vytištěny na tiskárně Prusa i3 MK2s s využitím PLA filamentu. Počítačové modely atomů a model periodické tabulky byly vytvořeny v programu SketchUp, přičemž byly využity hodnoty atomových poloměrů, elektronegativit a atomových hmotností, které jsou dostupné v odborné literatuře. Optimalizované modely *R* a *S* enantiomerů kyseliny mléčné s realistickou geometrií byly staženy z databáze National Institute of Health 3D Print Exchange (3dprint.nih.gov). Vstupní soubory pro 3D tiskárnu byly vytvořeny v programu Slic3r, přičemž byla zadána tloušťka tištěné vrstvy 0,2 mm a 10% vyplňování opěrného systému. Vytištěné modely byly zbaveny opor pomocí malých štípacích kleští a vyhlazeny brusným papírem o zrnitosti 400. Modely enantiomerů kyseliny mléčné byly též obarveny. Použité 3D tištěné modely jsou ilustrovány na obr. 1a, 1b, 1c, 1d.



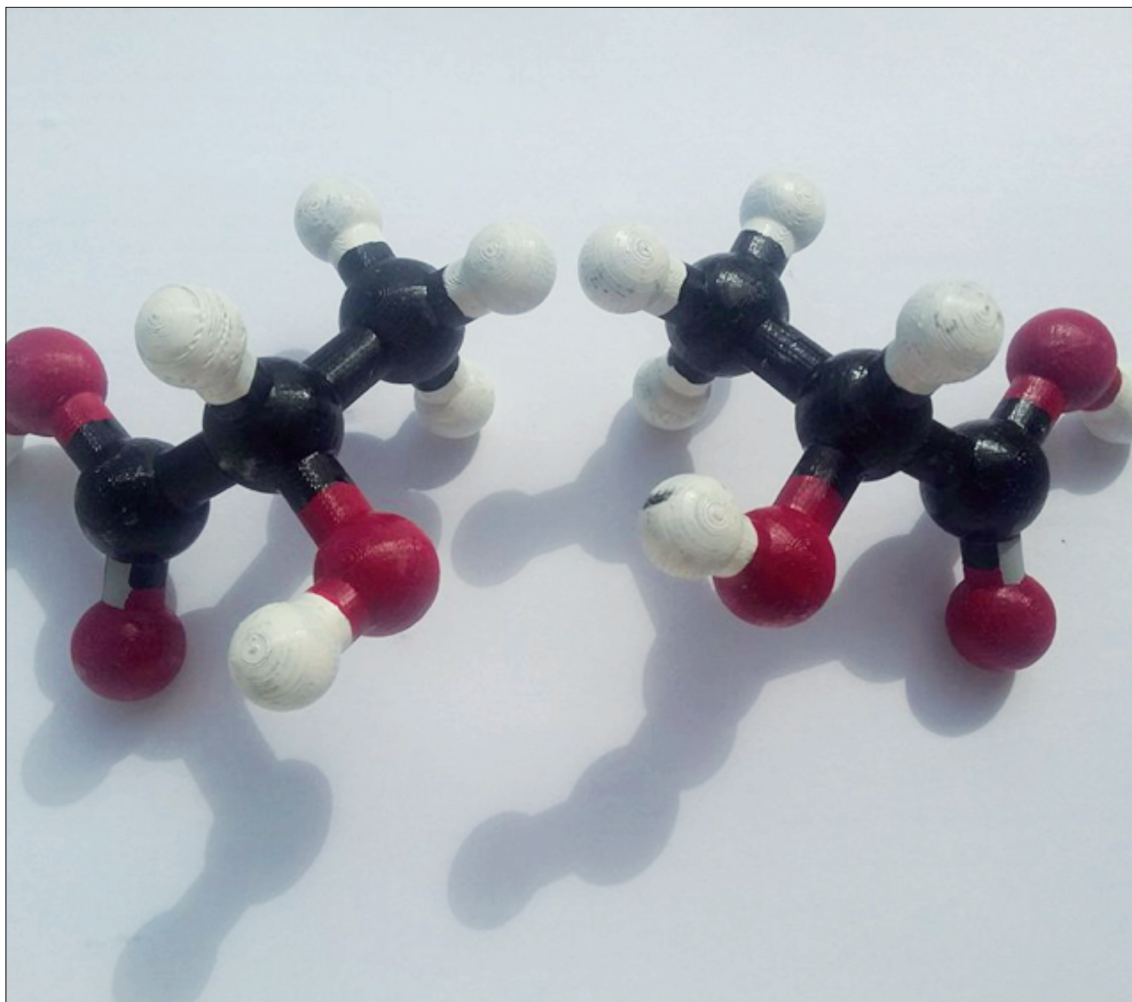
Obr. 1a Ukázka 3D tištěného modelu atomu, který byl použit při výuce tématu elektronegativita.
Zdroj: autoři.



Obr. 1d Ukázka 3D tištěného modelu atomu, který byl použit při výuce tématu poloměr atomů.
Zdroj: autoři.



Obr. 1b Tištěné 3D model y periodických tabulek, které vyjadřují výškou sloupce elektronegativitu chemických prvků. Zdroj: autoři.



Obr. 1c 3D tištěné modely enantiomerů kyseliny mléčné, které byly využity při výuce tématu chiralita. Zdroj: autoři.

Pedagogický experiment a pracovní hypotéza

Z pohledu didaktiky je cílem této studie ověřit kvalitativní hypotézu, zda 3D tištěné modely zlepšují efektivnost a kvalitu výuky chemie v rámci vy-

braných témat. Výzkum zkoumající tuto hypotézu byl realizován na záměrně vybraných základních školách a gymnáziích v České republice. Studovaná hypotéza byla ověřována pomocí singulárního pedagogického experimentu, který zahrnoval ověření vstupní vědomostní úrovně studentů pre-tes-

tem, vlastní pedagogický experiment a hodnocení výstupní vědomostní úrovně post-testem. Ukázky pre/post-testů, které byly použity v této studii, jsou uvedeny v příloze. Celkový obraz odezvy pedagogického experimentu, který byl tedy proveden technikou tzv. jedné skupiny, ve vědomí a nevědomí studentů byl hodnocen také dotazníkem. Postoj učitelů k aplikaci 3D tištěných modelů ve výuce chemie na zvolených školách byl zkoumán pomocí polostrukturovaného rozhovoru.

