

Produkce plnobarevných modelů reliéfních map pomocí technologie 3D tisku

Mgr. Tomáš Burian,
katedra geoinformatiky,
Univerzita Palackého v Olomouci

Abstrakt

Představení jedné z metod plnobarevného 3D tisku jakožto možného (inovativního) technologického nástroje pro produkci a prezentaci reliéfních map. Aplikace moderní technologie 3D tisku pro co nejefektivnější reprezentaci trojrozměrných dat formou praktické studie zaměřené na produkci reliéfních map z prostředí počítače do reálného světa. Práce je rozdělena do několika kroků. Nejdříve se generuje digitální model reliéfu pro vytvoření 3D reprezentace reliéfu Země za pomoci digitálních výškových dat (digital elevation model – DEM). V dalším kroku se případový 3D model dokončuje formou úpravy a pokrytí povrchu objektu prostřednictvím leteckého snímku. Výsledkem těchto dvou kroků je 3D model reliéfní mapy, který dále vstupuje do procesu 3D tisku. Následně se testovaly možnosti 3D tiskárny Mcor IRIS HD, s ohledem na možné inovativní produkce a vizualizace kartografických 3D map. V závěru jsou diskutovány možné přínosy přístupu a další možné varianty kartografické 3D vizualizace s návazností na 3D tisk.

Production of Full-colour Relief Maps using 3D Printing Technology

Abstract

Presentation of one of the full-colour 3D printing methods as a possible (innovative) technological tool for the production and presentation of relief maps. Application of a modern 3D printing technology for the most effective representation of three-dimensional data in the form of a practical study focused on the production of relief maps from the computer environment to the real world. The work is divided into several smaller steps. Firstly, the digital relief model is generated, to create a 3D representation of the Earth's relief, using the digital elevation model (DEM). Secondly, the case 3D model is completed by modifying and covering the surface of the object by aerial photography. These two steps result in creation of a 3D model of the relief map which later enters into the 3D printing process. Subsequently the possibilities of the Mcor IRIS HD 3D printer were tested with regard to possible innovative production and visualization of cartographic 3D maps. In the conclusion, possible benefits of this approach and other possible options of 3D cartographic visualization with connection to 3D printing are discussed.