Výsledky

Do didaktické studie výuky chemie s využitím 3D tištěných modelů bylo zapojeno celkem 158 studentů různých základních škol či gymnázií, z nichž 102 studentů absolvovalo vyučování některého ze 4 navržených témat, vyplňovalo pre a post-testy a následně dotazníky. 56 studentů pouze vyplňovalo dotazníky (více v kapitole Materiály a metody). Celkové shrnutí informací získaných od studentů dotazníkem a stručný popis dotazované množiny respondentů je uveden v tabulce 1.

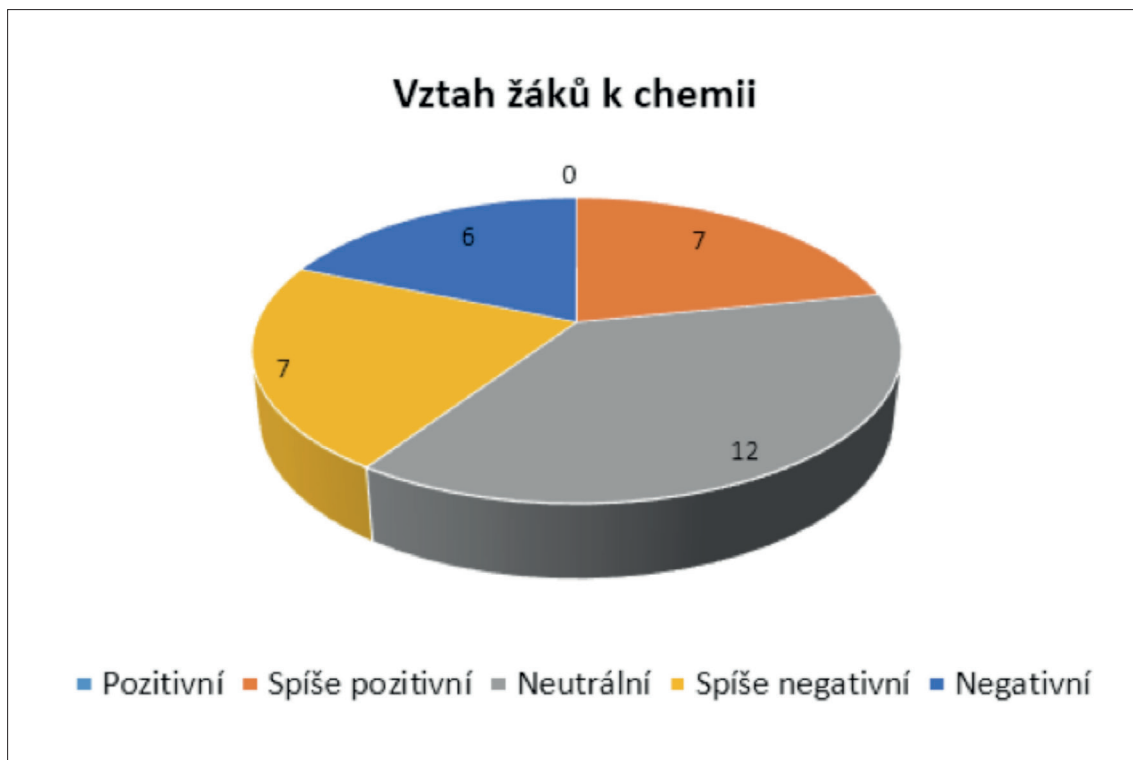
Tab. 1 Celkové informace zjištěné od studentů pomocí dotazníků.

CELKOVÝ POČET DOTAZOVANÝCH	158
Počet chlapců a dívek	77/81
Vztah žáků k předmětu chemie	Kladný: 26 Spíše kladný: 63 Neutrální: 30 Spíše negativní: 24 Negativní: 15
Předchozí zkušenost žáků s modely	Ano: 110 Ne: 48
Hodnocení hodin s využitím 3D modelů	***** 120 **** 24 *** 8 ** 4 * 1
Návrh modely používat častěji	Ano: 158 Ne: 0

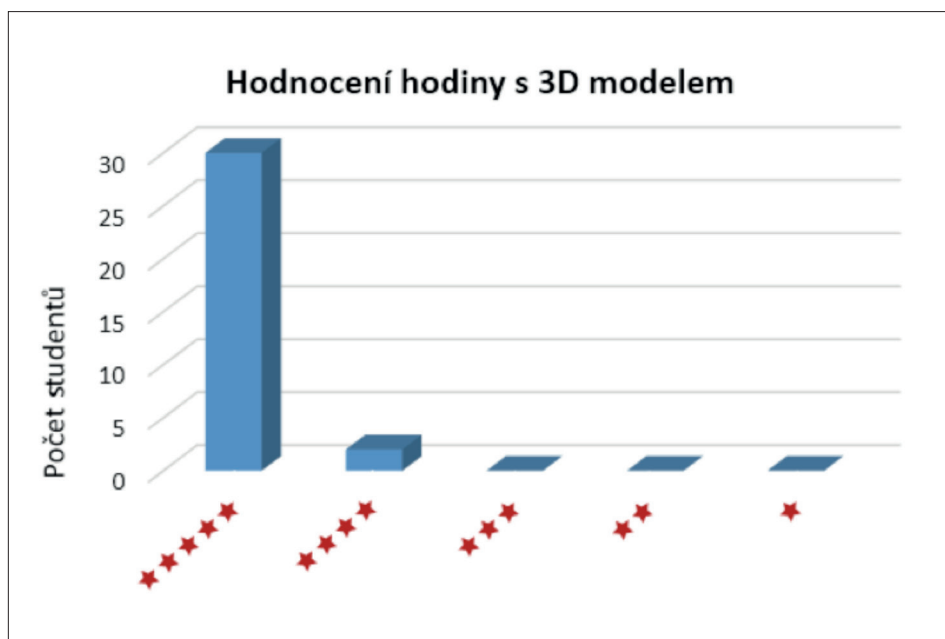
V rámci výuky všech 4 vybraných témat byl pomocí dotazníků hodnocen postoj k chemii a postoj k aplikaci 3D tištěného modelu v dané vyučovací jednotce. Každý pedagogický experiment byl rovněž monitorován pomocí pre a post-testu, který zahrnoval 3–5 stejných otázek (více v kapitole Pedagogický experiment a pracovní hypotéza). Stručný popis zahrnující počet zúčastněných žáků při výuce jednotlivých témat, ročník a typ školy a zvolenou di-