Keywords: 3D technology, cartography, 3D model, GIS

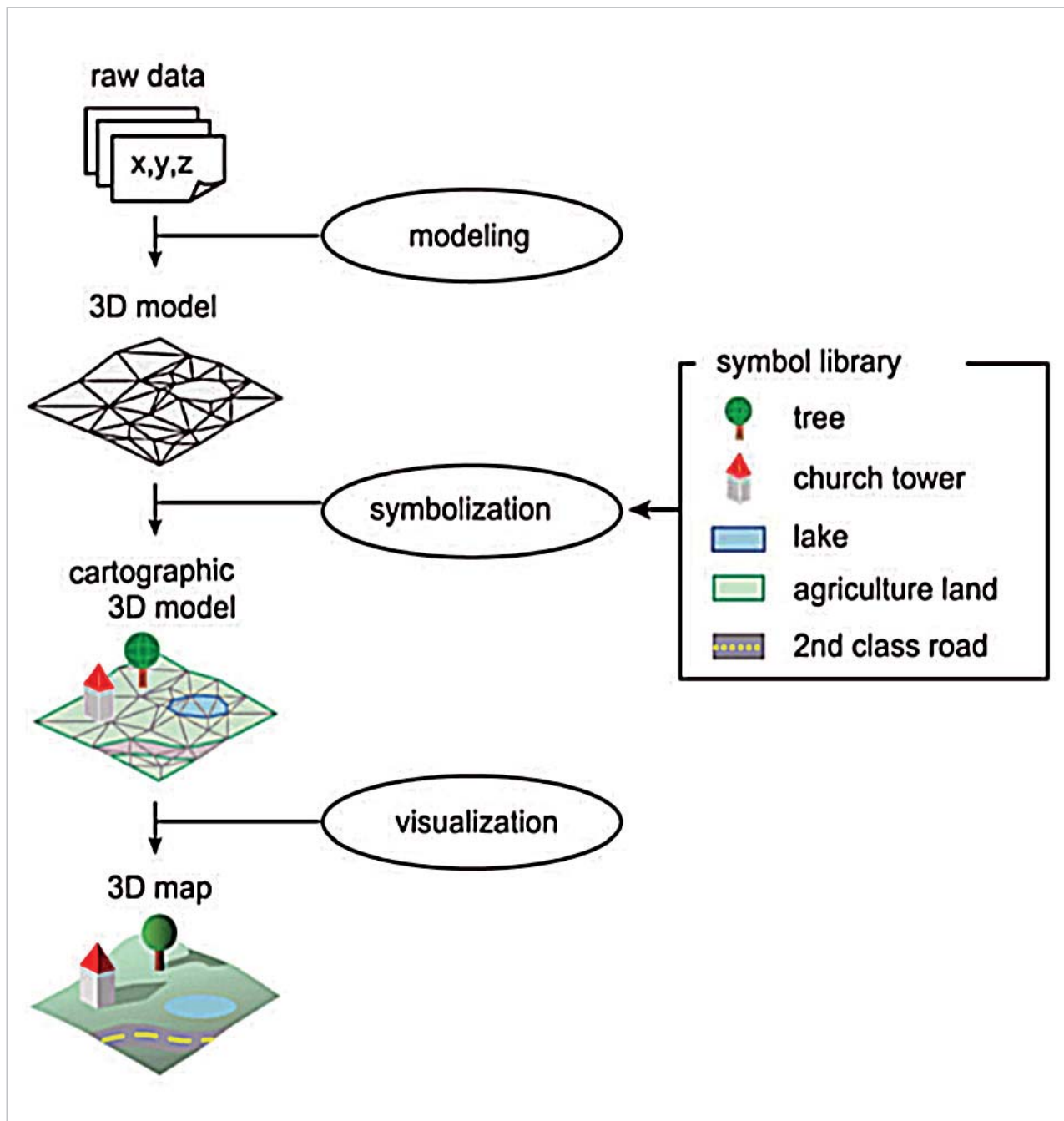
1. Úvod

Nedávny technologický vývoj a lidská vnímavost jsou hlavními podpůrnými aspekty tvorby a využívání moderních map. Současná doba pochopitelně vyžaduje moderní a inovativní řešení. Dokonce i běžně používaná zařízení jsou proto dnes schopna vytvářet a promítat různé scénáře. Kromě toho se v posledních desetiletích změnil také svět 3D prostředí. Mnoho řešení VR (virtuální realita) a on-line aplikace poskytují téměř reálné jevy přímo uživateli a vynález 3D tiskových strojů učinil toto pole ještě zajímavějším než kdy jindy. Lidé jsou schopni vymodelovat a vytisknout téměř cokoli během několika hodin a je jen otázkou času, kdy se první 3D tištěná mapa objeví v rutinním světě. To vše by mohlo vést k možnému vývoji metod 3D geovizualizace.

Jistě existují teorie o 3D mapě založené na kartografickém modelu vizualizovaném v počítačovém prostředí. V oblasti 3D geovizualizace jsou pak dále děleny do dvou hlavních skupin, a to na tzv. pravou a pseudo 3D, která bývá také označována zavedeným termínem 2,5 D. Pseudo 3D geovizualizace pouze simuluje pohled na třetí dimenzi v určitém prostředí (většinou počítačovém) takovým způsobem, aby vypadal jako skutečné 3D [1]. Takto popsaná prezentace dat je již dobře zavedena a vědecky potvrzena mnoha autory. Bylo například definováno geoprostorové virtuální prostředí (GeoVEs) pro 3D počítačové simulace či imitace prostředí reálného světa, které může být navigováno a ovlivňováno uživateli [2]. Nespočet interaktivních aplikací lze nalézt také v zábavním a herním průmyslu [3]. Oblasti kartografie byl pojem 3D mapa zaznamenán v ro-

ce 2001 [4]. Na základě těchto teorií by měl být proces vzniku 3D mapy rozdělen do několika částí, a to modelování, symbolizace a vizualizace (viz obr. 1) [5]. První část je reprezentována údaji o původních výškových záznamech dat a 3D modelování vybraného území. Ve druhém kroku je vytvořena vrstva kartografických symbolů a reprezentace, ve které je umístěna nad vygenerovaný 3D model. Poslední a obecně nejdůležitější částí je poté vizualizace vytvořených 3D dat, neboli vznik 3D mapy. V rámci předložené studie bude však uvedena druhá fáze zjednodušená a nahrazena pomocí leteckého snímku, který dostatečně reflektuje proces vzniku exemplární reliéfní mapy pro vstup do procesu 3D tisku a dalšího zpracování.

Právě využití 3D metod ve vizualizaci může být velmi užitečné. Třetí dimenze posiluje samotnou reprezentaci dat a vyžaduje méně kognitivních požadavků na čtení informací od uživatelů ve srovnání s informacemi ve druhé dimenzi [6]. Navíc je možné prezentovat a popsat více informací (dat), protože přidání rozměr vytváří dodatečný prostor pro vyjádření dalších datových proměnných. Schopnosti uživatelů pro čtení 3D map byla dále hodnocena například pomocí srovnávacích studií s technologií pro sledování pohybu očí, tzv. Eye-tracking [7]. Podle zmíněného výzkumu je mnohem efektivnější používat metody s vyšším vizualizačním potenciálem navzdory zvyšujícím se nákladům a z tohoto hlediska jsou nejlepší metodou 3D mapy. Mnozí další vědci prokázali vliv 3D vizualizace, jakožto nástroje který umožňuje uživatelům lépe porozumět aspektům topografie ve srovnání s 2D mapami [8], [9], [10], [11]. Moderní technologická řešení dnes navíc



Obr. 1 Schéma vzniku 3D mapy [5]

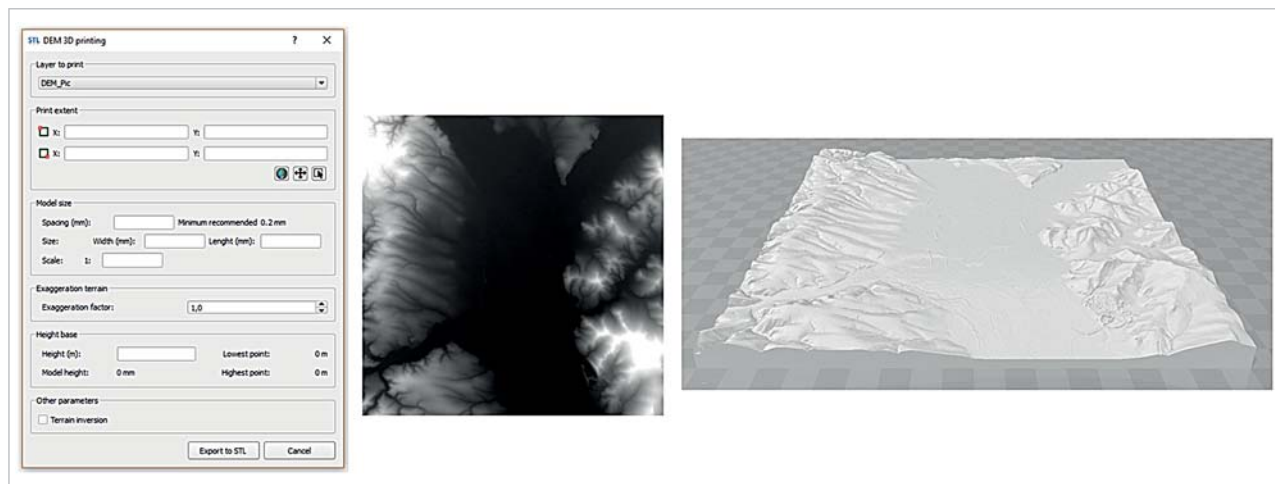
poskytují řešení, jak prostřednictvím 3D tiskáren přenést 3D mapy z prostředí počítačů do reality. Obrovský přínos v této oblasti pak vykazují zejména takové 3D tiskárny, které jsou schopné produkovat plnobarevné modely.

2. Metodika

2.1 Digitální model terénu (DMT)

Data pro vstup do 3D modelování reliéfu jsou v tomto případě reprezentována rastrovým obrazem, který obsahuje

hodnoty x, y, z . Tyto záznamy popisují souřadnice pro jednotlivé výškové body terénu na obrazovce počítače, ze kterých je následně generován celistvý model vybraného území. To může být užitečné například při analytických procesech, kde je důležitá výška povrchu. Podrobnost dat DMT je pak jediným limitem pro takové analytické účely, přičemž základním měřítkem podrobnosti je prostorové rozlišení obrazu. Globálních datových souborů je možné dosáhnout většinou v rozlišení 30 metrů (na pixel), které umožní vhodné výsledky spíše pro modely malých měřítek. Modely s vysokým rozlišením (pod 15 metrů na pixel) jsou ve většině případů poskytovány pouze producenty v dané zájmové oblasti. Získání takových dat proto může být velmi nákladné a obtížné, ale také zároveň nezbytné



Obr. 2 Ukázka příkladné tvorby 3D modelu (vlevo – náhled prostředí DEMto3D, uprostřed – datový náhled na výřez DMT, vpravo – výsledný 3D model území)

pro hodnotné 3D modelování. Pro území České republiky (ČR) jsou relativně dobře dostupná data v podobě digitálního modelu reliéfu ČR (DMR 4G, DMR 5G), přičemž případový model vznikl na základě dat DMR 5G. V rámci celosvětových dat se poté nabízí několik různých zdrojů, ze kterých lze zdarma získat vstupní data:

- Space Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [12],
- ASTER Global Digital Elevation Model [13],
- JAXA's Global ALOS 3D World [14],
- Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) [15].