daktickou metodu je uveden v tabulce 2. Vztah žáků k chemii, hodnocení hodiny s 3D modely žáky a výsledky dosažené v pre/post-testech jsou znázorněny na obr. 2, 3, 4 a 5. Data zjištěná pomocí dotazníku byla transformována na celočíselné hodnoty v rozsahu 1–5, a následně byly pro ně vypočítány v programu Microsoft Excel 2013 aritmetické průměry. Stručný komentář ke zjištěným výsledkům je uveden v kapitole Diskuze.

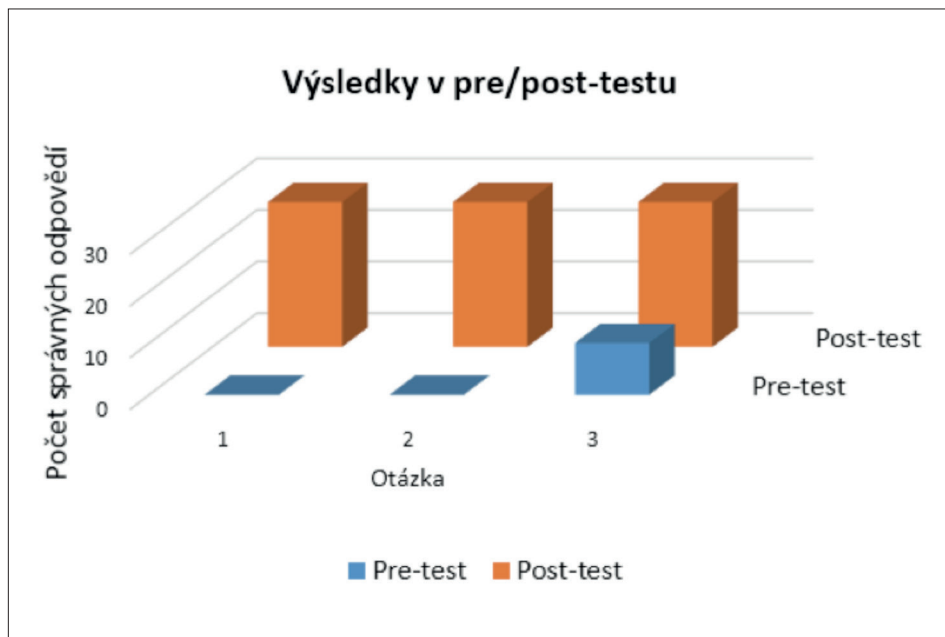
Obr. 2 Žákovské hodnocení hodiny na téma poloměr atomů. Zdroj: autoři.



Obr. 2a Výsledky hodnocení vztahu k chemii žáky, kteří se účastnili výuky tématu poloměr atomů.

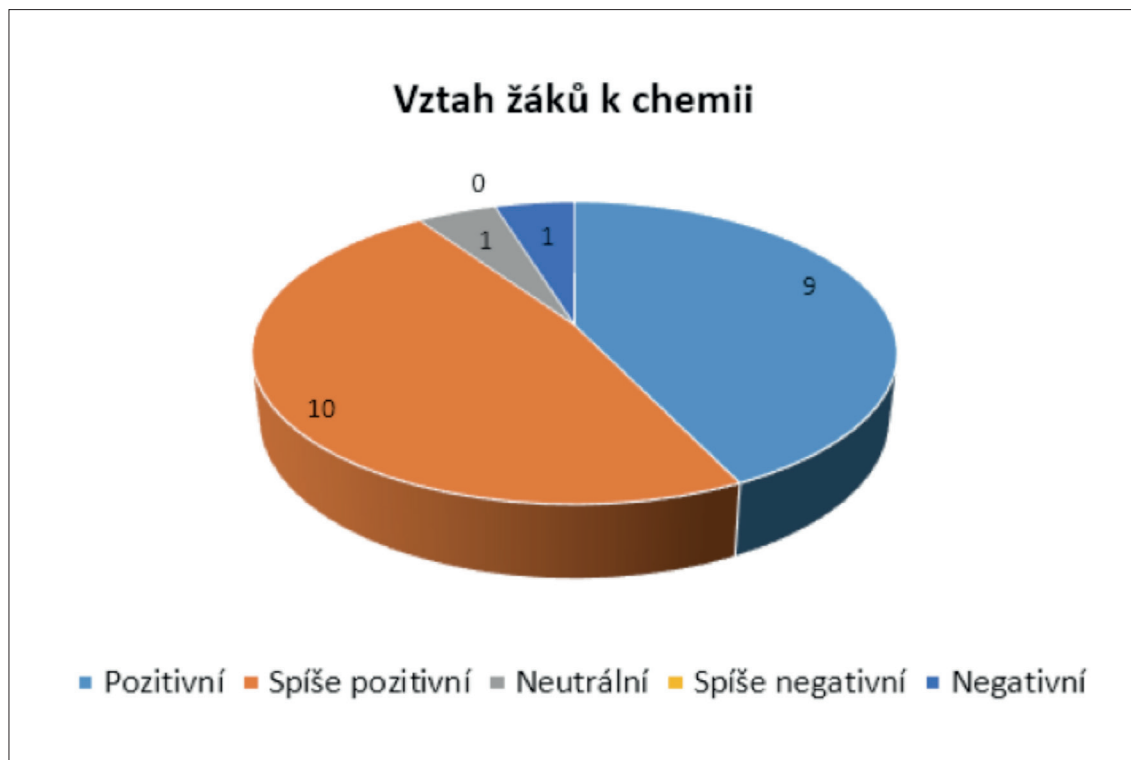


Obr. 2b Hodnocení hodiny s 3D modelem žáky, kteří se účastnili výuky tématu poloměr atomů.