2.2 Tvorba 3D modelu

Generování 3D modelu území z vybraných dat DMT lze provést různými cestami. Jednu z nich pak může představovat volně dostupný software QGIS s rozšiřující knihovnou DEMto3D, která dává uživateli možnosti pro tvorbu modelů na základě dostupných výškových dat. Na výstupu je model připraven ve formátu .STL (stereolithography), jenž je přímo akceptován pro vstup do 3D tisku. V prostředí programu lze také zvolit parametry pro výslednou velikost, měřítko i podrobnost vzniklého 3D objektu (viz obr. 2) [16]. Výsledný model území není nutné dále přímo upravovat, důležité je však ověřit jeho topologickou správnost a zajistit tak celistvost povrchu před vstupem do 3D tiskárny. Pro tyto účely je možné využít dostupné programy pro práci s 3D objekty (3D Builder, MeshLab, aj.), které nabízí nástroje pro kontrolu a také případnou opravu geometrie.

2.3 Kartografická vrstva modelu

Na závěr, pro vznik kompletní 3D mapy, je samozřejmě nutné osadit povrch vzniklého modelu patřičnou tematickou vrstvou [4], [5]. V předkládané studii bude ovšem tento krok výrazně zjednodušen a uvedenou kartografickou vrstvou modelu bude představovat vybraný letecký (ortofoto) snímek dané oblasti. Zdrojem použitých leteckých dat je katedra geoinformatiky z Univerzity Palackého v Olomouci. Pro splnění výčtu kroků kompletní tvorby 3D mapy je však zároveň nezbytné uvést přípustné kartografické metody, jež mohou být v tomto smyslu aplikovány. Dále je proto uveden výčet kartografických metod, které

mohou být přímo aplikovány na povrch zájmového modelu. Tento seznam reflektuje průnik definovaných metod od předních autorů z oblasti tematické kartografie. Obdobnou analýzou kartografických metod se zabýval rovněž T. Králík ve své diplomové práci „Tematické mapy v autostereoskopickém provedení“, který definoval možnosti pro další kritéria výběru metod a jejich zobrazení v prostoru [17].

Srovnání metod bylo provedeno na základě jejich definic v publikacích vybraných autorů: M. Kraak a F. Ormeling [18], V. Voženílek a J. Kaňok [19], Slocum a kol. [20], Robinson a kol. [21]. Prvotní (referenční) množina metod byla vybrána na základě teorie prof. Voženíla a doc. Kaňoka a následně bylo stanoveno, zda další autoři tyto metody taktéž definují, v jaké míře či nikoliv. Jako srovnávací kritéria byla určena pravidla, která definovala zda:

- a) autor metodu přesně definuje,
- b) metoda je součástí ucelené skupiny,
- c) autor metodu neuvádí.

V případě, že některý z autorů uváděl i další, doposud nesledovanou metodu, byla tato metoda přidána rovněž do prvotní množiny. Poté bylo vyhodnoceno 15 metod tematické kartografie a ke každému autorovi bylo přiřazeno hodnocení popsané výše (viz tab. 1). Na základě dosaženého hodnocení pak byla sestavena souhrnná tabulka pro zachycení průniku definovaných metod od uvedených autorů (viz tab. 2). V prostředních sloupcích je uveden seznam jednotlivých metod včetně jejich autorů a v pravém sloupci jsou logické operátory, které indikují, zda je daná metoda vhodná pro kombinaci s 3D modelem či nikoli.

3. Případový model

Pro případový model byla vybrána horská oblast v Hrubém Jeseníku, kde se nachází přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. Na vstupu byla výšková data (pro generování 3D modelu povrchu) a letecký snímek oblasti (tematická vrstva modelu). Pro vytvoření 3D modelu byl využit program QGIS s připojeným pluginem DEMto3D, který exportuje data ve vhodném formátu pro vstup do 3D tiskárny. Texturování modelu, tedy přidání tematické vrstvy, proběhlo v programu ColourIT od společnosti Mcor Technologies.

Tab. 1 Seznam kartografických metod a jejich vyhodnocení (a – autor metodu přesně definuje, b – metoda je součástí ucelené skupiny, c – autor metodu neuvádí)

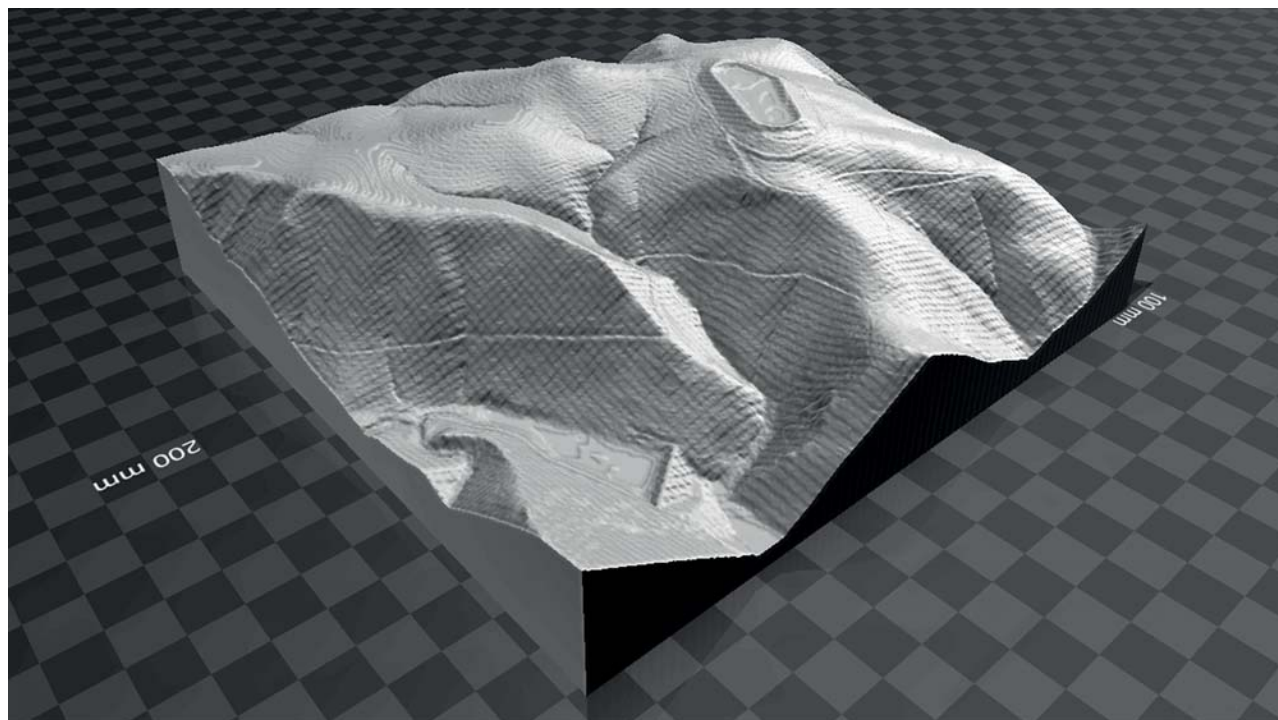
Vybrané kartografické metody	Voženílek, Kaňok	Kraak, Ormeling	Slocum a kol.	Robinson a kol.
Metoda bodových znaků	a	a	a	a
Metoda liniových znaků	a	b	b	a
Metoda plošných znaků	a	a	a	a
Metoda izolinií	a	a	a	a
Metoda teček	a	a	a	a
Metoda kartodiagramu	a	a	b	b
Dasymetrická metoda	a	b	a	a
Metoda kartotypogramu	a	c	c	c
Metoda kartogramu	a	a	b	a
Metoda kartografické anamorfózy	a	c	a	c
Metoda statistických povrchů	b	a	b	b
Multidimenzionální mapování	b	b	a	b
Metoda šraf	b	b	b	a
Metoda profilových linií	b	b	b	a
Metoda šikmých profilových linií	b	b	b	a

Tab. 2 Kartografické metody a jejich vhodnost pro kombinaci s 3D modelem (✓ – vhodné)