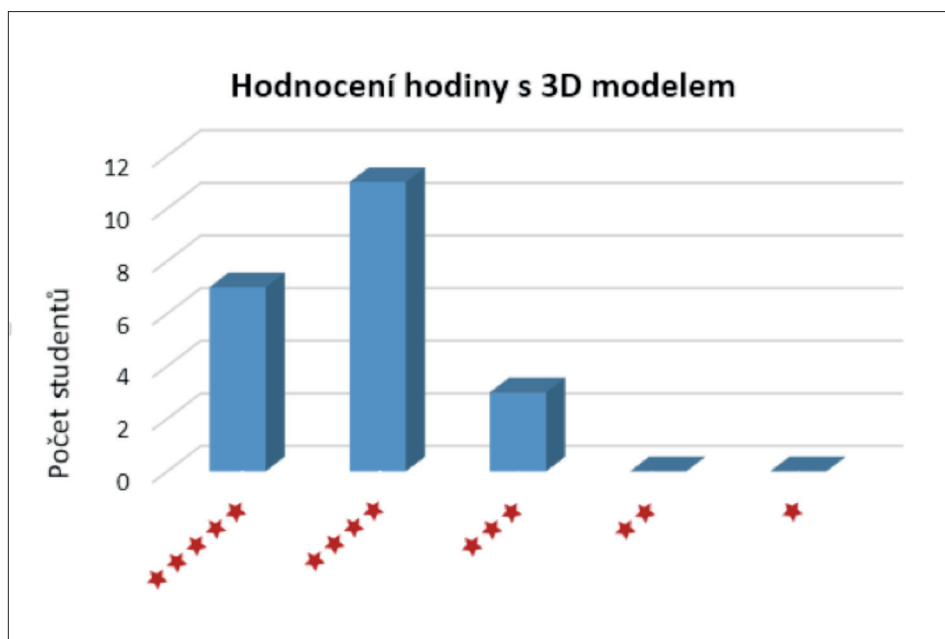


Obr. 2c Výsledky pre a post-testů u žáků, kteří se účastnili výuky tématu poloměr atomů.

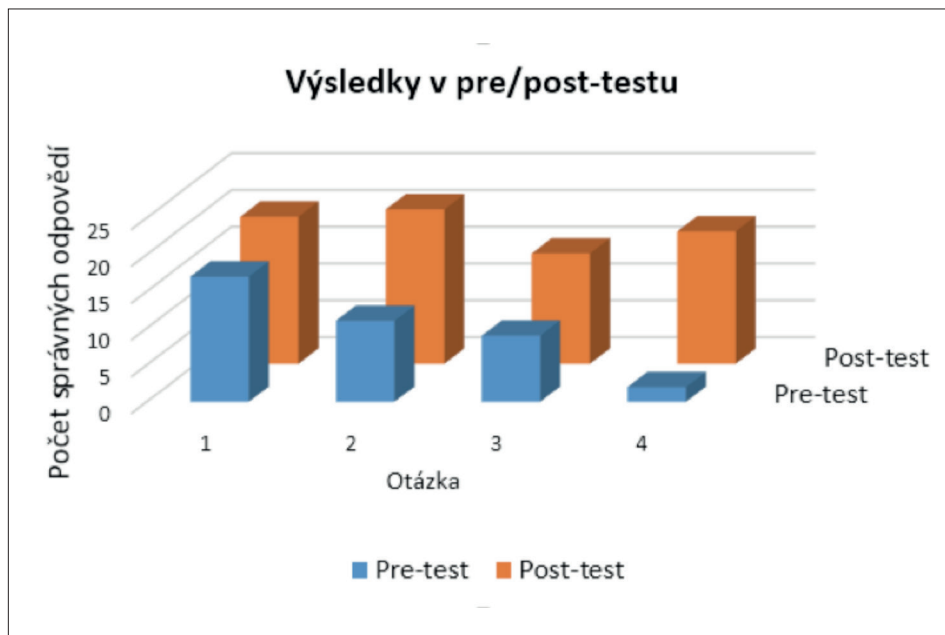
Obr. 3 Žákovské hodnocení hodiny na téma elektronegativita. Zdroj: autoři.



Obr. 3a Výsledky hodnocení vztahu k chemii žáky, kteří se účastnili výuky tématu elektronegativita.

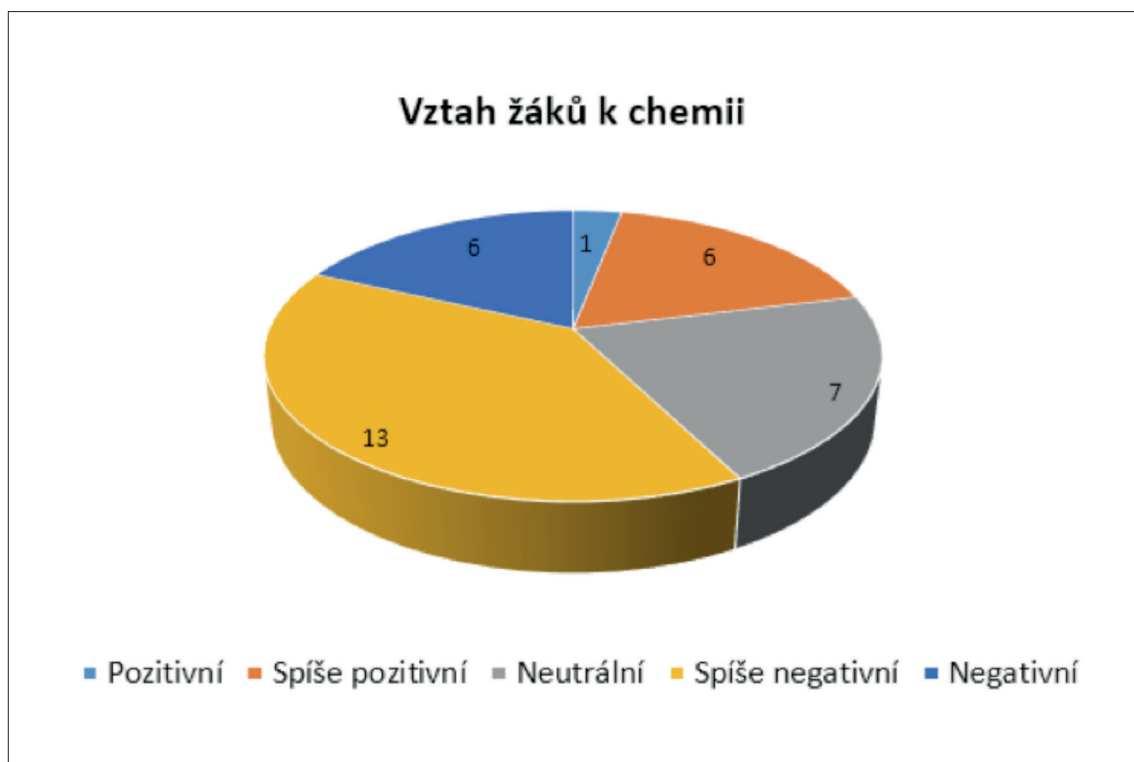


Obr. 3b Hodnocení hodiny s 3D modelem žáky, kteří se účastnili výuky tématu elektronegativita.

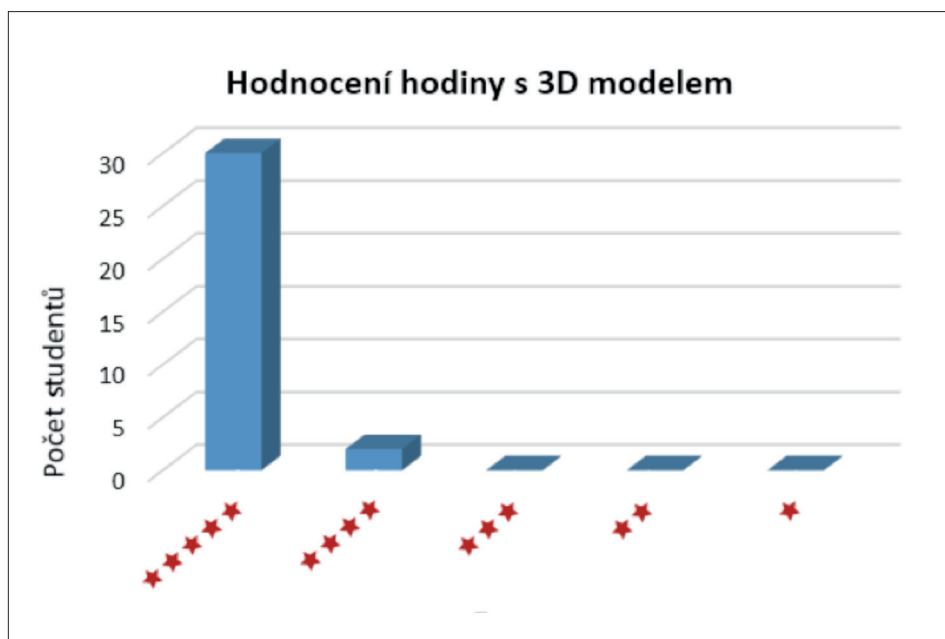


Obr. 3c Výsledky pre a post-testů u žáků, kteří se účastnili výuky tématu elektronegativita.

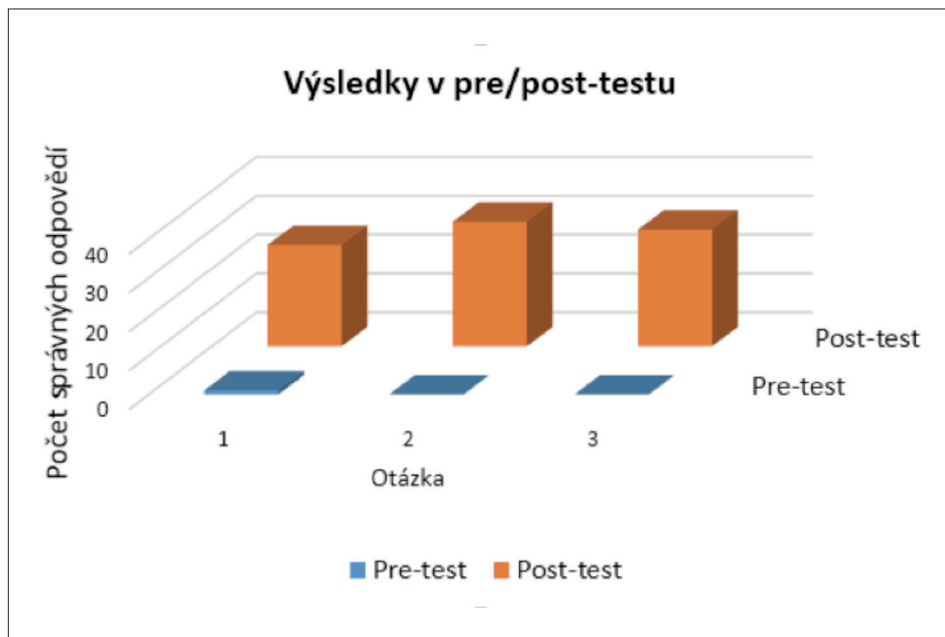
Obr. 4 Žákovské hodnocení hodiny na téma hmotnost atomů. Zdroj: autoři.



Obr. 4a Výsledky hodnocení vztahu k chemii žáky, kteří se účastnili výuky tématu hmotnost atomů.