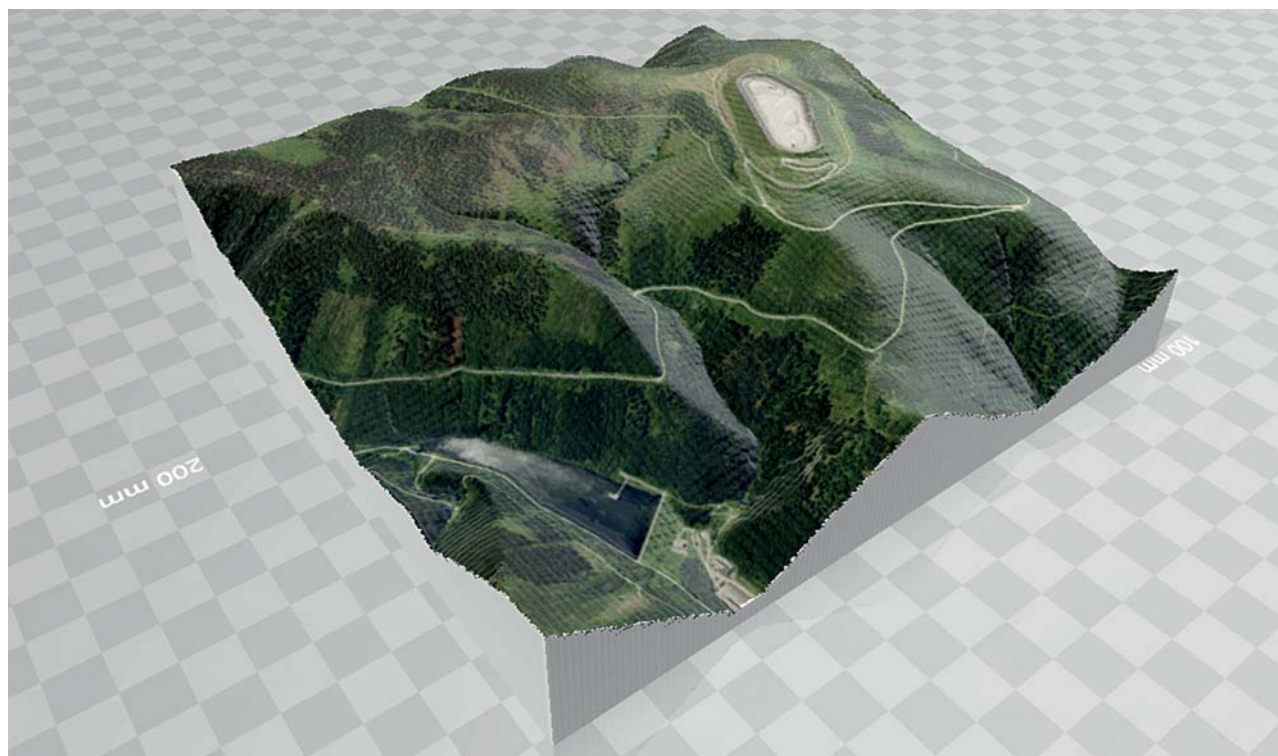
	Autoři	Kartografická metoda	Kombinace s 3D modelem
1	Voženílek, Kaňok	Metoda bodových znaků	✓
2	Voženílek, Kaňok	Metoda liniových znaků	✓
3	Voženílek, Kaňok	Metoda plošných znaků	✓
4	Voženílek, Kaňok	Metoda izolinií	✓
5	Voženílek, Kaňok	Metoda teček	✓
6	Voženílek, Kaňok	Metoda kartodiagramu	✓
7	Voženílek, Kaňok	Dasymetrická Metoda	✓
8	Voženílek, Kaňok	Metoda kartotypogramu	✓
9	Voženílek, Kaňok	Metoda kartogramu	✓
10	Voženílek, Kaňok	Kartografická anamorfóza	✓
11	Kraak, Ormeling	Metoda statistických povrchů	✓
12	Slocum a kol.	Multidimenzionální mapování	✓
13	Robinson a kol.	Metoda šraf	✓
14	Robinson a kol.	Metoda profilových linií	✗
15	Robinson a kol.	Metoda šikmých profilových linií	✗

Kompletní proces tvorby výsledného plnobarevného modelu reliéfu lze následně shrnout celkem do sedmi kroků:

1. DMT – zajištění vstupních výškových dat pro danou oblast zájmu.
2. Generování 3D modelu – tvorba 3D modelu povrchu reliéfu Země ze vstupních dat.
3. STL model – první výsledek ve třetí dimenzi, bez textury (**obr. 3**).
4. Textura – osazení modelu pomocí leteckého snímku.
5. 3D mapa – první náhled reliéfní mapy v digitální podobě, připravený 3D model s texturou (**obr. 4**).
6. 3D tisk – stavba plnobarevného modelu reliéfní mapy.
7. Fyzický model reliéfní mapy.



Obr. 3 Náhled prvního 3D modelu bez textury



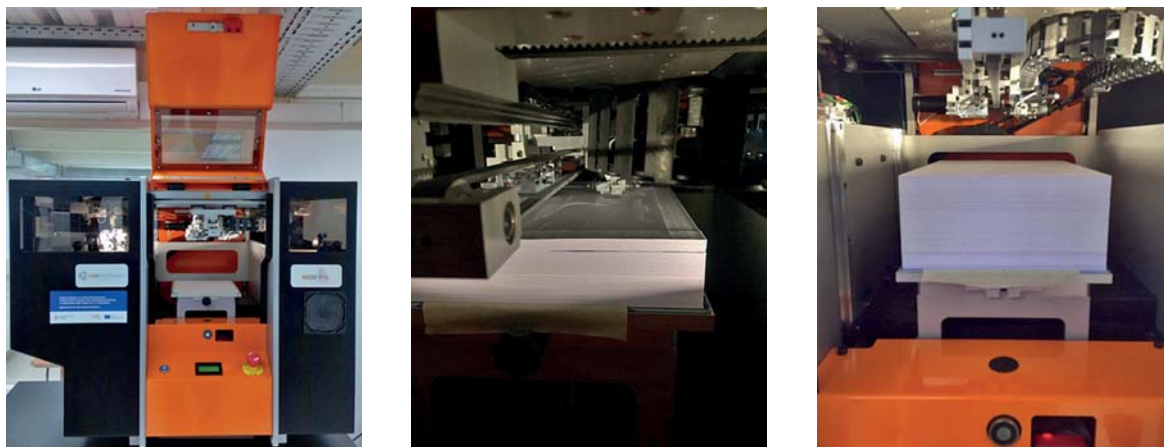
Obr. 4 Náhled připraveného modelu reliéfní mapy v digitální podobě

Samozřejmě existují i další varianty postupů jak dosáhnout podobného 3D modelu. Představená metodika je pouze ilustračním řešením. Analogických výsledků by bylo možné dosáhnout také například vlastním modelováním (např. v programu SketchUp) nebo při aplikaci a generování modelu pomocí metody „Structure from motion“. Ve všech případech by však měl být na výstupu soubor, který může vstoupit do procesu 3D tisku.