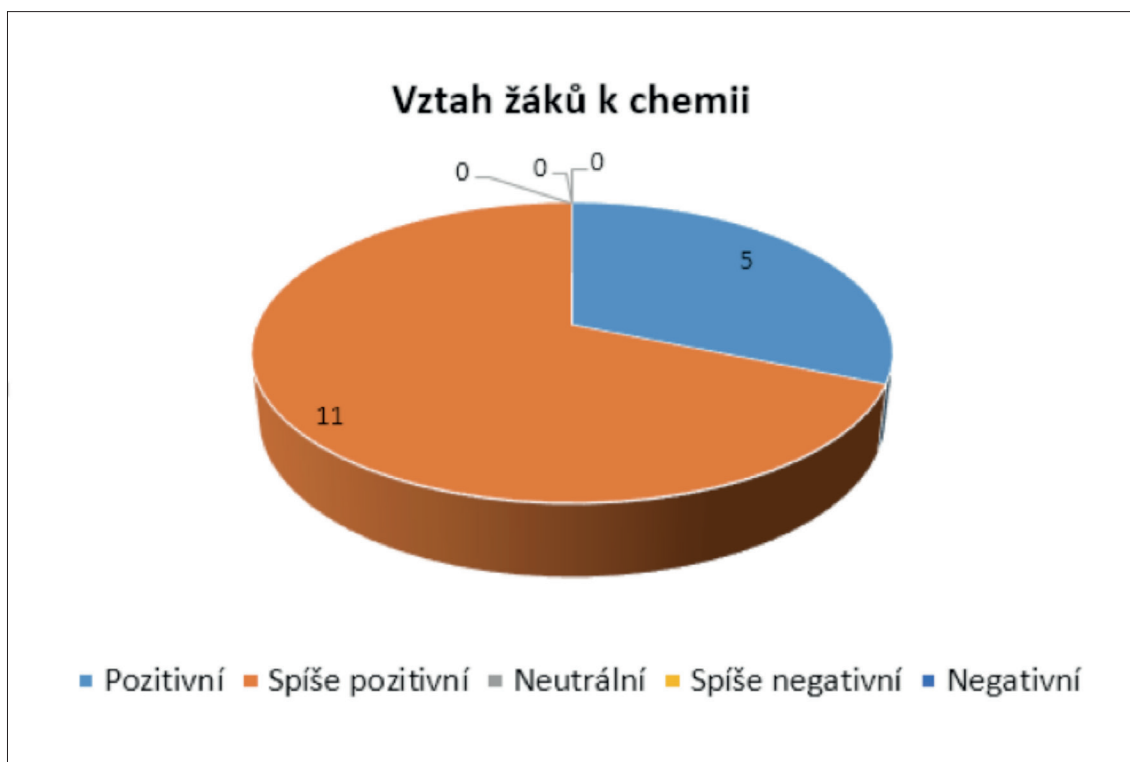


Obr. 4b Hodnocení hodiny s 3D modelem žáky, kteří se účastnili výuky tématu hmotnost atomů.

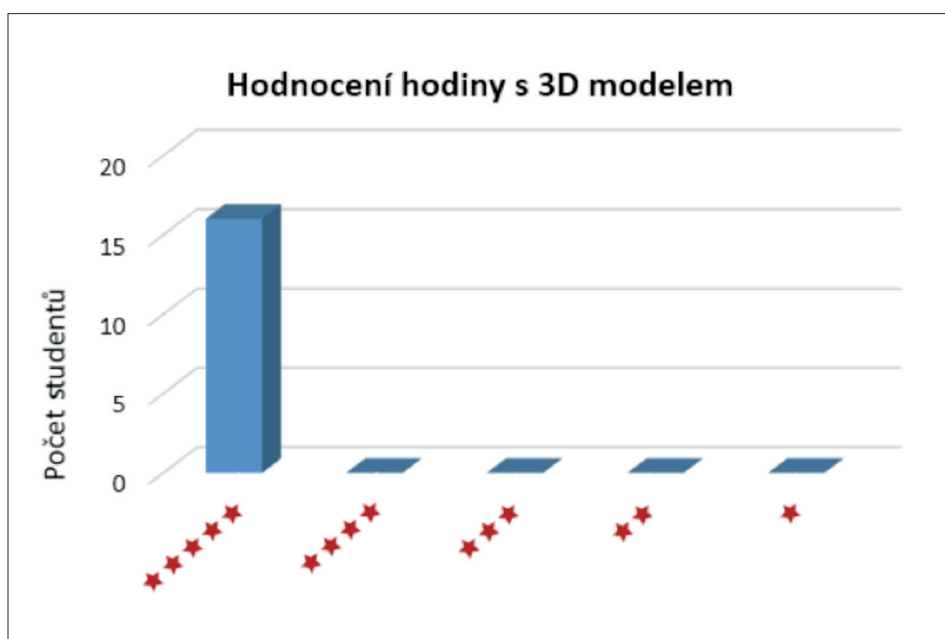


Obr. 4c Výsledky pre a post-testů u žáků, kteří se účastnili výuky tématu hmotnost atomů.