Produkcí plnobarevných modelů poté může zajistit 3D tiskárna Mcor IRIS HD, jenž využívá jako stavební materiál standardní kancelářský papír, který je po vrstvách slepován lepidlem a ořezáván nožem. Maximální velikost stavby je zde limitována rozměry 256 x 169 x 150 mm. Největší výhodou je zde samozřejmě varianta stavby plnobarevných modelů, kterých je možné dosáhnout za pomoci předem potištěných papírů (na klasické inkoustové 2D tiskárně) před jejich vstupem do tiskárny.

Po zahájení stavebního procesu musí být tiskový stroj uzavřen. Jednotlivé listy papíru jsou postupně pokládány na sebe a vzájemně slepeny lepidlem, které je rovnoměrně nanášeno po celé ploše modelu. Ostrý ocelový nůž tiskárny zároveň ořezává hranice plochy modelu v každé vrstvě

a rozděluje tak vrstvy papíru na vlastní část modelu a odpad, který může být následně efektivně recyklován. Celý model je také vytvrzován tlakem jedné tuny, jenž zajišťuje celistvost modelu a účinnost lepidla. Po dokončení stavby posléze dostaneme slepený blok papírů (viz **obr. 5 vpravo**). Tento papírový blok musí být vyjmut ze stroje a velmi opatrně rozebrán, aby se oddělila modelová část a odpadní papír. Pro tyto situace je výhodné použít například pinzetu nebo jiný nástroj pro oddělování malých kousků papíru. Posledním krokem celého procesu tohoto papírového 3D tisku je povrchová impregnace modelu za pomoci štětce. Během této fáze práce je povrch objektu mírně narušen a barvy získají správné tóny. Po impregnaci mohou navíc často zmizet i některé malé špatně vypadající detaily modelu, protože horní vrstvy modelu jsou díky rozrušení sloučeny dohromady. Doporučuje se impregnovat model velmi pečlivě, a to nejméně dvakrát a bez vzniku vzduchových bublin, které mohou znehodnotit tvar výsledku. Případový reliéfní model z oblasti elektrárny Dlouhé stráně byl postaven během 16 hodin z necelých 500 papírových listů a jeho velikost je zhruba 20 x 20 x 5 cm (viz **obr. 6**).



Obr. 5 Ilustrační fotografie 3D tiskárny (vlevo – papírová tiskárna Mcor IRIS HD, uprostřed – průběh 3D tisku, vpravo – hotová stavba)



Obr. 6 Výsledný fyzický model reliéfní mapy

4. Diskuse a závěr

Mnoho objektů zahrnuje komplikované tvary, jako jsou například ostré hrany nebo skokové změny ve výšce modelu. Takové úseky modelu mohou být při této technologii problematické, protože mohou být snadno poškozeny a odtrženy až už při samotné stavbě, či následném zpracování. Doporučuje se proto předkládat spíše ploché modely a pokud možno, bez skokových oblastí. Avšak i přes tyto limitující hlediska se může toto řešení pyšnit hned několika pozitivními aspekty nejen na poli 3D tisku. Vzniklé papírové modely jsou, v porovnání s ostatními materiály (plast, polymer...), plně recyklovatelné a logicky levnější. Navíc mohou věrohodně ztvárnit plnobarevný fyzický model z téměř libovolné předlohy, a to za stále bezkonkurenční cenu. Řada věcí může být vyrobena z papíru a při správném stavebním postupu lze dosáhnout velmi zajímavých výsledků, proto své uplatnění nachází 3D tiskárna v různých oblastech i mimo geoinformatiku (umění, prototypy apod.). V rámci geoinformatiky jsou dnešní moderní technologie schopny poskytnout mnoho velice zajímavých datových modelů. Jako právě demonstrované 3D mapy (fyzické modely reliéfu) nebo také například modely budov, měst či jeskyní.