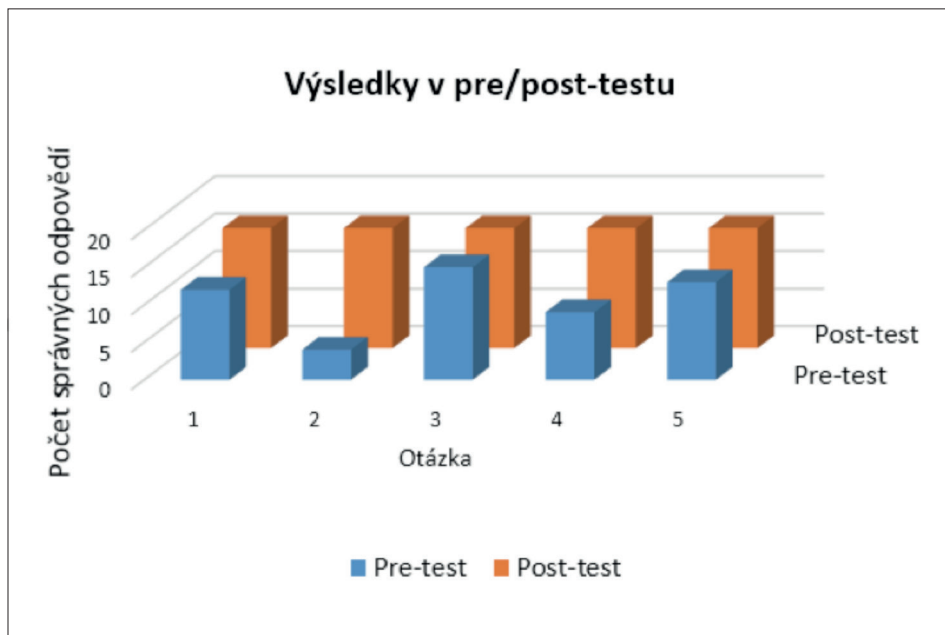
Obr. 5 Žákovské hodnocení hodiny na téma chiralita. Zdroj: autoři.



Obr. 5a Výsledky hodnocení vztahu k chemii žáky, kteří se účastnili výuky tématu chiralita.



Obr. 5b Hodnocení hodiny s 3D modelem žáky, kteří se účastnili výuky tématu chiralita.



Obr. 5c Výsledky pre a post-testů u žáků, kteří se účastnili výuky tématu chiralita.

Tab.2 Popis vyučovacích jednotek s využitím 3D tištěných modelů ve vybraných tématech.

TÉMA HODINY	Poloměr atomů	Elektronegativita	Hmotnost atomů	Chiralita
POČET ŽÁKŮ	32	21	33	16
ŠKOLA	4. ročník osmiletého gymnázia	8. ročník základní školy	2. ročník čtyřletého gymnázia	4. ročník osmiletého gymnázia
METODA VÝUKY	Skupinová práce	Diskuze s pracovními listy	Heuristická metoda	Diskuze

Diskuze

Návrh, tisk a použití 3D modelů ve výuce vyžaduje kvalifikovaného učitele, který je schopen si modely pro 3D tiskárnu vytvořit, popř. stáhnout z internetu, upravit či opravit jejich datový formát, v 3D tiskárně je vymodelovat a provést jejich finální povrchovou úpravu. Pomineme-li tyto technické obtíže, můžeme se zaměřit na problematiku využití 3D tištěných modelů ve výuce chemie jako takovou a zkoumat jen didaktický efekt, který tyto modely mohou vyvolat. Pro tuto studii byly zvoleny jednoduché modely atomů ve tvaru kruhu, které svým rozměrem reprezentovaly žákům atomový poloměr, elektronegativitu a atomovou hmotnost, a kuličkové modely *R* a *S* izomerů kyseliny mléčné, vyjadřující prostorové uspořádání atomů v molekulách enantiomerů a jejich vzájemný vztah. Trend elektronegativit atomů v periodické soustavě chemických prvků byl navíc žákům zprostředkován pomocí 3D tištěného modelu periodické tabulky, kde byla elektronegativita prvku vyjádřena výškou sloupce. Cílem práce studentů s těmito modely bylo pochopit důsledky periodického zákona, které lze pozorovat jako periodické změny sledovaných vlastností prvků v závislosti

na jejich protonovém čísle, a povahu rozdílu mezi strukturami dvou enantiomerů. Práce s 3D modely, které si studenti mohou vzít do rukou, srovnat je a prohlížet si je, představuje důležitou didaktickou metodu vedoucí k tomuto cíli, protože podporuje hlubší vnímání a promyšlení skutečnosti, s níž se studenti ve vzdělávání setkávají.

Ačkoli není cílem této práce kvantitativně prokázat, zda 3D tištěné modely podporují učení více či méně než např. frontální výklad s využitím tabule či dataprojektoru, pokusili jsme se přesto jejich vliv na učení kriticky zhodnotit. Téma poloměr atomů bylo předloženo 32 žákům, kteří pracovali ve čtyřčlenných skupinách (tabulka 2). V pre-testech bylo nalezeno celkem 10 správných odpovědí, přičemž v post-testu bylo nalezeno celkem 84 správných odpovědí. Podobné poměry byly zjištěny v případě skóre v pre/post-testech v rámci výuky elektronegativity (39/74; 21 studentů), atomové hmotnosti (1/88; 33 studentů) a chiralita (53/80; 16 studentů). Výuka tématu elektronegativita a chiralita byla založena na diskuzi, která, stejně jako forma skupinové práce při výuce tématu poloměr atomů, podporovala intenzivně aktivitu studentů. Téma hmotnost atomů bylo vyučováno heuristickou metodou, která

vyžadovala od studentů zapojení vyšších myšlenkových operací (např. dedukce a indukce), a aktivovala studenty tedy ještě výrazněji.

Zaměříme-li se na výsledky šetření pomocí dotazníků, zjišťujeme ve všech čtyřech skupinách žáků hodnoty, které do určité míry korespondují s výsledky pre/post-testů. Jak je naznačeno na obr. 2, ve třídě, která absolvovala výuku téma poloměr atomů, nevedl pozitivní vztah k chemii žádný žák, negativní vztah naopak uvedlo 6 žáků. Průměrný vztah k chemii byl v této skupině stanoven výpočtem jakožto neutrální. Průměrné hodnocení této hodiny s 3D modely žáky činilo 4,9 hvězdiček, a vyučování bylo tedy žáky hodnoceno velmi pozitivně. V dotazníku pro žáky, kteří se účastnili výuky na téma elektronegativita, vyjádřilo pozitivní vztah k chemii 9 žáků, negativní vztah uvedl pouze 1 žák (obr. 3). Průměrné hodnocení vztahu k chemii bylo stanoveno v této skupině jako spíše pozitivní. Analýza hodnocení hodiny s 3D modely na téma elektronegativita poskytla aritmetický průměr 4,2 hvězdiček. Spíše negativní vztah k chemii byl stanoven ve skupině žáků, která absolvovala výuku tématu atomová hmotnost (obr. 4). V této skupině však přesto žáci uváděli velmi kladné hodnocení hodiny s 3D modely a průměrný počet hvězdiček zde dosáhl hodnoty 4,9. Pokud jde o analýzu dat stanovených dotazníkem ve skupině, která absolvovala výuku tématu chiralita, průměrný vztah k chemii zde vychází jako spíše pozitivní a průměrný počet hvězdiček v hodnocení hodiny s 3D modely dosahuje hodnoty 5, tedy optima (obr. 5).