Použitý stroj Mcor IRIS HD je na první pohled relativně složitým, ale také velmi užitečným zástupcem ze světa 3D tisku. Dokáže poskytnout ohromující výsledky prostřednictvím papírového materiálu, který jistě nalezne využití v mnoha oblastech lidské sféry reálného světa. Největší výhodou je samozřejmě typ stavebního materiálu, tedy běžný kancelářský papír, který je dostupný pro každého a který může být navíc plně obarvený. Zvláště pro děti je mnohem snazší pochopit, co znamená papírový materiál ve srovnání s plastovými materiály. Modely lze tisknout dokonce i z recyklovaných listů papíru, což by mělo učinit výsledky ještě levnější. Měla by však být zmíněna také určitá negativa celého systému, jako je například dlouhá doba výstavby modelu nebo omezení tiskové technologie v ostrých hranách tištěného objektu. Některé malé součásti modelu nelze bohužel vytisknout vůbec.

Článek byl podpořen v rámci projektu Výzkum a aplikace metod geoinformatiky pro řešení prostorových jevů reálného světa (IGA_PrF_2019_014) za podpory interní grantové agentury Univerzity Palackého v Olomouci.

LITERATURA:

- [1] MACEACHREN, A. M.: How maps work: representation, visualization and design. New York: The Guilford Press, 1995. xiii, 513 p. ISBN 0-89862-589-0.
- [2] SLOCUM, T. A.-McMASTER, R. B.-KESSLER, F. C.-HOWARD, H. H.: Thematic Cartography and Geovisualization: International Edition. 3. vydání, Pearson Prentice Hall, Pearson Education, Inc., New Jersey, 2009, 576 p. ISBN 978-0-13-229834-6.
- [3] HENRIKSEN, T. D.: Using Learning Games to Meet Learning Objectives. In: International Conference on Serious Games Development and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 273-277.
- [4] TERRIBILINI, A.: Entwicklung von Arbeitsabläufen zur automatischen Erstellung von interaktiven, vektorbasierten topographischen 3D-Karten. 2001. PhD Thesis. ETH Zurich.
- [5] HAEBERLING, C.-BÄR, H.-HURNI, L.: Proposed cartographic design principles for 3D maps: a contribution to an extended cartographic theory. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 2008, 43.3: pp. 175-188.
- [6] BUNCH, R. L.-LLOYD, R. E.: The cognitive load of geographic information. The Professional Geographer, 2006, 58.2: pp. 209-220.
- [7] BRYCHTOVÁ, A.-POPELKA, S.: Visualization of spatio-temporal changes of the Olomouc city. In Proceedings of 6th international workshop Digital approaches to Cartographic heritage ICC, Haag, Netherlands, 2011, 18 p.
- [8] SAVAGE, D. M.-WIEBE, E. N.-DEVINE, H. A.: Performance of 2D versus 3D topographic representations for different task types. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2004, pp. 1793-1797.
- [9] PETROVIČ, D.-MAŠERA, P.: Analysis of user's response on 3D cartographic presentations. Proceedings of 5th ICA Mountain Cartography Workshop, Bohinj, Slovenia, 2006, Mar 29 – Apr 1.
- [10] SCHOBESBERGER, D.-PATTERSON, T.: Exploring of effectiveness of 2D vs. 3D trail-head maps. In: Proceedings of 6th ICA mountain cartography workshop, Lenk im Simmental. 2008.
- [11] POPELKA, S.-BRYCHTOVÁ, A.: Eye-tracking study on different perception of 2D and 3D terrain visualisation. The Cartographic Journal 50(3), 2013, pp. 240-246.
- [12] Shuttle Radar Topography Mission [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné na: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.
- [13] ASTER Global Digital Elevation Map [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné na: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.
- [14] ALOS Global Digital Surface Model ALOS World 3D - 30m [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné na: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.html>.
- [15] MOLA Homepage [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné na: <https://attic.gsfc.nasa.gov/mola/>.
- [16] SIMÓN, F. J. V.: DEMto3D. 2015. [online]. Dostupné na: <http://demto3d.com/en/demto3d-disponible-qgis/> (10. 4. 2019).
- [17] KRÁLÍK, T.: Tematické mapy v autostereoskopickém provedení. Olomouc, 2016. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.
- [18] KRAAK, M.-ORMELING, F.: Cartography. 2nd ed. New York: Prentice Hall. 2003. ISBN 01-308-8890-7.
- [19] VOŽENÍLEK, V.-KAŇOK, J.: Metody tematické kartografie. 2011. ISBN 978-80-244-2790-4.
- [20] SLOCUM, T. A.-McMASTER, R. B.-KESSLER, F. C.-HOWARD, H. H.: Virtual Environments (3rd ed.). 2009. Pearson Prentice Hall.
- [21] ROBINSON, A. H. et al.: Elements of Cartography—6th Ed, 544 p. New York, John Wiley & Sons, 1995. ISBN 0471555797.

Do redakce došlo: 20. 5. 2019

Lektoroval:
doc. RNDr. Tomáš Řezník, Ph.D.,
Geografický ústav, Přírodovědecká fakulta,
Masarykova univerzita v Brně