Výše uvedená jednoduchá hodnocení a popisné statistiky naznačují, že použité 3D modely mají pravděpodobně příznivý vliv na zvýšení skóre v post-testu. Zdá se rovněž patrné, že čím pozitivněji hodnotí žáci svůj vztah k chemii, tím vyššího skóre dosahují v pre-testech. Je však třeba

vzít v úvahu, že v rámci této studie nebylo možné provést randomizovaný pedagogický experiment se srovnávací a pokusnou skupinou žáků, a proto jsou výsledky spíše předběžnou informací, s jakým efektem bychom se v pokročilé didaktické studii 3D tištěných modelů mohli setkat. Skutečnost, že hodiny s 3D modely dosáhly v dotazníkovém šetření v průměru 4,6 hvězdiček z 5 možných, je však důležitým ukazatelem, že 3D tištěné modely byly pro žáky velice zajímavé (tabulka 1). To je v souladu i s dalším zjištěním, že všichni dotazovaní žáci souhlasili s návrhem, aby se modely využívaly ve výuce častěji. Na druhou stranu bylo pomocí dotazníků též zjištěno, že vztah všech studentů k chemii, kteří byli zahrnuti do této studie, je v průměru spíše neutrální či jen mírně kladný, třebaže se zhruba 70 % dotazovaných studentů s materiálními modely v chemii setkalo již dříve (tabulka 1).

Návrh 3D tištěných modelů pro podporu výuky zvolených čtyř témat v této práci byl motivován úmyslem vyvinout jednoduché didaktické pomůcky, jejichž příprava bude finančně, časově i technicky poměrně nenáročná, a díky tomu dostupná i pro učitele se základními dovednostmi práce s 3D tiskárnou. Složitější 3D modely, které by kupříkladu reprezentovaly zároveň poloměr atomu rozměrem, počet valenčních elektronů tvarovanými výstupky, počet elektronů chybějících do elektronové konfigurace nejbližšího vzácného plynu tvarovanými prohloubeními a elektronegativitu barvou 3D modelu, představují další formy didaktických pomůcek, jejichž aplikace by mohla výuku chemie obohatit např. o možnost studentům názorně přiblížit představu chemické reaktivity atomů. V našem budoucím pedagogickém výzkumu se proto pokusíme zhodnotit efekt složitějších 3D modelů a provést pedagogický experiment technikou dvou skupin.

Závěry

Reálná situace ve výuce chemie je taková, že studenti i učitelé mají pro výuku k dispozici např. komerční stavebnice molekul, s kterými mohou pracovat. Je nutné připustit, že tyto stavebnice mají přednost v tom, že nabízejí možnost si modely chemických látek připravit mnohem snadněji, než je vytisknout na 3D tiskárně. Tento klad stavebnic chemických modelů velice vyhovuje učitelům, kteří 3D tiskárnu nemají k dispozici a neumí s ní pracovat. Z rozhovorů s učiteli vyplývá, že 3D modely by používali kdykoli je to možné a vhodné, ale 3D tisk je pro ně prozatím spojen s praktickými překážkami. Přesto si ale učitelé uvědomovali, že 3D tiskárna umožňuje vytvořit prakticky jakýkoli model, a ten ve výuce použít. Z této skutečnosti tedy vyplývá dvojitý závěr:

1. 3D modely jsou pro výuku chemie prospěšné, ať už se jedná o modely tištěné na 3D tiskárně či připravené z částí, které jsou v chemických stavebnicích,
2. 3D tiskárny přinášejí tu výhodu, že s nimi lze vytvořit prakticky jakékoli modely.

Poděkování Autoři této práce jsou vděční Specifickému projektu PřF UHK 2108/2018 za finanční podporu.

Literatura

- ESSELMAN, B. J., & HILL, N. J. (2016). Integration of Computational Chemistry into the Undergraduate Organic Chemistry Laboratory Curriculum. *Journal of Chemical Education*, 93(5), 932-936. doi:10.1021/acs.jchemed.5b00815
- GILBERT, J. K. (2004). Models and modelling: Routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130.
- JANČAŘÍKOVÁ, K. (2017). Modely v didaktice biologie. *Biologie-Chemie-Zeměpis* 26(1), 2-22. doi:10.14712/25337556.2017.1.1
- NOVAK, E., & WISDOM, S. (2018). Effects of 3D Printing Project-based Learning on Preservice Elementary Teachers' Science Attitudes, Science Content Knowledge, and Anxiety about Teaching Science. *Journal of Science Education and Technology*, 27(5), 412-432.
- ROBERTSON, M. J., & JORGENSEN, W. L. (2015). Illustrating concepts in physical organic chemistry with 3D printed orbitals. *Journal of Chemical Education*, 92(12), 2113-2116.
- RODENBOUGH, P. P., VANTI, W. B., & CHAN, S.-W. (2015). 3D-printing crystallographic unit cells for learning materials science and engineering. *Journal of Chemical Education*, 92(11), 1960-1962.
- YOUNG, J. C., QUAYLE, M. R., ADAMS, J. W., BERTAM, J. F., & MCMENAMIN, P. G. (2018). Three-Dimensional Printing of Archived Human Fetal Material for Teaching Purposes. *Anatomical Science Education* 0(0), 1-7. doi: 10.1002/ase.1805

Čtyři pre/post testy, které byly použity k hodnocení pedagogického experimentu s 3D tištěnými modely ve výuce chemie jsou dostupné jako elektronická příloha na webu časopisu.